

СЕКЦІЯ 1

**СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ І СИНТЕЗ ПРОЦЕСІВ У МЕТАЛУРГІЇ
ТА МАШИНОБУДУВАННІ**

SECTION 1

**SYSTEM ANALYSIS AND SYNTHESIS OF PROCESSES IN METALLURGY
AND MECHANICAL ENGINEERING**

ОСОБЛИВОСТІ ФОРМУВАННЯ ДЕФЕКТУ НЕСУЦІЛЬНОСТІ «KEY HOLE» В LPBF-ТЕХНОЛОГІЇ

Аджамський С.В.¹, Балаханова Т.В.², Барановська О.Є.², Подольський Р.В.³

¹ТОВ «АЛТ України», ІТСТ НАН України, докт. філ. Україна

²ІЧМ НАН України, канд. техн. наук. Україна

⁴ТОВ «АЛТ України», ІЧМ НАН України, ІПСУ НАН України докт. філ. Україна

Анотація. У роботі вивчено вплив параметрів лазерного плавлення порошкового матеріалу 316L на форму ванни розплаву та утворення дефектів типу «Key Hole». Аналіз 808 треків виявив 46 випадків пористості. Попри значну увагу дослідників до процесів LPBF, перехід від режиму проводимості до режиму «Key Hole» залишається суперечливим і недостатньо вивченим. Це підкреслює складність фізичних явищ, що відбуваються у ванні розплаву, та необхідність подальших досліджень. Аналіз отриманих результатів показав, що дефекти типу «Key Hole» не завжди з'являються на максимальній глибині ванни розплаву. Було встановлено, що пористість може утворюватися в широкому діапазоні потужностей, однак ці дефекти спостерігаються лише при швидкості сканування менше ніж 600 мм/с.

Ключові слова: лазерне плавлення в порошковому шарі, мікроструктура, ванна розплаву, режим плавлення, пористість, Key Hole.

Під час лазерного порошкового сплавлення (LPBF) поверхня деталі формується шляхом локального плавлення порошку лазером. Послідовне нарощування формує металеву конструкцію якість якої значною мірою залежить від стабільності ванни розплаву.

У процесі лазерного порошкового сплавлення тип і кількість пористості залежать від режиму плавлення. Якщо енергії недостатньо, порошок не встигає повністю розплавитись – з'являються пори від несплавлення, а коли лазер надто потужний, розплав перегрівається, формується так званий режим «Key Hole», і тоді в матеріалі можуть залишатись глибокі пори, які важко усунути повторним плавленням. Саме тому важливо ще на ранніх етапах процесу забезпечити стабільну форму ванни розплаву – від неї залежить якість усієї майбутньої конструкції.

Форма і поведінка цієї ванни залежать не лише від потужності й швидкості лазера, а й від таких факторів другого порядку, як розмір променя, склад і форма частинок порошку. Для опису умов плавлення використовують показники щільності енергії, які враховують різні аспекти взаємодії лазера з матеріалом. Але перехід між режимами плавлення – не різкий, а поступовий, що ускладнює точне передбачення дефектів.

Незважаючи на розвиток методів моніторингу в реальному часі [1], точно визначити ймовірність появи пор поки складно. Дефекти зазвичай класифікують постфактум – за допомогою мікроскопії, яка хоч і вимагає руйнування зразка, залишається найнадійнішим методом аналізу.

Оцінка форми та стабільності ванни розплаву під час лазерного плавлення залишається предметом активного наукового обговорення. Хоча класичний підхід передбачає напівсферичну геометрію ванни в режимі теплопровідності та витягнуту форму з паровою порожниною в режимі «Key Hole», експериментальні дані часто демонструють значне відхилення від таких ідеалізованих моделей.

Різні підходи до визначення порогових значень співвідношення ширини до глибини (W/D) плавної ванни використовуються для оцінки переходу між режимами плавлення. Згідно з деякими дослідженнями, пороговим значенням для переходу від стабільного теплопровідного плавлення до «Key Hole» є $W/D \approx 2$, що відповідає напівсферичній формі ванни, характерній для стабільного процесу. Інші автори визначають порогове значення $W/D \approx 1,5$, вказуючи на перехідний режим, де зростає ймовірність утворення пор. За іншими даними, значення може бути знижене до $W/D \approx 1,25$, що вказує на виражений перехід до «Key Hole» з високим випаровуванням металу. Окрім цього, важливу роль у стабільності плавлення відіграє форма ванни: циліндрична форма може зберігати стабільність навіть при малих значеннях W/D , а U- або клиноподібна ванна сприяє турбулентності і дефектам. Нові роботи розглядають ванни розплаву як фігуру складнішої форми, такі як «7», «Т» або «J», що відображають динаміку рідкого металу під впливом турбулентних потоків та капілярних сил. Деякі дослідники вказують на

можливість стабільного існування «Key Hole» без суттєвого утворення пор, якщо динаміка потоку залишається субкритичною. Натомість інші вважають навіть невелике заглиблення ознакою підвищеного ризику дефектів.

Таким чином, єдиної думки щодо точних критеріїв переходу між режимами плавлення не існує. Сучасний підхід враховує не лише геометрію, а й гідродинамічні процеси у ванні розплаву, що вимагає комплексного аналізу для точного прогнозування дефектів. Метою роботи є виявлення умов, що призводять до утворення пористості типу «Key Hole» в поодиноких треках, сформованих із порошку сталі 316L.

У дослідженні переходу від режиму теплопровідного плавлення до «Key Hole» акцентується увага на геометричних характеристиках плавильної ванни, таких як глибина (D) і ширина (W).

Морфологія треків може значно варіюватися, навіть за схожих геометричних умов. Наприклад, чашоподібна форма ванни з нерівномірним звуженням може призводити до утворення пористості (рис. 1).

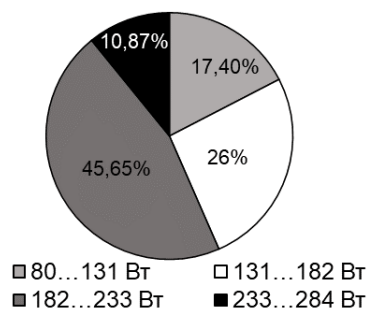
Дослідження 808 треків показали, що пористість типу «Key Hole» виявляється не так часто, але її виникнення залежить від параметрів процесу, таких як швидкість і потужність сканування (рис. 2).

Аналіз показав, що пористість не завжди виникає при максимальному значенні співвідношення глибини до ширини ванни, а має гаусівський розподіл зі середнім значенням 1,44. Також відзначено, що з підвищенням швидкості сканування (понад 600 мм/с) пористість практично не утворюється. Зростання щільності енергії також сприяє збільшенню пористості, що відповідає науковим дослідженням.



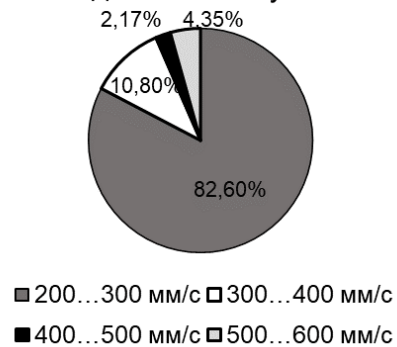
Рисунок 1 – Мікроструктури треків з близьким значенням глибини до ширини ванни розплаву ≈ 1 , $\times 200$: а – Р 270 Вт, V 800 мм/с, лінійна щільність енергії 76,39 Дж/мм²; б – Р 110 Вт, V 400 мм/с, лінійна щільність енергії 62,25 Дж/мм²; в – Р 150 Вт, V 400 мм/с, лінійна щільність енергії 84,88 Дж/мм²

Випадки пористості при різних потужностях сканування



а

Випадки пористості при різних швидкостях сканування



б

Рисунок 2 – Випадки виникнення пористості за типом «Key Hole» при різних значеннях: а – відношення глибини до товщини треків, б – потужності сканування, в – швидкості сканування

Сканування при швидкості більше ніж 500 мм/с суттєво зменшує глибину ванни, після чого подальше збільшення швидкості не має значного впливу. Водночас потужність змінює як товщину, так і глибину треків, причому її вплив є лінійним.

Мікротвердість треків показала нерівномірність температурного поля, що підтверджує різницю в характеристиках треків залежно від щільності енергії. Важливо зазначити, що пори не завжди розташовуються в найглибшій точці ванни. У випадку нахиленого руху лазера асиметрія треку збільшується, і ванна зміщується в бік направлення променя, що також впливає на розташування пор.

Висновки. Попри значну увагу дослідників до процесів LPBF, перехід від режиму проводимості до режиму «Key Hole» залишається суперечливим і недостатньо вивченим. Це підкреслює складність фізичних явищ, що відбуваються у ванні розплаву, та необхідність подальших досліджень. Аналіз отриманих результатів також виявив, що дефекти типу «Key Hole» не завжди з'являються на максимальній глибині ванни розплаву. Було встановлено, що пористість може утворюватися в широкому діапазоні потужностей, однак ці дефекти спостерігаються лише при швидкості сканування менше ніж 600 мм/с.

ЛІТЕРАТУРА / REFERENCE

1. Galbusera, F., Caprio, L., Previtali, B., Demir, A.G. The influence of novel beam shapes on melt pool shape and mechanical properties of LPBF produced Al-alloy. Journal of Manufacturing Processes. – 2023, 85. P. 1024-1036. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.12.007>

FEATURES OF FORMATION OF THE “KEY HOLE” DISINTEGRITY DEFECT IN LPBF TECHNOLOGY

Adjamsky S.V., Balakhanova T.V., Baranovskaya O.E., Podolskyi R.V.

Annotation. *The paper studies the influence of laser melting parameters of 316L powder material on the shape of the melt pool and the formation of Key Hole defects. Analysis of 808 tracks revealed 46 cases of porosity. Despite the considerable attention of researchers to LPBF processes, the transition from the conduction mode to the Key Hole mode remains controversial and insufficiently studied. This emphasizes the complexity of the physical phenomena occurring in the melt pool and the need for further research. Analysis of the obtained results showed that Key Hole defects do not always appear at the maximum depth of the melt pool. It was found that porosity can form in a wide range of powers, but these defects are observed only at scanning speeds less than 600 mm/s.*

Keywords: *laser powder bed fusion, microstructure, melt pool, melting mode, porosity, Key Hole.*

**ДОСЛІДЖЕННЯ КІНЕТИКИ ВТОМНОГО РУЙНУВАННЯ МЕТАЛУ
ЗАЛІЗНИЧНИХ КОЛІС З РІЗНИМИ РІВНЯМИ МІЦНОСТІ МЕТОДОМ
КОРЕЛЯЦІЙНОГО АНАЛІЗУ**

Бабаченко О.І.¹, Кононенко Г.А.², Подольський Р.В.³, Сафронова О.А.⁴

¹ІЧМ НАН України, чл.-кор НАН України, докт.техн. наук. Україна

²ІЧМ НАН України, НТУ «Дніпровська Політехніка», ст.досл., д. т. н. Україна

³ІЧМ НАН України, 1 докт. філ. Україна.

⁴ІЧМ НАН України, аспірант Україна

Анотація. Вироби на практиці часто підлягають циклічним навантаженням, повторна зміна напружень невеликої величини може призвести до руйнування внаслідок розвитку втомної тріщини. Для залізничних коліс це означає збільшення інтервалів між періодичними оглядами та підвищення безпеки залізничних перевезень. Був виконаний кореляційний аналіз зв'язку між показниками механічних властивостей, які визначаються за умов статичного розтягу, динамічного вигину та показниками, які визначаються за циклічного навантаження. Для кількох пар характеристик встановлено значення коефіцієнта Пірсона на рівні 0,99 (K_{th} та відносне подовження, K_{th} та ударна в'язкість, K_{fc} та відносне звуження, K^* та твердість, K^* та границя міцності). Критерій n є найменш чутливим до змін інших механічних властивостей, показано, що лише відносне подовження та ударна в'язкість мають високий зв'язок з цією характеристикою.

Ключові слова: кореляційний аналіз, втомне руйнування, ріст втомної тріщини, хімічний склад, механічні властивості, залізничне колесо

Кочення колеса по рейці супроводжується процесами зношування їх матеріалів і накопиченням пошкоджень від контактної втоми. Для забезпечення надійної безвідмовної роботи необхідне прогнозування зародження та росту втомної тріщини за циклічного навантаження [1]. Проведення тривалих випробувань за умов багатоциклічного навантаження є скрадним та дороговартісним, їх проведення не завжди можливо реалізувати в умовах виробництва. Разом з тим, для партії коліс завжди відомі їх хімічний склад та службові механічні властивості.

Мета роботи – встановити вплив основних хімічних компонентів вуглецевої сталі та механічних характеристик, які визначаються при випробуваннях на розтяг, твердості та ударної в'язкості на показники розвитку тріщини за умов циклічного навантаження на основі кореляційного аналізу.

Оскільки для кореляційного аналізу вибірка має бути однорідною та релевантною, тому в роботі всі характеристики визначали на металі від одного залізничного колеса для кожної марки сталі в стані постачання (табл.1).

Таблиця 1

Хімічний склад та механічні властивості досліджуваних сталей

Марка сталі	Вміст хімічних елементів, мас. %.					
	C	Mn	Si	V	S	P
1	0,49	0,72	0,34	-	0,012	0,011
2	0,58	0,64	0,34	-	0,012	0,010
T	0,63	0,72	0,32	0,094	0,010	0,010
Марка сталі	Границя міцності, Н/мм ²	Відносне видовження, %.	Відносне звуження, %	Ударна в'язкість, Дж/см ²	Твердість, НВ	
1	902	17,4	38,6	48,6	278	
2	1010	11,5	29	33	285	
T	1250	10,5	21	31	321	
Марка сталі	K _{th} , Н/мм ^{3/2}	K*, Н/мм ^{3/2}	n	K _{fc} , Н/мм ^{3/2}		
1	504	960	3,02	5064		
2	221	942	3,2	3162		
T	209	870	3,1	2055		

Був виконаний кореляційний аналіз, який дозволив зробити опис зв'язку між хімічним складом та різними механічними характеристиками за умов статичного, динамічного та циклічного навантаження до руйнування металу залізничних коліс, які мали однакову геометрію, однакову технологічну схему гарячої пластичної деформації та термічного оброблення в умовах одного підприємства (табл. 2).

Таблиця 2

Коефіцієнти парної кореляції між показниками хімічного складу та механічних властивостей залізничних коліс в стані постачання

№ з/п	Показник	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	C, % мас.	1	-0,16	-0,77	0,77	-0,77	-0,93	-0,95	-0,88	0,58	-0,99	0,93	-0,97	-0,99	-0,97	0,86
2	Mn, % мас.	-0,16	1	-0,5	0,5	-0,5	0,5	0,47	-0,33	-0,90	0,15	0,21	0,38	0,05	0,41	0,36
3	Si, %мас.	-0,77	-0,5	1	-1	1	0,5	0,53	0,98	0,06	0,78	-0,95	0,61	0,84	0,59	-0,99
4	V, % мас.	0,77	0,5	-1	1	-1	-0,5	-0,53	-0,98	-0,06	-0,78	0,95	-0,61	-0,84	-0,59	0,98
5	S, % мас.	-0,77	-0,5	1	-1	1	0,5	0,53	0,98	0,06	0,78	-0,95	0,61	0,84	0,59	-0,99
6	P, % мас.	-0,93	0,5	0,5	-0,5	0,5	1	0,99	0,65	-0,83	0,93	-0,74	0,99	0,89	0,99	-0,63
7	Kth, Н/мм ^{3/2}	-0,95	0,47	0,53	-0,53	0,53	0,99	1	0,68	-0,81	0,94	-0,76	0,99	0,91	0,99	-0,65
8	K*, Н/мм ^{3/2}	-0,88	-0,33	0,98	-0,98	0,98	0,65	0,68	1	-0,13	0,88	-0,99	0,75	0,93	0,73	-0,99
9	n	0,58	-0,90	0,06	-0,06	0,06	-0,83	-0,81	-0,13	1	-0,57	0,24	-0,75	-0,49	-0,77	0,09
10	Kfc, Н/мм ^{3/2}	-0,99	0,15	0,78	-0,78	0,78	0,93	0,94	0,88	-0,57	1	-0,93	0,97	0,99	0,96	-0,87
11	Границя міцності, Н/мм ²	0,93	0,21	-0,95	0,95	-0,95	-0,74	-0,76	-0,99	0,24	-0,93	1	-0,82	-0,96	-0,80	0,99
12	Відносне подовження, %	-0,97	0,38	0,61	-0,61	0,61	0,99	0,99	0,75	-0,75	0,97	-0,82	1	0,94	0,99	-0,72
13	Відносне звуження, %	-0,99	0,05	0,84	-0,84	0,84	0,89	0,91	0,93	-0,49	0,99	-0,96	0,94	1	0,93	-0,91
14	Ударна в'язкість, Дж/см ²	-0,97	0,41	0,59	-0,59	0,59	0,99	0,99	0,73	-0,77	0,96	-0,80	0,99	0,93	1	-0,70
15	Твердість, НВ	0,86	0,36	-0,99	0,98	-0,99	-0,63	-0,65	-0,99	0,09	-0,87	0,99	-0,72	-0,91	-0,70	1

На етапі зародження тріщини, який характеризується показником Kth, встановлено вельми високу негативну кореляцію зі зміною вмісту вуглецю та позитивну зі зміною вмісту фосфору. На етапі сталого росту втомної тріщини, другому етапі, що характеризується показниками n та K*, встановлено вельми високий та високий негативний зв'язок зі зміною вмісту вуглецю, марганцю, ванадію та фосфору, та позитивний - кремнію та сірки. На етапі лавиноподібного росту тріщини, третьому етапі, встановлено вельми високий та високий негативний зв'язок з вуглецем та ванадієм; позитивний вельми високий та високий зв'язок зі зміною вмісту кремнію, сірки та фосфору.

Також був виконаний кореляційний аналіз зв'язку між показниками механічних властивостей, які визначаються за умов статичного розтягу,

динамічного вигину та показниками, які визначаються за циклічного навантаження. Встановлено, що зміни границі міцності та твердості мають високий та вельми високий негативний кореляційний зв'язок з усіма показниками КДВР, окрім критерія n , з яким зв'язок відсутній. Необхідно зазначити, що для таких пар характеристик як твердість та K^* , границя міцності та K^* коефіцієнт Пірсона становить 0,99, що свідчить про високу надійність лінійного зв'язку між цими характеристиками і може бути встановлена функціональна залежність. Характеристики пластичності та ударної в'язкості мають високий та вельми високий позитивний зв'язок з показниками зародження та росту втомної тріщини, окрім критерія n . Для таких пар характеристик як K_{th} та відносне подовження, K_{th} та ударна в'язкість, K_{fc} та відносне звуження коефіцієнт Пірсона становить 0,99, що свідчить про високу надійність лінійного зв'язку між цими характеристиками і може бути встановлена функціональна залежність. Це може стати завданням для подальших досліджень, а розширення бази даних для аналізу може дозволити встановити закономірності зв'язку між службовими характеристиками та показниками, що характеризують втомне руйнування.

Висновки. За результатами аналізу коефіцієнтів парної лінійної кореляції між вмістом основних хімічних елементів в сталі та показниками росту втомної тріщини встановлено вельми високий негативний зв'язок K_{th} (етап зародження тріщини) та K_{fc} (етап долому) зі зміною вмісту вуглецю, а для n (показник наростання швидкості зростання тріщини за її сталого росту) – високий негативний зв'язок зі зміною вмісту марганцю, K^* (коефіцієнт інтенсивності напружень при швидкості зростання тріщини 10^{-7} м/цикл, етап сталого росту) – зі зміною вмісту ванадію, але разом з тим встановлено вельми високий позитивний зв'язок K^* та вмісту кремнію і сірки, з n – вмісту фосфору. Встановлено значення коефіцієнта Пірсона на рівні 0,99 для таких пар характеристик: K_{th} та відносне подовження, K_{th} та ударна в'язкість, K_{fc} та відносне звуження, K^* та твердість, K^* та границя міцності) Критерій n є найменш чутливим до змін інших механічних властивостей, показано, що

лише відносне подовження та ударна в'язкість мають високий зв'язок з цією характеристикою.

Необхідні подальші дослідження для встановлення зв'язку зі зміною домішкових елементів та встановлення функціональних закономірностей впливу характеристик на показники росту втомної тріщини.

ЛІТЕРАТУРА / REFERENCE

1. Sakalo V., Sakalo A., Rodikov A., Tomashevskiy S. Computer modeling of processes of wear and accumulation of rolling contact fatigue damage in railway wheels using combined criterion Wear. – 2019, 432–433. Id. 102900. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2019.05.015>.

STUDY OF THE KINETICS OF FATIGUE DESTRUCTION OF RAILWAY WHEEL METAL WITH DIFFERENT STRENGTH LEVELS USING THE CORRELATION ANALYSIS METHOD.

Babachenko O.I., Kononenko G.A., Podolsky R.V., Safronova O.A.

Annotation. *In practice, products are often subjected to cyclic loads, repeated changes in stresses of small magnitude can lead to failure due to the development of a fatigue crack. For railway wheels, this means increasing the intervals between periodic inspections and improving the safety of railway transportation. A correlation analysis of the relationship between the indicators of mechanical properties determined under static tension, dynamic bending and indicators determined under cyclic loading was performed. For several pairs of characteristics, the value of the Pearson coefficient was set at 0.99 (K_{th} and relative elongation, K_{th} and impact toughness, K_{fc} and relative narrowing, K^* and hardness, K^* and ultimate strength). The criterion n is the least sensitive to changes in other mechanical properties, it is shown that only elongation and impact strength have a high correlation with this characteristic.*

Keywords: *correlation analysis, fatigue fracture, fatigue crack growth, chemical composition, mechanical properties, railway wheel*

ВПЛИВ КРІОГЕННОГО ОБРОБЛЕННЯ НА ЗМІНУ ЗНОСОСТІЙКОСТІ ВИСОКОВУГЛЕЦЕВИХ ЛЕГОВАНИХ СТАЛЕЙ ІНСТРУМЕНТАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

Бобирь С. В.¹, Парусов Е. В.¹, Чуйко І.М.², Барановська О. Є.³

¹ ІЧМ ім. З.І. Некрасова НАН України, д.т.н., с.н.с., Україна

² ІЧМ ім. З.І. Некрасова НАН України, к.т.н., ст. досл., Україна

³ ІЧМ ім. З.І. Некрасова НАН України, к.т.н., Україна

Анотація. Досліджено вплив кріогенного оброблення на експлуатаційну стійкість сталей інструментального призначення із додатковим легуванням кремнієм, хромом, молібденом, ванадієм та вольфрамом. Високовуглецеві леговані сталі після гартування завжди містять істотну кількість залишкового аустеніту, що потребує проведення енергоємних довготривалих технологічних операцій для його подальшого розпаду, але це не завжди вирішує існуючу проблему, яка пов'язана з їх низькою зносостійкістю, особливо в жорстких умовах експлуатації. Саме з цієї точки зору, під час проведення експериментів першу партію досліджуваних сталей обробляли за стандартною технологією термічного зміцнення (гартування та відпуск), а другу партію – за стандартною технологією із додатковим кріогенним обробленням. За результатами досліджень шляхом порівняльного аналізу встановлено особливості зношування високовуглецевих легованих сталей в залежності від типу кінцевої структури. Показано, що хімічний склад, параметри режиму термічного зміцнення та тривалість випробувань чинять різний вплив на зносостійкість сталей інструментального призначення, однак при цьому досліджуванні сталі, що були піддані додатковому кріогенному обробленню, у всіх випадках характеризуються найменшою втратою ваги під час абразивного зношування.

Ключові слова: високовуглецева сталь, легування, аустеніт залишковий, термічне оброблення, зносостійкість, кріогенне оброблення

Вступ. Високовуглецеві леговані сталі інструментального призначення після швидкого охолодження до кімнатної температури містять залишковий аустеніт ($A_{\text{зал}}$), який під час подальшого охолодження може перетворюватися на мартенсит. Найбільш істотний вплив на положення критичних точок мартенситного перетворення та кількість залишкового аустеніту чинить вміст вуглецю в сталі. Основним недоліком звичайних високовуглецевих сталей є їхня незначна прогартовуваність та низька теплостійкість. Тому на практиці з метою

поліпшення зазначених показників до складу високовуглецевих сталей додатково вводять кремній, хром, молібден, ванадій та вольфрам, сумарний вміст яких не перевищує 5 %. Більшість із зазначених легувальних елементів за рахунок впливу на підвищення стійкості аустеніту зменшують критичну швидкість гартування й збільшують прогартовуваність сталей інструментального призначення. Традиційним способом, який сприяє розпаду $A_{зал}$, є високотемпературний відпуск, але при цьому змін зазнає структура сталі. Альтернативним способом зменшення кількості $A_{зал}$ в структурі загартованої легованої сталі може бути кріогенне оброблення, яке дозволяє продовжити процес розпаду аустеніту на мартенсит за рахунок більш глибокого переохолодження нижче критичної точки M_k . Практичні задачі кріогенного оброблення зводяться до цілеспрямованого впливу на підвищення твердості та, відповідно, експлуатаційної стійкості (зносостійкості) металовиробів, що виготовлені з високовуглецевих легованих сталей.

Мета роботи – дослідити вплив параметрів комплексного термічного оброблення на зміну зносостійкості високовуглецевих сталей, які леговані кремнієм, хромом, молібденом, ванадієм та вольфрамом.

Матеріали та методика досліджень. У якості матеріалу використано циліндричні зразки промислових партій прокату діаметром 8,0–10,0 мм з високовуглецевих легованих сталей із хімічним складом, наведеним у таблиці. Під час проведення досліджень для кожної сталі використовували відповідні пари дослідних зразків, один з яких обробляли за стандартною технологією термічного зміцнення (СТЗ), а другий із додатковим кріогенним обробленням (експериментальний режим) за температури $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ після СТЗ. Тривалість кріогенного оброблення становила 26 год., при цьому швидкості охолодження і відігрівання склали $1\text{ }^{\circ}\text{C/хв.}$ та $2\text{ }^{\circ}\text{C/хв.}$ відповідно. Досягнення від'ємної температури зразків забезпечували шляхом регламентованого охолодження у середовищі газоподібного азоту, подальшого витримування у рідкому азоті й наступного відігрівання. На завершальному етапі проводили низькотемпературний відпуск за температури $\sim 150\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Таблиця 1

Хімічний склад досліджуваних легованих сталей

№ за/п	Вміст хімічних елементів, % ваг.								
	C	Mn	Si	Cr	Mo	V	W	S	P
Сталь № 1	0,84	0,33	0,31	4,05	5,02	1,93	5,71	0,004	0,011
Сталь № 2	0,88	0,44	1,32	1,07	0,016	0,003	0,002	0,008	0,012
Сталь № 3	1,03	0,29	0,28	1,45	0,007	0,002	0,001	0,005	0,010

Порівняльний аналіз зносостійкості досліджуваних сталей проводили на абразивному колі із використанням свердлильного верстату за авторською методикою випробувань. Згідно з цією методикою, створювали постійне зусилля на кінці ручки регулювання положення шпинделя (вантаж вагою 1,0 кг), що забезпечувало однакові зусилля у контактній зоні випробувального матеріалу з абразивним колом. За постійної швидкості обертання шпинделя для всіх пар зразків (стандартний і експериментальний режими) через певні проміжки часу (1, 5, 10 та 15 хв.) проводили зважування зразків на високоточних лабораторних аналітичних вагах «ВЛА-200» із точністю до 1,0 мг.

Результати. Термічне оброблення першої (стандартний режим) та другої (експериментальний режим) партії зразків із досліджуваних сталей проводили за наступними режимами: сталь № 1 – нагрівання до 1220 °С, витримування, гартування у маслі, триразове відпускання при 560 °С; сталь № 2 – нагрівання до 860 °С, витримування, гартування у маслі, відпускання при 150 °С; сталь № 3 – нагрівання до 860 °С, витримування, гартування у маслі, відпускання при 150 °С. Другу партію зразків додатково піддавали кріогенному обробленню (КО) з наступним відпусканням при 150 °С. Результати порівняльних випробувань на абразивне зношування зразків досліджуваних сталей наведено на рисунку.

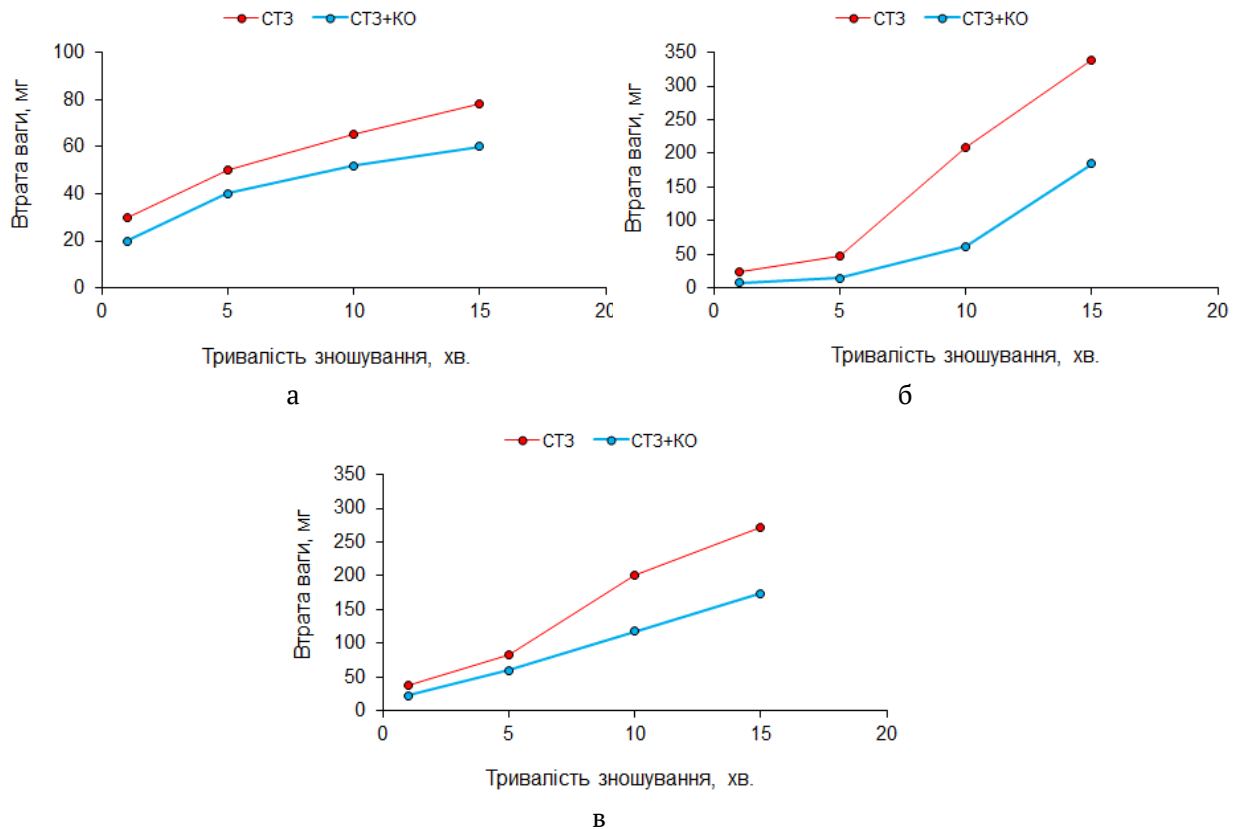


Рисунок 1 – Втрата ваги дослідних зразків після абразивного зношування:
а – сталь № 1; б – сталь № 2; в – сталь № 3

Менша втрата ваги зразка (сталь № 1) для режимів СТЗ+КО відповідає більш високій зносостійкості, порівняно з режимом СТЗ. Різниця у зношуванні становить ~ 50–30 %. При цьому після 10-ї хвилини зношування зразка, обробленого за режимом СТЗ, відбувається більш інтенсивно. Це дозволяє припустити, що за більш тривалого періоду експлуатації режим СТЗ+КО забезпечить для сталі № 1 ще більший ефект підвищення зносостійкості.

Зміна у зношуванні сталі № 2 за режимами СТЗ і СТЗ+КО відрізняється від сталі № 1 та характеризується явно вираженим нелінійним характером із зростанням тривалості випробувань. Різниця у зношуванні становить ~ 200–82 %. У процесі збільшення тривалості випробувань сталі № 2, що обумовлює певний розігрів, відбувається відпускання мартенситу, а тому різниця втрати ваги зразків істотно зменшується.

Зміна у зношуванні сталі № 3 за схемами СТЗ та СТЗ+КО також відрізняється від сталі № 1. Зі збільшенням тривалості випробувань зростання

втрати ваги зразка за режимом СТЗ більш відрізняється від зразка після додаткової КО. Різниця у зношуванні становить ~ 72–56 %.

Необхідно зазначити, що підвищення зносостійкості низьковідпущеного мартенситу порівняно з високовідпущеним станом пов'язане з більш високим вмістом у ньому вуглецю, що обумовлює формування не тільки вихідної мікротвердості (твердості), але і його здатність до самозміцнення, внаслідок розвитку динамічного деформаційного старіння під час абразивного зношування. Наявність в структурі сталі вказаного типу мартенситу обумовлює також підвищений рівень залишкових стискаючих напружень, які сприятливо впливають на поверхневу контактну міцність готових металовиробів.

Результати проведених досліджень цілком відповідають раніше отриманому ефекту після криогенного оброблення конструкційної сталі 38ХНЗМФА, в якій спостерігали підвищення поверхневої зносостійкості до ~ 50 % в залежності від режиму гартування [1, 2]. Отже, застосування криогенного оброблення чинить загально позитивний вплив на експлуатаційну стійкість легованих сталей в незалежності від вмісту вуглецю.

Подальші дослідження авторів будуть зосереджені на визначенні ефективної тривалості витримування досліджуваних сталей у рідкому азоті [3] з метою створення сучасних енергоощадних технологій термічного зміцнення металовиробів зі сталей інструментального призначення (фрези, свердла, підшипники тощо).

Висновки. За результатами проведених досліджень встановлено особливості впливу криогенного оброблення на формування зносостійкості високовуглецевих сталей інструментального призначення, додатково легованих кремнієм, хромом, молібденом, ванадієм та вольфрамом. На наступному етапі заплановано проведення в умовах машинобудівних підприємств серії промислових випробувань під час виготовлення товарних металовиробів з досліджуваного марочного сортаменту сталей. При цьому, спираючись на наявний власний досвід авторів, найбільший ефект може бути досягнуто, якщо криогенне оброблення буде включено до технології термічного зміцнення високовуглецевих легованих сталей безпосередньо після операції

гартування, з метою запобігання стабілізації залишкового аустеніту, зменшення температури та кількості циклів відпускання.

ЛІТЕРАТУРА

1. Бобирь С. В., Парусов Е. В., Голубенко Т. М., Барановська О. Є., Чуйко І. М. Дослідження впливу кріогенного оброблення на особливості формування структури та зносостійкості сталі 38ХН3МФА. Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії. 2022. Вип. 36. С. 430–440. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2022-36-430-440>
2. Бобирь С. В., Парусов Е. В., Голубенко Т. М., Барановська О. Є. Про особливості формування структури під час ізотермічного гартування та кріогенного оброблення сталі 38ХН3МФА. Наука і металургія : матеріали всеукраїнської науково-технічної конференції Дніпро, 22–24 листопада 2022 : ІЧМ НАНУ, УДУНТ МОН України. С. 46–47. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2022-conferens>
3. Serhii Bobyr, Pavlo Krot, Eduard Parusov, Tetiana Golubenko, Olena Baranovs'ka Increasing the wear resistance of structural alloy steel 38CrNi3MoV subjected to isothermal hardening and deep cryogenic treatment. Applied Sciences. 2023. № 13(16). 9143. <https://doi.org/10.3390/app13169143>

INFLUENCE OF DEEP CRYOGENIC TREATMENT ON THE CHANGE IN WEARRESISTANCE OF HIGH-CARBON ALLOY TOOL STEELS

Serhii Bobyr, Eduard Parusov, Ihor Chuiko, Olena Baranovs'ka

Abstract. *The effect of deep cryogenic treatment on the operational stability of tool steels with additional alloying with silicon, chromium, molybdenum, vanadium and tungsten was studied. High-carbon alloy steels after quenching always contain a significant amount of residual austenite, which requires energy-intensive long-term technological operations for its further decomposition, but this does not always solve the existing problem associated with their low wear resistance, especially in harsh operating conditions. It is from this point of view that during the experiments, the first batch of the studied steels was treated using standard thermal hardening technology (quenching and tempering), and the second batch was treated using standard technology with additional deep cryogenic treatment. According to the results of the research, the features of wear of high-carbon alloy steels depending on the type of final structure were established by comparative analysis. It is shown that the chemical composition, parameters of the thermal hardening regime, and the duration of the tests have different effects on the wear resistance of tool steels, however, in this study, steels that were subjected to additional deep cryogenic treatment are in all cases characterized by the lowest weight loss during abrasive wear.*

Keywords: *high carbon steel, alloying, retained austenite, heat treatment, wear resistance, deep cryogenic treatment*

REFERENCE

1. Bobyr S. V., Parusov E. V., Goloubenko T. M., Baranovs'ka O. Ye., Chuiko I. M. Doslidzhennya vplivu kriogenного obroblyennya na osoblivosti formuvannya strukturi ta znosostykyt' stali 38HN3MFA. Fundamental'ni ta prikladni problemy chornoї metalurgii. 2022. Vol. 36. P. 430–440. [In Ukrainian]. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2022-36-430-440>
2. Bobyr S. V., Parusov E. V., Goloubenko T. M., Baranovs'ka O. Ye. Pro osoblivosti formuvannya strukturi pid chas izotermichного gartuvannya ta kriogenного obroblyennya stali 38HN3MFA. Nauka i metalurgiya : materialy vseukraїns'koї naukovo-tekhnichnoї konferencii Dnipro, 22–24 listopada 2022 : IChM NANU, UDUNT MON Ukraini. P. 46–47. [In Ukrainian]. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2022-conferens>
3. Serhii Bobyr, Pavlo Krot, Eduard Parusov, Tetiana Golubenko, Olena Baranovs'ka Increasing the wear resistance of structural alloy steel 38CrNi3MoV subjected to isothermal hardening and deep cryogenic treatment. Applied Sciences. 2023. № 13(16). 9143. <https://doi.org/10.3390/app13169143>

**ВПЛИВ ДЕФЕКТІВ БУДОВИ В ВИРОБАХ ЗІ СПЛАВУ ALSI10MG,
ВИГОТОВЛЕНИХ ЗА АДИТИВНОЮ ТЕХНОЛОГІЄЮ PBF-LB/МНА КІНЦЕВІ
МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ**

Буштрук С.І.¹, Миронова Т.М.²

¹ Український державний університет науки і технологій, аспірант Україна

² Український державний університет науки і технологій, д.т.н., проф. Україна

Анотація. *Виготовлення металевих виробів за технологією PBF-LB/М, що характеризується машинним поступовим сплавленням об'ємів призводить до утворення унікальних (нетипових) структур і дефектів (пустот) з особливим характером розташування, що впливає на кінцевий комплекс механічних властивостей. У нормативній документації питання обов'язкового контролю і допустимого рівня дефектів, які виникають за даною технологією, досі не унормовані, але враховуються опосередковано через коливання рівня механічних властивостей, та мають широкі діапазони допуску. Вивчення впливу параметрів друку на властивості є більш раціональним через застосування матеріалознавчого підходу, що враховує вплив структури і наявності дефектів, бо має перспективи для спрощення обчислень при постановці задач з моделювання. В роботі пропонується для сплаву AlSi10Mg використання характеристик рівня дефектності та морфології структури для визначення показників механічних властивостей.*

Ключові слова: *лазерне плавлення металевого порошкового шару, силумін, дефекти будови, норми і методи контролю, міцність, моделювання властивостей.*

Застосування новітніх адитивних технологій виготовлення для задоволення потреб машинобудування у виробництві дрібних серій продукції ставить вимоги по забезпеченню достатніх показників її якості. На теперішній час нормативною документацією регулюються показники механічних властивостей, а вплив структурного фактору, а також наявність дефектів стандартами не нормуються.

Вироби із силуміну AlSi10Mg, виготовлені за технологією PBF-LB/М згідно стандарту [1] мають доволі широкий діапазон коливання показників міцності і пластичності та анізотропний характер останніх. Це пов'язано, як з особливостями структури, так і з розподілом дефектів в об'ємі виробу.

Стандарт [2], який описує дефекти технології PBF-LB/M визначає три їх основні групи за причинами виникнення та наслідками: дефекти будови (структури), дефекти геометрії та дефекти процесу. Саме дефекти будови є основним, майже постійно присутнім фактором, що знижує механічні властивості в усьому об'ємі виробу. Вони включають: газові пори еліпсоїдної форми, пустоти з гострими кутами, що виникають через недостатній проплав, а також мікротріщини. Слід зазначити, що останні два типи дефектів мають значний вплив на механічні властивості, оскільки знижують енергію необхідну для руйнування.

Хоча контроль якості виробів по кількості та розподілу дефектів є додатковими умовами замовлення згідно стандартів, а конкретні кількісні показники визначаються у приватному порядку, окремі організації і відомі дослідницькі центри вважають їх важливими. Наприклад, у документі NASA (США) [3] зазначено, що рівень дефектності в об'ємі не може перевищувати 1%. Визначена межа приблизно відповідає рівню розвитку дефектів, який можна побачити неозброєним оком (1-2%).

Методи контролю дефектів будови, що застосовуються в теперішній час мають багато обмежень, а головне відсутність можливості застосування їх в усьому об'ємі товарних виробів без руйнування. Денситометричний метод потребує низької шорсткості поверхні, що є важливим для забезпечення точності вимірювання в діапазоні розвитку дефектів 0-2%. Металографічний метод є лише напівкількісним через неможливість вираховування реального об'єму дефекту по його площі в перерізі, а також через вірогіднісний фактор потрапляння дефектів в переріз. Метод мікро- комп'ютерної томографії є найбільш точним і досконалим, що визначає і об'єм дефектів і їх розподіл, але успішно застосовується лише на зразках простої форми, за умови невеликої товщини металу.

Для визначення кінцевих властивостей друкованих виробів багатьма дослідниками застосовується моделювання через вплив енергетичних параметрів друку, зокрема питомої об'ємної енергії, яка визначається виразом (1) та її складових.

$$VED = \frac{P}{V \cdot h \cdot t} \quad (1)$$

VED – питома об’ємна енергія, Дж/мм³;

P – потужність лазера, Вт;

V – швидкість руху лазера, мм/с;

h – крок сканування (штрихування), мкм;

t – товщина порошкового шару, що сплавляється за один цикл, мкм.

Такий підхід не є універсальним, оскільки не враховує інші фактори, наприклад зміну обладнання, друк іншої геометрії виробу чи фракційний склад порошку. З іншого боку врахування всіх параметрів [4], основні з яких перераховані в табл.1, призводитиме до труднощів в обчисленнях. Наприклад, з 15 визначених параметрів може утворитись не менше 10¹² комбінацій, не враховуючи змін цих показників.

Визначення оптимуму енергетичних параметрів та встановлення допустимих меж дефектності виробу, так само як і впливу структурного стану, є основою для побудови технологічного процесу, що забезпечуватиме стабільність властивостей.

Таблиця 1

Фактори, що впливають на формування властивостей виробів, виготовлених за технологією PBF-LB/M.

Обладнання	Параметри процесу	Геометрія	Матеріал
Характеристики лазера	Потужність лазера	Конфігурація деталі	Технологічні властивості сплаву
Характеристики системи сканування	Швидкість руху лазера	Розміри та товщини окремих елементів	Наявність домішок і вологи у порошку
Схема охолодження газом	Крок штрихування (сканування)	Орієнтація під час друку	Фракційний склад порошку
Площа побудови	Товщина шару	Розташування підтримок	Технологічний газ
Надійність систем	Стратегія сканування	Необхідна якість поверхні	
Протяжність зупинок			

В роботі [5] виконане моделювання впливу параметрів процесу на ступінь заповнювання об’єму металом, де критерієм успіху було отримання найменшої кількості пустот (дефектів). Слід зазначити, що особливістю

технології PBF-LB/M є повторюваність операцій сплавлення лазером об'єму деталі. Тому дефекти можуть мати як випадковий характер розподілу, пов'язаний, наприклад, з коливанням щільності порошкового шару, так і переважний розподіл, пов'язаний з обраним програмним режимом заповнення (стратегією друку) і наявність меж (стиків) окремих мікрооб'ємів.

Аналогом друкованого сплаву AlSi10Mg за хімічним і фазовим складом є вітчизняний ливарний сплав АЛ4, який згідно літературної класифікації називають «герметичним», за основною задачею свого застосування, без високих вимог до механічних властивостей. Виготовлення за технологією PBF-LB/M забезпечує отримання субмікронної структури, а також більш високих показників міцності та пластичності, хоча і зі значними коливаннями, та суттєво вираженою анізотропією за рівнем пластичності, що пов'язані із впливом внутрішніх дефектів (див. табл.2).

Таблиця 2

Механічні властивості сплаву АЛ4 (лиття в кокіль) [6] та сплаву AlSi10Mg (PBF-LB/M) [1]

Марка (стан)	σ_B , МПа	$\sigma_{0.2}$, МПа	δ_5 , %
АЛ4 (Т6)	240	203	3,5
AlSi10Mg (AsP 0°)	353-482	210-272	2-5
AlSi10Mg (AsP 90°)	372-473	239-292	4-7

Таким чином, враховуючи викладені дані, визначено, що для силуміну виготовленого адитивною технологією PBF-LB/M, так само як і литвом, типовим є лінійний характер залежності зміни межі міцності сплаву від кількості дефектів в діапазоні 0-1%, ширше якого межа міцності знижуються до неприйняттого рівня за стандартом. На рис.1 на графіку наведені скомбіновані дані джерел [7, 8]. Показники пластичності, як виявилось також мають лінійний, хоча й більш стрімкий характер змін.

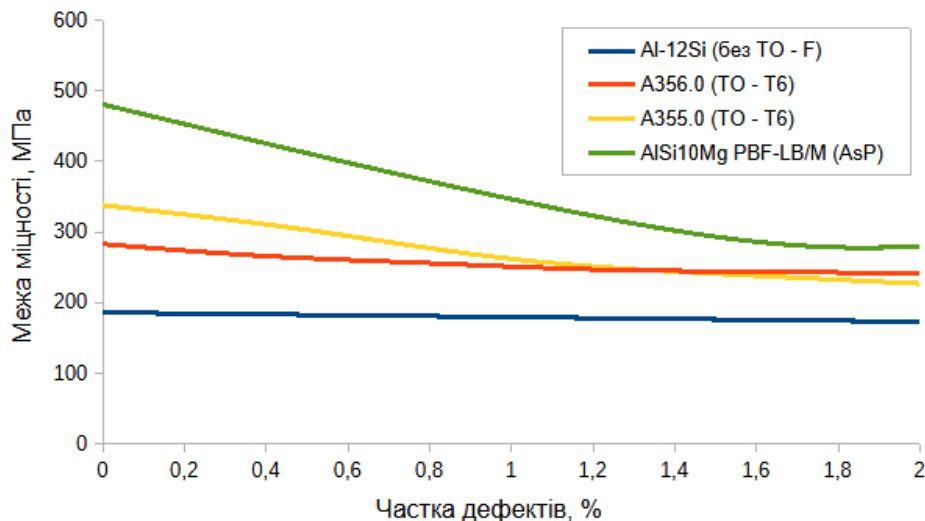


Рисунок 1 - Вплив дефектів будови на міцність силумінів [7, 8]

Дефекти здебільшого орієнтовані в горизонтальній площині побудови виробів [9]. Це впливатиме на процес руйнування при випробуваннях на квазістатичний розтяг, де для вертикальних зразків (0°) руйнування відбувається при дещо менших показниках міцності та пластичності, що пов'язано з початком зростанням дефектів з гострими краями та їх об'єднанням з дефектами сусідніх шарів побудови по висоті при менших рівнях деформації ніж для бездефектного виробу. Під час деформації горизонтальних зразків (90°) подібного злиття дефектів майже не відбувається, а початкова частка дефектів в площині перерізу менша, що сприяє підвищенню рівня механічних властивостей.

Отримані залежності впливу дефектів на властивості сплаву AlSi10Mg можуть бути описані в простій формі математичними виразами (2) і (3), що можуть бути уточненими проведенням експериментів з режимами технології.

$$\sigma = \sigma_0 \cdot (1 - \rho) \cdot m^S \quad (2)$$

$$\delta = \delta_0 \cdot (1 - \rho) \cdot n^S \quad (3)$$

σ і σ_0 – межа міцності з впливом та без впливу дефектів, МПа;

δ і δ_0 – відносне видовження з впливом та без впливу дефектів, %;

ρ – об'ємна частка дефектів у відносній формі;

m і n – коефіцієнти, що враховують чутливість характеристики до дефектів;

s – коефіцієнт, що враховує напрямок у якому визначається характеристика.

Висновки

1. Досліджено морфологію дефектів будови виробів за технологією PBF-LB/M та їх вплив на механічні властивості.

2. Залежність механічних властивостей від характеристик і об'єму дефектів викладена у формі математичних залежностей, які в перспективі можуть застосовуватись в моделюванні процесу.

ЛІТЕРАТУРА

1. VDI 3405 Blatt 2.1 Additive Fertigungsverfahren - Pulverbettbasiertes Schmelzen von Metall mittels Laserstrahl (PBF-LB/M) - Materialkenndatenblatt Aluminiumlegierung AlSi10Mg. -2020-08 – 7.
2. VDI 3405 Blatt 2.8 Additive Fertigungsverfahren - Pulverbettbasiertes Schmelzen von Metall mittels Laserstrahl (PBF-LB/M) - Fehlerkatalog - Fehlerbilder beim Laser-Strahlschmelzen -2022-12 – 64.
3. MSFC SPEC-3717 2017 SPECIFICATION FOR CONTROL AND QUALIFICATION OF LASER POWDER BED FUSION METALLURGICAL PROCESSES.
4. ASM Handbook®, Volume 24 - Additive Manufacturing Processes – Materials Park, Ohio: ASM International, 2020.
5. Полупан, А. С. Теоретичне визначення режимів селективного лазерного плавлення для виготовлення деталей з мінімальним рівнем пористості //Авіаційно-космічна техніка і технологія. –2022. – №2 – С. 38-46. DOI: 10.32620/aktt.2022.2.05
6. А.В. Давидюк, Н.Є. Калініна, С.О. Полішко. Вплив модифікування дисперсними наноконпозиціями на структуру та властивості ливарних силумінів. Вісник Харківського національного автомобільнодорожнього університету. 2023. № 103. С. 117 – 121. DOI: 10.30977/bul.2219-5548.2023.103.1.117
7. Aluminum alloy castings properties, processes and applications/John Gilbert Kaufman, Elwin L. Rooy - ASM International, Jan 1, 2004
8. Tomotake Hirata, Takahiro Kimura, Takayuki Nakamoto, Effect of Internal Pores on Fatigue Properties in Selective Laser Melted AlSi10Mg Alloy, MATERIALS TRANSACTIONS, 2022, Volume 63, Issue 7, Pages 1013-1020, Released on J-STAGE June 25, 2022, Online ISSN 1347-5320, Print ISSN 1345-9678, DOI: 10.2320/matertrans.MT-L2022005,
9. Wu, Z., Wu, S., Gao, X. et al. The role of internal defects on anisotropic tensile failure of L-PBF AlSi10Mg alloys. Sci Rep 13, 146 (2023). DOI: 10.1038/s41598-023-39948-z

INFLUENCE OF STRUCTURAL DEFECTS IN PRODUCTS MADE FROM ALSi10MG ALLOY BY PBF-LB/M ADDITIVE TECHNOLOGY ON THE FINAL MECHANICAL PROPERTIES

Serhii Bushtruk, Tetiana Myronova

Abstract. *The production of metal parts using PBF-LB/M technology, characterized by machine incremental fusion of volumes, leads to the formation of unique (atypical) structures and defects (voids) with a specific character of location, which impacts the final set of mechanical properties. Currently, standards do not regulate the control and permissible level of defects arising from this technology, but they are indirectly assessed through controlling mechanical properties, which have wide tolerance ranges. Investigating the influence of technology parameters on properties is more effective with a materials science-based approach that considers both the impact of structure and the presence of defects, as it simplifies calculations for modeling tasks. This paper suggests utilizing defect level characteristics and structure morphology to determine the mechanical properties of the AlSi10Mg alloy.*

Keywords: *laser-based powder bed fusion, silumin, defects in materials, norms and methods of control, strength, modeling of properties.*

REFERENCE

1. VDI 3405 Blatt 2.1 Additive Fertigungsverfahren - Pulverbettbasiertes Schmelzen von Metall mittels Laserstrahl (PBF-LB/M) - Materialkenndatenblatt Aluminiumlegierung AlSi10Mg. -2020-08 – 7.
2. VDI 3405 Blatt 2.8 Additive Fertigungsverfahren - Pulverbettbasiertes Schmelzen von Metall mittels Laserstrahl (PBF-LB/M) - Fehlerkatalog - Fehlerbilder beim Laser-Strahlschmelzen -2022-12 – 64.
3. MSFC SPEC-3717 2017 SPECIFICATION FOR CONTROL AND QUALIFICATION OF LASER POWDER BED FUSION METALLURGICAL PROCESSES.
4. ASM Handbook®, Volume 24 - Additive Manufacturing Processes – Materials Park, Ohio: ASM International, 2020.
5. Polupan, A. S. Teoretychne vyznachennia rezhymiv selektyvnoho lazernoho plavlennia dlia vyhotovlennia detalei z minimalnym rivnem porystosti //Aviatsiino-kosmichna tekhnika i tekhnolohiia. –2022. – №2 – С. 38-46. [in Ukrainian]. DOI: 10.32620/akt.2022.2.05
6. A.V. Davydiuk, N.Ie. Kalinina, S.O. Polishko. Vplyv modyfikuvannia dyspersnykh nanokompozytsiinykh na strukturu ta vlastyvoli lyvarnykh syluminiv // Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho avtomobilnodorozhnogo universytetu. 2023. № 103. S. 117 – 121. [in Ukrainian] DOI: 10.30977/bul.2219-5548.2023.103.1.117
7. Aluminum alloy castings properties, processes and applications/John Gilbert Kaufman, Elwin L. Rooy - ASM International, Jan 1, 2004
8. Tomotake Hirata, Takahiro Kimura, Takayuki Nakamoto, Effect of Internal Pores on Fatigue Properties in Selective Laser Melted AlSi10Mg Alloy, MATERIALS TRANSACTIONS, 2022, Volume 63, Issue 7, Pages 1013-1020, Released on J-STAGE June 25, 2022, Online ISSN 1347-5320, Print ISSN 1345-9678, DOI: 10.2320/matertrans.MT-L2022005,
9. Wu, Z., Wu, S., Gao, X. et al. The role of internal defects on anisotropic tensile failure of L-PBF AlSi10Mg alloys. Sci Rep 13, 146 (2023). DOI: 10.1038/s41598-023-39948-z

РОЛЬ САПР У РОЗРОБЦІ ІНЖЕНЕРНИХ РІШЕНЬ ДЛЯ МЕТАЛУРГІЙНОЇ ГАЛУЗІ

Гречаний О.М.¹, Васильченко Т.О.², Вернидуб М.В.³, Дерновий О.О.³

¹Запорізький національний університет, Ph.D., доцент, Україна

²Запорізький національний університет, канд. техн. наук, доцент, Україна

³Запорізький національний університет, магістрант, Україна

Анотація. В умовах жорсткої кадрової кризи в металургійній галузі гостро постає питання застосування передових програмних засобів для оптимізації та прискорення вирішення складних інженерних завдань. Системи автоматизованого проектування відіграють ключову роль у моделюванні, аналізі та оптимізації металургійних процесів, але залишається відкритим питання визначення найбільш раціонального продукту, який забезпечує принципи функціональності, вартості та продуктивності. Тому основне питання, яке розглядали автори, можливість розробки мультифізичного підходу, що поєднує в собі інтеграцію потужних програмних інструментів (ANSYS, AutoCAD, SolidWorks, MATLAB) для моделювання складних металургійних процесів з акцентом на механічний, термічний та структурний аналіз. Цей підхід дозволяє значно підвищити точність інженерних розрахунків, що має важливе значення для оптимізації технологічних ліній у металургії, зокрема, в контексті передових методів аналізу та вдосконалення методики проектування з урахуванням складних виробничих умов.

Ключові слова: автоматизоване проектування, комп'ютерне моделювання, інженерні розрахунки, технічні стандарти, аналіз даних

Вступ. Переважна частина як прокатного так і допоміжного обладнання металургійної галузі України розроблено та запущено в експлуатацію на початку XX століття [1-2]. Незважаючи на значні коефіцієнти запасу міцності з часом експлуатації та бурхливого розвитку технологічних аспектів в металургії виникли потреби не тільки в глибокій модернізації існуючого обладнання, а й в розробці принципово нових конструкцій [3-5]. Також у ситуації невизначеності, спричиненої воєнним станом, проведення реальних експериментів для перевірки або спростування різних аспектів технологічних процесів стає надзвичайно складним завданням. Тому дедалі більше значення набувають методи імітаційного моделювання та експериментів при розробці металургійного обладнання [6-7].

В зв'язку з цим постає закономірне питання системного аналізу та визначення найбільш оптимальних програмних продуктів систем автоматичного проектування (САПР), які б стали у нагоді конструкторам при проектуванні та удосконаленні не тільки основного та допоміжного обладнання, а й безпосередньо технологічних процесів.

Основний матеріал. У сучасних дослідженнях програмне забезпечення, таке як ANSYS, AutoCAD, SolidWorks і MATLAB, активно застосовується для моделювання та аналізу процесів у матеріалознавстві та металургії.

ANSYS використовується для чисельного моделювання технологічних процесів, зокрема прокатки алюмінієвих сплавів у рідкому азоті та асинхронної гарячої прокатки композитних матеріалів, а також для аналізу деформацій, температурних змін і напружень у матеріалах, що дозволяє отримати точні результати щодо механічних властивостей і структури матеріалів [8-10]. Це програмне забезпечення дає змогу враховувати не лише макроскопічні характеристики, а й мікроструктурні зміни, що є важливими для прогнозування поведінки матеріалів за різних умов.

AutoCAD є однією з найбільш поширених програм для створення і обробки графічних моделей, і його застосування охоплює широкий спектр галузей, від машинобудування та архітектури до адитивного виробництва і геології. Програма забезпечує високу точність і гнучкість в процесах проектування, що робить її корисною для численних наукових та інженерних задач. Важливою перевагою є здатність AutoCAD здійснювати точні вимірювання і створювати складні геометричні моделі, що дозволяє використовувати його для моделювання процесів в порошковій металургії, плануванні гірничо-металургійних робіт та прокатному виробництві, де точність відіграє критичну роль.

Одним з прикладів успішного застосування AutoCAD є використання його для вимірювання площі розведення та осадження порошку Ti-6Al-4V у процесі МРТААМ (адитивне виробництво). Відомо, що AutoCAD використовується для аналізу оптичних зображень зразків і вимірювання геометрії осадження, що є важливим для порівняння експериментальних даних з теоретичними

моделями і числовими симуляціями [11]. В іншому контексті, AutoCAD застосовується для створення 3D моделей геологічних об'єктів, таких як відкриті кар'єри, що дозволяє покращити планування видобутку корисних копалин і візуалізувати просторові зв'язки між геологічними шарами [12]. Крім того, AutoCAD широко використовують для моделювання решітчастих структур у адитивному виробництві, де висока точність є критично важливою для подальшої оптимізації та виготовлення таких структур [13]. Це підтверджує універсальність і ефективність програми в різних наукових і промислових сферах.

Позитивними рисами SolidWorks є висока точність моделювання складних геометрій, що забезпечує якісне і детальне відображення об'єктів. Програмне забезпечення також підтримує інтеграцію з іншими програмами для чисельного аналізу, такими як ANSYS, що розширює можливості інженерного аналізу [14]. Зокрема, SolidWorks є особливо корисним для створення моделей компонентів прокатних станів [15], сплавів та сталевих профілів [16], що значно підвищує ефективність цих процесів. Недоліком SolidWorks є його висока вартість ліцензії, що може бути суттєвим бар'єром для невеликих компаній, навчальних закладів або дослідницьких організацій, де бюджет може бути обмежений.

У сучасних наукових дослідженнях у галузі матеріалознавства, металургії та інженерії програмне забезпечення MATLAB активно використовується для обробки, моделювання та аналізу складних процесів, що включають механічні випробування, термічні процеси та дослідження мікроструктур матеріалів. Однією з основних сфер застосування MATLAB є обробка результатів експериментальних досліджень та моделювання фізичних процесів у різних галузях техніки. У рамках металографічних досліджень, MATLAB використовувався для розробки універсальної методики цифрового аналізу мікроструктур металів і сплавів. Алгоритми MATLAB застосовуються для обробки цифрових зображень мікроструктур, що дозволяє автоматизувати процес вимірювання геометричних параметрів структурних елементів, таких як ферит, перліт і мартенсит, а також для оцінки впливу цих параметрів на

механічні властивості матеріалу. У результаті MATLAB значно спрощує і прискорює процес аналізу, знижуючи ймовірність помилок, що можуть виникнути при ручному вимірюванні [17]. Серед недоліків використання MATLAB можна відзначити складну адаптації програми до конкретних завдань, що вимагає значних часових і ресурсних витрат на розробку спеціалізованого коду.

Висновки. Підсумовуючи все вищесказане можна відзначити, що програмне забезпечення ANSYS має високу точність моделювання та адаптивність до конкретних умов, проте потребує потужного обчислювального обладнання та висококваліфікованих кадрів. SolidWorks і AutoCAD надають ефективні інструменти для механічного проектування, а MATLAB підвищує точність прогнозування металургійних процесів та спрощує процес обробки результатів експериментальних даних. Тому для кожного конкретного проекту слід ретельно вибирати інструмент, спираючись на його особливості та вимоги.

ЛІТЕРАТУРА

1. Shapurov O. O. Research methods for production & business activity of machine-building enterprises. Actual Problems of Economics. 2009. No. 7. P. 168–174.
2. Shapurov O. O. State and trends of machine-building development. Actual Problems of Economics. 2009. No. 3. P. 57–63.
3. Strandless rolling based on four-high modules in stands of continuous section mills / I. Oginskiy et al. *Journal of Alloys and Metallurgical Systems*. 2025. Vol. 9. P. 100149. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jalmes.2024.100149>
4. Numerical analysis of the twin-roll casting of thin aluminium-steel clad strips / M. Stolbchenko et al. *Forschung im Ingenieurwesen*. 2014. Vol. 78, no. 3-4. P. 121–130. URL: <https://doi.org/10.1007/s10010-014-0182-x>
5. Experimental twin-roll casting equipment for production of thin strips / O.Y. Grydin, et al. *Metallurgical and Mining Industry*. 2010, 2(5), pp. 348–354
6. Мурашко В., Кулік Д., Гречаний О. М. Перспектива використання імітаційного моделювання при конструюванні металургійного обладнання. Збірник наукових праць студентів, аспірантів, докторантів і молодих вчених «Молода наука-2023» Запоріжжя: ЗНУ, 2023. Т. 5 С. 363-365.
7. Simulation modeling in the research of metallurgical equipment operation / O. M. Yhtchanyi et al. *System technologies*. 2024. Vol. 2, no. 151. P. 62–75. URL: <https://doi.org/10.34185/1562-9945-2-151-2024-06>
8. Finite element simulation of liquid nitrogen temperature rolling of marine grade aluminium alloy 5754 / A. R. Jagadish et al. *Materials Today: Proceedings*. 2022. URL: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.618>

9. Analysis of microstructure and properties evolution of asynchronous hot rolled stainless steel clad plate with interlayer / Y. Yi et al. *Materials Today Communications*. 2024. P. 111380. URL: <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2024.111380>
10. Deformation Uniformity of Cold-Rolled Q235 Steel Rebar by FEM in Bending and Rolling Processes / F.-l. Sui et al. *Journal of Iron and Steel Research International*. 2012. Vol. 19, no. 8. P. 37–42. URL: [https://doi.org/10.1016/s1006-706x\(12\)60137-x](https://doi.org/10.1016/s1006-706x(12)60137-x)
11. Sawant M. S., Jain N. K., Nikam S. H. Theoretical modeling and finite element simulation of dilution in micro-plasma transferred arc additive manufacturing of metallic materials. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2019. Vol. 164. P. 105166. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2019.105166>
12. Zhao H., Bai R., Liu G. 3D Modeling of Open Pit Based on AutoCAD and Application. *Procedia Earth and Planetary Science*. 2011. Vol. 3. P. 258–265. URL: <https://doi.org/10.1016/j.proeps.2011.09.092>
13. Additive manufacturing of metallic lattice structures: Unconstrained design, accurate fabrication, fascinated performances, and challenges. / Chen L.-Y., et al. *Materials Science and Engineering: R: Reports*. 2021. Vol. 146. P. 100648. URL: <https://doi.org/10.1016/j.mser.2021.100648>
14. Effect of copper on the mechanical properties of alloys formed by powder metallurgy. / Wong-Ángel W. D., et al. *Materials & Design*. 2014. Vol. 58. P. 12–18. URL: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.02.002>
15. Radionova L. V., Chernyshev A. D., Lisovskiy R. A. Interactive Educational System – Virtual Simulator "Sheet Rolling". *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 206. P. 512–518. URL: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.509>
16. Design of Steel Profiles with Similar Characteristics to the Aluminum Profiles Used in Solar Panels. / Calis E., et al. *IFAC-PapersOnLine*. 2024. Vol. 58, no. 3. P. 244–249. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2024.07.158>
17. Akhmetova G., Kudrya A., Panin E. Universal technique for information and digital analysis of steel and alloy structures using MATLAB. *MethodsX*. 2024. P. 103059. URL: <https://doi.org/10.1016/j.mex.2024.103059>

THE ROLE OF CAD IN THE DEVELOPMENT OF ENGINEERING SOLUTIONS FOR THE METALLURGICAL INDUSTRY

Hrechanyi Oleksii, Vasilchenko Tetyana, Vernydub Mykhailo, Dernovyi Oleksandr

Abstract. *In the conditions of a severe personnel crisis in the metallurgical industry, the issue of using advanced software tools to optimize and accelerate the solution of complex engineering tasks is acute. Computer-aided design systems play a key role in modeling, analysis and optimization of metallurgical processes, but the question of determining the most rational product that provides the principles of functionality, cost and productivity remains open. Therefore, the main issue considered by the authors is the possibility of developing a multi-physics approach that combines the integration of powerful software tools (ANSYS, AutoCAD, SolidWorks, MATLAB) for modeling complex metallurgical*

processes with an emphasis on mechanical, thermal and structural analysis. This approach allows you to significantly increase the accuracy of engineering calculations, which is important for optimizing technological lines in metallurgy, in particular, in the context of advanced analysis methods and improving design techniques taking into account complex production conditions.

Keywords: *computer-aided design, computer modeling, engineering calculations, technical standards, data analysis*

REFERENCE

1. Shapurov O. O. Research methods for production & business activity of machine-building enterprises. *Actual Problems of Economics*. 2009. No. 7. P. 168–174.
2. Shapurov O. O. State and trends of machine-building development. *Actual Problems of Economics*. 2009. No. 3. P. 57–63.
3. Strandless rolling based on four-high modules in stands of continuous section mills / I. Oginskiy et al. *Journal of Alloys and Metallurgical Systems*. 2025. Vol. 9. P. 100149. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jalmes.2024.100149>
4. Numerical analysis of the twin-roll casting of thin aluminium-steel clad strips / M. Stolbchenko et al. *Forschung im Ingenieurwesen*. 2014. Vol. 78, no. 3-4. P. 121–130. URL: <https://doi.org/10.1007/s10010-014-0182-x>
5. Experimental twin-roll casting equipment for production of thin strips / O.Y. Grydin, et al. *Metallurgical and Mining Industry*. 2010, 2(5), pp. 348–354
6. Murashko V., Kulik D., Hrechanyy O. M. Perspektyva vykorystannya imitatsiynoho modelyuvannya pry konstruyuvanni metalurhiynoho obladnannya. Zbirnyk naukovykh prats' studentiv, aspirantiv, doktorantiv i molodykh vchenykh «Moloda nauka-2023» Zaporizhzhia: ZNU, 2023. Vol. 5 C. 363-365. [in Ukrainian]
7. Simulation modeling in the research of metallurgical equipment operation / O. M. Yhtchanyi et al. *System technologies*. 2024. Vol. 2, no. 151. P. 62–75. URL: <https://doi.org/10.34185/1562-9945-2-151-2024-06>
8. Finite element simulation of liquid nitrogen temperature rolling of marine grade aluminium alloy 5754 / A. R. Jagadish et al. *Materials Today: Proceedings*. 2022. URL: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.618>
9. Analysis of microstructure and properties evolution of asynchronous hot rolled stainless steel clad plate with interlayer / Y. Yi et al. *Materials Today Communications*. 2024. P. 111380. URL: <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2024.111380>
10. Deformation Uniformity of Cold-Rolled Q235 Steel Rebar by FEM in Bending and Rolling Processes / F.-l. Sui et al. *Journal of Iron and Steel Research International*. 2012. Vol. 19, no. 8. P. 37–42. URL: [https://doi.org/10.1016/s1006-706x\(12\)60137-x](https://doi.org/10.1016/s1006-706x(12)60137-x)
11. Sawant M. S., Jain N. K., Nikam S. H. Theoretical modeling and finite element simulation of dilution in micro-plasma transferred arc additive manufacturing of metallic materials. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2019. Vol. 164. P. 105166. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2019.105166>

12. Zhao H., Bai R., Liu G. 3D Modeling of Open Pit Based on AutoCAD and Application. *Procedia Earth and Planetary Science*. 2011. Vol. 3. P. 258–265.
URL: <https://doi.org/10.1016/j.proeps.2011.09.092>
13. Additive manufacturing of metallic lattice structures: Unconstrained design, accurate fabrication, fascinated performances, and challenges. / Chen L.-Y., et al. *Materials Science and Engineering: R: Reports*. 2021. Vol. 146. P. 100648.
URL: <https://doi.org/10.1016/j.mser.2021.100648>
14. Effect of copper on the mechanical properties of alloys formed by powder metallurgy. / Wong-Ángel W. D., et al. *Materials & Design*. 2014. Vol. 58. P. 12–18.
URL: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.02.002>
15. Radionova L. V., Chernyshev A. D., Lisovskiy R. A. Interactive Educational System – Virtual Simulator "Sheet Rolling". *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 206. P. 512–518.
URL: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.509>
16. Design of Steel Profiles with Similar Characteristics to the Aluminum Profiles Used in Solar Panels. / Calis E., et al. *IFAC-PapersOnLine*. 2024. Vol. 58, no. 3. P. 244–249.
URL: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2024.07.158>
17. Akhmetova G., Kudrya A., Panin E. Universal technique for information and digital analysis of steel and alloy structures using MATLAB. *MethodsX*. 2024. P. 103059.
URL: <https://doi.org/10.1016/j.mex.2024.103059>

ОСОБЛИВОСТІ ТЕХНОЛОГІЇ ВИПЛАВКИ І РОЗКИСЛЕННЯ МАРГАНЦОВИСТОЇ СТАЛІ

Гречухин А.А.¹, Мянговська Я.В.², Камкіна Л.В.²

¹ УДУНТ ДМетІ, аспірант, Україна

² УДУНТ ДМетІ, проф., д.т.н., Україна

Анотація. Марганцовисту сталь можна класифікувати як сталь TRIP і сталь TWIP залежно від режиму механізмів деформації. TRIP-сталі можуть протистояти високим навантаженням без деформації, а TWIP-сталі легко деформуються за низьких навантажень і не руйнуються аж до ступеня загальної деформації 90%. Це означає, що сталь зберігає хорошу пластичність навіть після процесу глибокої витяжки.

Шлаковий режим процесу виплавки сталі істотно впливає на механічні властивості марганцовистої сталі, особливо на ударну в'язкість. Робота зі шлаком зводиться до отримання необхідної за технологічними інструкціями його основності та окисленості, а також концентрацій основних оксидів.

Відомо, що для отримання найбільш високих значень механічних властивостей сталі потрібно, щоб залишковий вміст алюмінію в металі не перевищував 0,04%. При введенні однакової кількості алюмінію для розкислення (1,2 кг на 1 т рідкого металу) концентрація алюмінію в металі варіюється від 0,01 % до 0,09 % через коливання окисленості металу. Зменшити окисленість металу можливо шляхом дифузійного розкислення шлаку відновлювального періоду.

Ключові слова: сталь, марганець, технологія виплавки, режим розкислення.

Сталь Гадфільда є незамінним матеріалом для деталей, працюючих на знос і удар одночасно. Зі сталі 110Г13Л виготовляють черпаки екскаваторів, деталі каменедробарок, траки гусениць тракторів, танків, трамвайні хрестовини, хрестовини стрілочних переводів, які є основними елементами конструкції залізничних шляхів, а також віконні решітки в тюрмах, які неможливо перепилати. У цих деталях тертя супроводжується ударами та великими тисками. Сталь високо марганцовиста марки 110Г13Л це ливарна сталь аустенітного класу із вмістом вуглецю 1,1%, легована марганцем.

Таблиця 1

Хімічний склад сталі 110Г13Л, % (ДСТ 977-88)

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr
0,9 – 1,5	0,3 – 1	11,5 – 15	до 1	до 0,05	до 0,12	до 1

Марганець є незамінним легуючим елементом у сталі, завдяки його здатності значно покращувати міцність і в'язкість сталі за допомогою механізмів зміцнення твердим розчином і дисперсійного зміцнення [1]. Марганцовисту сталь можна класифікувати як сталь TRIP і сталь TWIP залежно від режиму механізмів деформації. TRIP-сталі можуть протистояти високим навантаженням без деформації, а TWIP-сталі легко деформуються за низьких навантажень і не руйнуються аж до ступеня загальної деформації 90%. Це означає, що сталь зберігає хорошу пластичність навіть після процесу глибокої витяжки. Мікроструктура сталі TRIP складається із залишкового аустеніту (понад 5%), а також мартенситних, феритових і бейнітних структур, присутніх у різних кількостях. Міцність сталі TRIP зумовлена наявністю бейніту та мартенситу [2].

Металошихту для виплавки сталі марки 110Г13Л складають із 20–30% дрібного брухту, 20–30% великого, 40–60% середнього. На дно завантажувальної корзини поміщають дрібний брухт, потім важкий і середній, а нагору – дрібний брухт і чавун. Відходи електродів, кокс завантажують на подіну печі перед завалкою [3]. Шихту для виплавки сталі методом окислення підбирають таким чином, щоб вміст вуглецю по розплавленню був вищим за верхню межу на 0,3...0,15%. Вапно присаджують перед завалкою шихти в піч у кількості 2...3% від маси завалки. Після закінчення завалки проводять розплавлення шихти. Спочатку розплавлення ведуть на середньому ступені напруги. Коли під електродами утворюються колодязі, трансформатор перемикається на максимально допустиму потужність (2-3 ступені). Після повного розплавлення відбирають пробу металу для визначення хімічного складу розплаву та пробу шлаку для визначення основності та вмісту в ньому оксидів марганцю та заліза.

Далі проводять рудне кипіння металу, при якому частково знижуються концентрації вуглецю та фосфору в розплаві. Для цього в піч подають

окислювач – окалину або агломерат у два-три прийоми з розрахунку 13...20 кг на тонну шихти. На кожні 10 кг окислювача вводять 5 кг вапна. Рідкорухливий шлак, що утворюється, скачують і наводять новий протягом усього рудного періоду. Через 15 хв після початку рудного кипіння з інтервалом 10 хв відбирають проби металу для визначення його хімічного складу та розрахунку швидкості вигорання вуглецю та дефосфорації. При досягненні концентрації вуглецю вище за верхню межу на 0,05 % припиняють подачу окислювача в піч.

Після закінчення рудного кипіння шлак скачують повністю та починають період чистого кипіння. Новий шлак наводять шляхом присадок вапна та плавикового шпату у співвідношенні 4:1 з розрахунку отримання 2-3% шлаку від маси металу та основності не менше 2,0, інакше застосовують заходи щодо його коригування.

Завданням періоду чистого кипіння є отримання необхідного вмісту вуглецю в металі, видалення неметалевих включень та газів. Протягом усього періоду відбирають проби металу та шлаку для контролю вмісту вуглецю та марганцю в металі.

Наступним технологічним етапом є розкислення металу та шлаку. Спочатку у ванну вводять 50-60% розрахункової кількості феромарганцю, далі феросилікоалюміній з розрахунку введення 0,2-0,3 кг кремнію на тонну металу і через 5-7 хв подають феросиліцій ФС45 або ФС65 з розрахунку отримання заданої кількості згідно з маркою. Потім через 5-7 хв вводять кількість феромарганцю, що залишилася. Якщо концентрація кремнію в металі знаходиться нижче допустимої, то феросиліцій вводять безпосередньо в ківш.

Обробку пічного шлаку проводять розкислювальною сумішшю, що складається з вапна, феросилікоалюмінію або феросиліцію, коксу меленого, плавикового шпату. Додатково шлак розкислюють гранульованим алюмінієм, січкою або іншими алюмінієвими матеріалами.

Закінчивши виплавку, відбирають пробу розплаву для визначення його хімічного складу, після чого здійснюють або коригування, або випуск металу. У процесі випуску розплаву в його струмінь подають алюміній із розрахунку

0,8–1,2 кг/т сталі. Після наповнення ковша відбирають пробу для визначення хімічного складу виплавленого металу.

Шлаковий режим процесу виплавки сталі істотно впливає на механічні властивості марганцовистої сталі, особливо на ударну в'язкість. Робота зі шлаком зводиться до отримання необхідної за технологічними інструкціями його основності та окисленості, а також концентрацій основних оксидів. Вміст у шлаку оксидів заліза і марганцю у відновлювальний період плавки впливає на окисленість металу, яку необхідно знати для визначення достатньої кількості алюмінію, що вводиться в сталь для її глибокого розкислення, а також для прогнозування кількості добавок, що легують і модифікують.

Контроль за високим виходом і вузьким складом марганцю в процесі плавки відіграє важливу роль у кінцевій якості сталі та вартості сировини. Рівняння, за яким можна визначити вміст марганцю в металі, знаючи активність кисню в металі і склад кінцевого шлаку по оксидам заліза і марганцю:

$$[Mn] = \frac{(MnO) + (FeO)}{706,8 \cdot a_{[O]}} - 0,256, \quad (1)$$

де $[Mn]$ – концентрація марганцю в металі, %; (MnO) , (FeO) – вміст оксидів марганцю та заліза в шлаку, %; $a_{[O]}$ – активність кисню в рідкій сталі.

Реакції розкислення можна описати за допомогою константи рівноваги розкислення. За допомогою рівноважних розрахунків ми можемо знайти найнижчий або мінімальний рівень кисню, який можна досягти при певному складі сталі. Звичайно, це важливо знати як початкову точку та як крайню межу для операції розкислення. Рушійна сила реакції розкислення залежить від перенасичення, яке можна описати фактичними та рівноважними продуктами розчинності, наприклад, для розкислення Al:

$$\Pi = \frac{a_{Al}^2 \cdot a_{\text{факт.}}^3}{a_{Al}^2 \cdot a_{\text{рівн.}}^3}. \quad (2)$$

Тоді ми також можемо написати:

$$\Delta G_v = -\frac{RT}{V_m} \ln \Pi, \quad (3)$$

де Π – коефіцієнт пересичення, а V_m – молярний об'єм, м³/моль.

Рівняння показують, що, головним чином, сильний розкислювач з низькою поверхневою енергією утвореного оксиду до розплаву призведе до

легшого зародження оксидного включення, а ядра матимуть менший розмір, ніж якщо слабкий розкислювач утворює незмочуваний оксид.

У таблиці 2 наведено зібрані для вуглецевої сталі дані щодо коефіцієнтів взаємодії для елементів її складу при 1600°C [6].

Таблиця 2

Коефіцієнти взаємодії елементів вуглецевої сталі при 1600°C

Елемент	Al	C	Mn	P	S	Si	Ti	H	N	O
Вміст елемента, %		0,05	0,45	0,02	0,01	0,3	0,05			
f_i	1,05	1,06	1,0	1,1	1,0	1,15	0,93	1,0	0,97	0,85
a_i		0,053	0,45	0,022	0,01	0,345	0,046			

Відомо, що для отримання найбільш високих значень механічних властивостей сталі потрібно, щоб залишковий вміст алюмінію в металі не перевищував 0,04% [4]. Проаналізувавши паспорти плавок марганцовистої сталі в 25-т дуговій сталеплавильній печі за два роки, встановили, що при введенні однакової кількості алюмінію для розкислення (1,2 кг на 1 т рідкого металу) концентрація алюмінію в металі варіюється від 0,01 % до 0,09 % через коливання окисленості металу. Зменшити окисленість металу можливо шляхом дифузійного розкислення шлаку відновлювального періоду [5, 6].

Загально прийнято, що первинні реакції розкислення протікають швидко в рідкій сталі і за лічені секунди утворюються крихітні зародки оксиду. У макрообсягу промислового ковша важливим фактором є те, наскільки швидко доданий розкислювач розчиняється та рівномірно розподіляється в масі розплаву. Це залежить як від доданого матеріалу (теплоємності, розміру, форми та точки плавлення, пов'язані з температурою навколишнього середовища), так і від умов перемішування в навколишньому розплаві сталі.

Загальний хід розкислення представлений на рисунку 1 [7]. Відповідно, розчинений кисень швидко зменшується внаслідок реакції розкислення та зародження включень. Тривалість цього періоду залежить від часу додавання розкислювача, який необхідно розчинити та розподілити по всьому розплаву сталі. При обробці в ковші реакції далі протікають за рахунок зниження

температури і, згодом, доданих розкислювачів. Під час лиття сталь твердне, а залишок кисню зв'язується в оксиди. З іншого боку, кількість оксидів і, отже, загальний вміст кисню змінюються набагато повільніше, і невелика частка залишиться до розливання. І вже при розливанні та затвердінні сталі залишковий розчинений кисень більше не може залишатися вільним і утворює «третинні» оксиди.

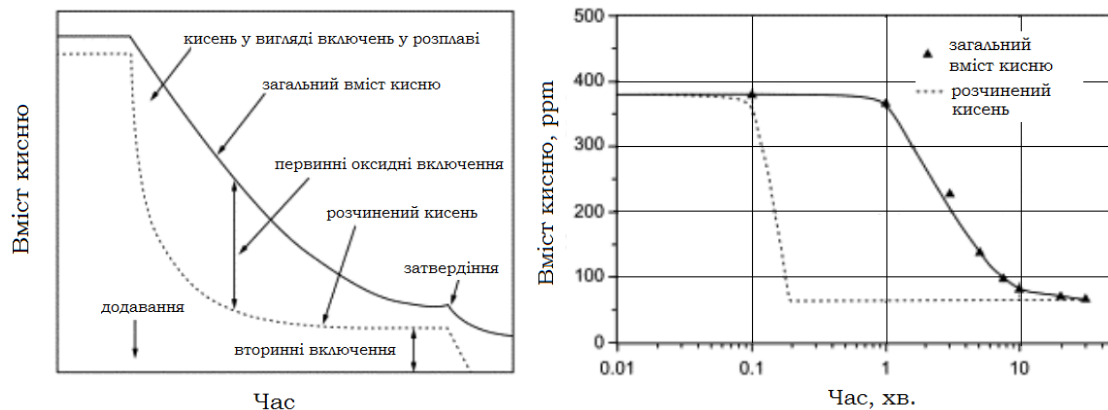


Рисунок 1 - Зміна кисню під час процесу розкислення

Таким чином, чистота сталі повинна бути дуже високою, а включення, що неминуче зустрічаються в сталі, повинні бути нешкідливими [8-10]. Це означає строгий контроль розміру, кількості та складу включень, переслідуючи деформовані включення в умовах прокатки. Первинні включення утворюються під час обробки сталі у ковші. Більшість їх видаляються в шлак ковша чи футеровку. Однак інші включення все ще залишаються на наступних етапах процесу, а деякі нові включення утворюються під час лиття та затвердіння. Традиційно деформовані включення виробляються шляхом розкислення Si-Mn, що призводить до включень характерних для системи MnO-SiO₂-Al₂O₃. Однак це залишає вміст кисню надто високим для складних умов застосування. Щоб отримати справді чисту сталь, необхідно посилити розкислення кремнієм шляхом зниження активності утворення SiO₂ в сталі. Це можна зробити, привівши сталь у тісний контакт зі шлаком, що містить SiO₂-MnO-Al₂O₃ і додатково CaO і деяку кількість MgO. За допомогою такого роду посиленого розкислення кремнієм можна отримати сталь з низьким вмістом кисню, що має включення, які подовжуватимуться при прокатці.

Висновки

1. Марганцовисту ливарну сталь аустенітного класу марки 110Г13Л виплавляють на заводах України за класичною технологією на шихті з металобрухту, чавуну, вуглецьвмісних відновників, вапна у ДСП. Для розкислення металу в ванну печі вводять половину розрахункової кількості феромарганцю, феросилікоалюміній і феросиліцій, потім другу частину феромарганцю. У процесі випуску металу з печі в його струмінь подають алюміній. Контроль за високим виходом і вузьким складом марганцю в процесі плавки відіграє важливу роль у кінцевій якості сталі.

2. Отримано рівняння для прогнозування вмісту марганцю в металі в залежності від активності кисню в металі і складу кінцевого шлаку.

3. Встановлено, що окисленість металу впливає на вміст алюмінію в ньому, але для отримання марганцовистої сталі високої якості по механічним властивостям необхідно, щоб залишковий вміст алюмінію в металі не перевищував 0,04%. Це вимагає проведення обов'язкового ретельного контролю окисленості металу по ходу виплавки у ДСП і при необхідності зменшення його окисленості шляхом дифузійного розкислення шлаку у відновлювальний період плавки.

ЛІТЕРАТУРА

1. Jacob R., Sankaranarayanan S.R., Babu S.P.K. Recent advancements in manganese steels. - A review. // Materials Today: Proceedings. - Volume 27. - Part 3. - 2020, 27, - P. 2852–2858. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.01.296>
2. Effect of micro-alloy elements on dynamic recrystallization behavior of a high-manganese steel. / Ezatpour H., Torabi-Parizi M., Ebrahimi G.R., Momeni A. // Steel Research. – 2018 – Volume 89. – Issue 7. DOI:10.1002/srin.201700559
3. Металургія високомарганцевої сталі / М.І. Гасік, Ю.Н. Петров, І.А. Семенов та ін. - Київ: Техніка, 1990. - 136 с.
4. Wilson F.G., Gladman T. Aluminium nitride in steel // Int. Mater. Rev., 1988, 33, (5), 221–286. <https://doi.org/10.1179/imr.1988.33.1.221>
5. Metal oxide reduction from electric arc furnace slag. In book: Berliner Konferenz Mineralische Nebenprodukte und Abfälle, 2019 : [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.researchgate.net/publication/334173653_Metal_oxide_reduction_from_electric_arc_furnace_slag.

6. Singh R. Chapter 5 - Production of Steel. Applied Welding Engineering. Processes, Codes, and Standards, 2012. - Pages 33-50. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-391916-8.00005-4>
7. Lauri Holappa. Chapter 1.6 - Secondary Steelmaking. Treatise on Process Metallurgy. Volume 3: Industrial Processes, 2014. - Pages 301-345. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-096988-6.00012-2>
8. Particles Precipitation in Ti- and Al-Deoxidized Hadfield Steels. March 2016. Steel Research International 87(10):n/a-n/a. D. Siafakas, T. Matsushita, Å. Lauenstein, Sven Ekerot, A. E. W. Jarfors. <https://doi.org/10.1002/srin.201500400>
9. International Journal of Cast Metals Research. Volume 31, 2018 - Issue 3. A particle population analysis in Ti- and Al- deoxidized Hadfield steels. Dimitrios Siafakas, Taishi Matsushita, Åsa Lauenstein, Sven Ekerot, Anders E. W. Jarfors. Pages 125-134. <https://doi.org/10.1080/13640461.2017.1379262>
10. Effects of deoxidation methods on the inclusion characteristics and corrosion behaviour of high-strength low-alloy steels in marine environments. / Zhihui Wang, Xian Zhang, Jingjing Peng, Lin Cheng, Jing Liu, Kaiming Wu // Journal of Materials Research and Technology. – Vol. 30. - 2024. - Pages 8451-8468. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.05.198>

FEATURES OF THE TECHNOLOGY OF MELTING AND DEOXIDATION OF MANGANESE STEEL

Hrechukhyn A., Mianovska Y., Kamkina L.

Abstract. *Manganese steel can be classified as TRIP steel and TWIP steel depending on the mode of deformation mechanisms. TRIP steels can withstand high loads without deformation, while TWIP steels deform easily under low loads and do not break up to a total deformation of 90%. This means that the steel retains good ductility even after the deep drawing process.*

The slag regime of the steelmaking process significantly affects the mechanical properties of manganese steel, especially the impact toughness. Working with slag is reduced to obtaining its basicity and oxidation, as well as the concentrations of basic oxides, required by the technological instructions.

It is known that to obtain the highest values of mechanical properties of steel, it is necessary that the residual aluminum content in the metal does not exceed 0,04%. When introducing the same amount of aluminum for deoxidation (1.2 kg per 1 ton of liquid metal), the concentration of aluminum in the metal varies from 0,01% to 0,09% due to fluctuations in the oxidation of the metal. It is possible to reduce the oxidation of the metal by diffusion deoxidation of the slag of the reduction period.

Keywords: *steel, manganese, smelting technology, deoxidation mode.*

REFERENCE

1. Jacob R., Sankaranarayanan S.R., Babu S.P.K. Recent advancements in manganese steels. - A review. // Materials Today: Proceedings. - Volume 27. - Part 3. - 2020, 27, - P. 2852–2858. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.01.296>
2. Effect of micro-alloy elements on dynamic recrystallization behavior of a high-manganese steel. / Ezatpour H., Torabi-Parizi M., Ebrahimi G.R., Momeni A. // Steel Research. – 2018 – Volume 89. – Issue 7. DOI:10.1002/srin.201700559
3. Metallurgy of high-manganese steel / M.I. Gasik, Y.N. Petrov, I.A. Semenov and others. - Kyiv: Technika, 1990. - 136 p. [in Ukrainian].
4. Wilson F.G., Gladman T. Aluminium nitride in steel // Int. Mater. Rev., 1988, 33, (5), 221–286. <https://doi.org/10.1179/imr.1988.33.1.221>
5. Metal oxide reduction from electric arc furnace slag. In book: Berliner Konferenz Mineralische Nebenprodukte und Abfälle, 2019 : [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/334173653_Metal_oxide_reduction_from_electric_arc_furnace_slag.
6. Singh R. Chapter 5 - Production of Steel. Applied Welding Engineering. Processes, Codes, and Standards, 2012. - Pages 33-50. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-391916-8.00005-4>
7. Lauri Holappa. Chapter 1.6 - Secondary Steelmaking. Treatise on Process Metallurgy. Volume 3: Industrial Processes, 2014. - Pages 301-345. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-096988-6.00012-2>
8. Particles Precipitation in Ti- and Al-Deoxidized Hadfield Steels. March 2016. Steel Research International 87(10):n/a-n/a. D. Siafakas, T. Matsushita, Å. Lauenstein, Sven Ekerot, A. E. W. Jarfors. <https://doi.org/10.1002/srin.201500400>
9. International Journal of Cast Metals Research. Volume 31, 2018 - Issue 3. A particle population analysis in Ti- and Al- deoxidized Hadfield steels. Dimitrios Siafakas, Taishi Matsushita, Åsa Lauenstein, Sven Ekerot, Anders E. W. Jarfors. Pages 125-134. <https://doi.org/10.1080/13640461.2017.1379262>
10. Effects of deoxidation methods on the inclusion characteristics and corrosion behaviour of high-strength low-alloy steels in marine environments. / Zhihui Wang, Xian Zhang, Jingjing Peng, Lin Cheng, Jing Liu, Kaiming Wu // Journal of Materials Research and Technology. – Vol. 30. - 2024. - Pages 8451-8468. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.05.198>

СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ ІНВАРІАНТНОСТІ СЕПАРАТНИХ КОНТУРІВ КЕРУВАННЯ ШВИДКІСНИМ РЕЖИМОМ ПРОКАТКИ З ПЕТЛЕЮ НА НЕПЕРЕРВНИХ ДРІБНОСОРТНИХ СТАНАХ

Егоров О. П.¹, Михайловський М. В.¹, Рибальченко М. О.¹

¹ Український державний університет науки і технологій, к. т. н., доцент, Україна

Анотація. Стан прокату в міжклітинних проміжках неперервних дрібносортних станів визначається різницею швидкостей прокату на виході з попередньої та на вході в наступну кліть. Зміна швидкості прокатки в будь-якій кліті проміжку, що виникає під дією технологічних збурень, призводить до відхилення від початкового режиму прокатки в цьому проміжку. Усунення такого відхилення досягається цілеспрямованою корекцією частоти обертання валків однієї з клітей. Однак, при цьому порушується швидкісний режим у сусідньому по ходу прокатки міжклітинному проміжку, що приводить в дію контур регулювання натягу в ньому, а потім і наступних проміжках, що може дестабілізувати роботу всього стану. Для вирішення цієї проблеми необхідно при зміні частоти обертання валків однієї з клітей неперервної групи, одночасно узгоджено змінювати частоту обертання валків всіх наступних (по ходу прокатки) або всіх попередніх (проти ходу прокатки) клітей. Комп'ютерне моделювання функціонування системи керування швидкісним режимом прокатки з петлею підтвердило ефективність запропонованого методу, заснованого на системному аналізі інваріантності роботи сепаратних контурів стабілізації положення петлі прокату.

Ключові слова: неперервний дрібносортний стан, швидкісний режим, прокатка з петлею, сепаратні контури керування.

Вступ. Прокатку на неперервних дрібносортних станах ведуть з натягом, прогином і петлею прокату в міжклітинних проміжках [1]. Заданий режим забезпечується керуванням частотою обертання валків клітей проти або за напрямком прокатки. Система керування швидкісним режимом прокатки є багатозв'язаною, оскільки кожен сепаратний контур пов'язаний з іншим через частоти обертання валків суміжних клітей і швидкості розкату у цих проміжках. Швидкість розкату на виході з валків попередньої кліті та на вході в наступну кліть залежить від таких технологічних факторів як випередження та коефіцієнт витяжки розкату. Ці параметри змінюються по довжині розкату немонотонно [2].

Основна частина. Для забезпечення інваріантності сепаратних контурів керування (наприклад, положенням петлі) необхідно передавати керуючий вплив на корекцію частот обертання групи клітей з урахуванням коефіцієнта витяжки розкату в кожній кліті.

Для реалізації цього алгоритму розроблено систему керування швидкісним режимом прокатки, зображену на рис.1

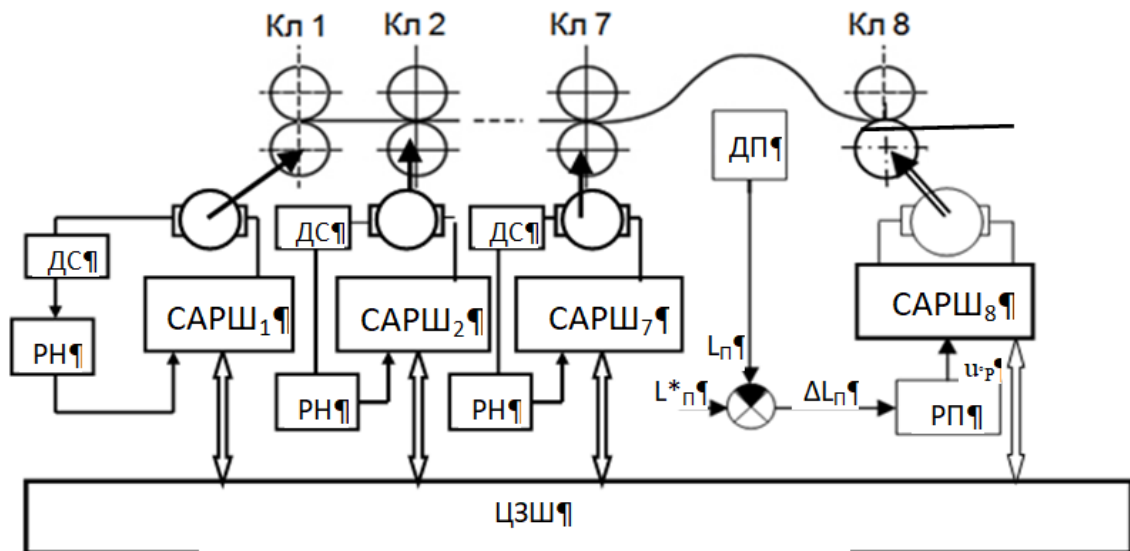


Рисунок 1 – Система керування швидкісним режимом прокатки

Тут, за результатами вимірювання датчиками ДС якірних струмів ланцюгів двигунів приводів валків клітей в чорновій групі, за допомогою регуляторів натягу РН і систем автоматичного регулювання швидкості САРС валків клітей здійснюється налаштування режиму натягу прокату при заході його передньої ділянки. У чистовій групі клітей за допомогою керуючого впливу u_p , що виробляється регулятором РП, здійснюється зміна величини петлі прокату L_n , яка вимірюється датчиком петлі ДП.

Усі системи працюють незалежно завдяки системі цифрового завдання швидкостей ЦЗШ, при цьому зміна частоти обертання валків відбувається за збереження співвідношення частот обертання валків суміжних клітей.

Непряму оцінку зміни коефіцієнта витяжки прокату отримаємо, виразивши швидкість розкату через частоту обертання приводів, робочі радіуси та випередження:

$$\Delta \ell_i = \int_0^t \left(\omega_i R_i (1 + S_i) - \frac{\omega_{i+1} R_{i+1} (1 + S_{i+1})}{\lambda_{i+1}} \right) dt, \quad (1)$$

де R_i, R_{i+1} – робочі радіуси i -тої та $(i+1)$ -тої клітей; S_i, S_{i+1} – випередження в i -тій та $(i+1)$ -тій клітях; ω_i, ω_{i+1} – частота обертання приводів i -тої та $(i+1)$ -тої клітей; λ_{i+1} – коефіцієнт витяжки розкату в $(i+1)$ -тій кліті, що визначається як

$$\lambda_{i+1} = \frac{\omega_{i+1} R_{i+1} (1 + S_{i+1})}{\omega_i R_i (1 + S_i) - \frac{d\Delta l_i}{dt}}. \quad (2)$$

При розгоні та гальмуванні головних приводів валків кліті може виявитися, що в процесі керування величина струму якоря у будь-якому двигуні перевищить максимально допустиме значення. Це призводить до різного темпу розгону та гальмування двигунів приводів валків клітей та неузгодженості швидкісного режиму прокатки в сепаратних контурах керування. У цьому випадку за допомогою логічних схем вимикається завдання величини струму якоря та підключається мінімальний темп наростання цієї величини. Якщо, навпаки, величина струму досягне свого мінімуму, підключається максимально можливий темп зміни сигналу завдання. Це відбувається доти, поки величина струму якоря не повернеться в задані межі.

Висновки. Комп'ютерне моделювання швидкісного режиму прокатки з петлею на неперервному дрібносортному стані підтвердило ефективність запропонованого методу, заснованого на системному аналізі інваріантності роботи сепаратних контурів керування, що істотно підвищує якість роботи кожного контуру стабілізації технологічного режиму прокатки.

ЛІТЕРАТУРА

1. Підвищення енергоефективності електромеханічного комплексу виробництва сортового прокату: звіт з НДР / Керівник Єгоров О. П. № 0113U003260с. Дніпропетровськ: Національна металургійна академія України, 2014. 151 с.
2. Автоматизация технологических процессов на мелкосортных прокатных станах: монография / А. С. Бешта, В. Н. Куваев, О. Е. Потап, А. П. Егоров. Днепропетровск: Журфонд, 2014. 283 с.

SYSTEMATIC ANALYSIS OF INVARIANCE OF SEPARATE CONTROL CUTS OF HIGH-SPEED ROLLING WITH A LOOP ON CONTINUOUS SMALL SECTION MILL

Yegorov O. P., Mykhailovsky M. V., Rybalchenko M. O.

Abstract. *The condition of the rolled products in the interstand gaps of continuous small-section mills is determined by the difference in rolling speeds at the exit from the previous stand and at the entrance to the next stand. A change in the rolling speed in any of the stands in the gap, arising under the action of process disturbances, leads to a deviation from the initial rolling mode in this gap. Elimination of such a deviation is achieved by targeted correction of the roll speed of one of the stands. However, this disrupts the speed mode in the adjacent interstand gap along the rolling direction, which activates the tension control circuit in it, and then in the subsequent gaps, which can destabilize the operation of the entire mill. To solve this problem, when changing the roll speed of one of the stands of the continuous group, it is necessary to simultaneously change the roll speed of all subsequent (along the rolling direction) or all previous (counter-rolling direction) stands in a coordinated manner. Computer modeling of the operation of the control system for the rolling speed mode with a loop confirmed the effectiveness of the proposed method based on the system analysis of an operation invariance of separate loop stabilization circuits.*

Keywords: *continuous small-section mill, speed mode, rolling with a loop, separate control circuits.*

REFERENCE

1. Pidvyshchennia enerhoefektyvnosti elektromekhanichnoho kompleksu vyrobnytstva sortovoho prokatu: zvit z NDR / Kerivnyk Yehorov O. P. № 0113U003260s. Dnipropetrovsk: Natsionalna metalurhiina akademiia Ukrainy, 2014. 151 s.
2. Avtomatyzatsyia tekhnolohycheskykh protsessov na melkosortnykh prokatnykh stanakh: monohrafiya / A. S. Beshta, V. N. Kuvaev, O. E. Potap, A. P. Yehorov. Dnepropetrovsk: Zhurfond, 2014. 283 s.

ЗНАЧЕННЯ ЯКОСТІ КОКСУ В ЕЛЕКТРИЧНІЙ ПЕЧІ З ЗАНУРЕНОЮ ДУГОЮ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА ФЕРОСПЛАВІВ

Ісаєв А.С.¹, Крамар І.А.¹, Мянговська Я.В.², Камкіна Л.В.²

¹УДУНТ ДМетІ, аспірант Україна

²УДУНТ ДМетІ, проф., д.т.н., Україна

Анотація. При виробництві феросплавів в умовах виробництва треба мінімізувати питомі витрати електричної енергії. Її споживання залежить головним чином від реакцій, що відбуваються в зоні попереднього відновлення, тоді як стабільна робота визначається розміром коксового шару та хімічними реакціями, що там відбуваються. Схематично можна розділити піч на чотири зони та представити основні хімічні реакції, які там відбуваються.

Гетерогенні (газ-тверді) реакції, що відбуваються в зоні попереднього відновлення печі, мають великий вплив на загальне споживання коксу та електроенергії при виробництві марганцевих сплавів. Відновлення Mn_3O_4 до MnO може відбуватися паралельно з реакцією Будуара, тоді як відновлення MnO_2 до Mn_3O_4 відбувається при температурах нижче порогу газифікації коксу.

Реакційна здатність коксу є дуже важливим критерієм для вибору відновника для використання в електропечі для виробництва феросплавів, оскільки вона впливає на питому кількість вуглецю та енергоємність процесу. Найпоширенішим тестом у промисловій практиці є японський тест під назвою CRI/CSR (індекс реактивності коксу та міцність коксу після реакції). Внутрішні властивості вуглецевого матеріалу мають великий вплив на реакційну здатність.

Ключові слова: рудовідновлювальна піч, кокс, будова печі, зони печі, реакційна здатність коксу.

Металургійний кокс відіграє три дуже важливі ролі в електропечі: як відновник, він забезпечує вуглець для відновлення оксидів металів, присутніх у шихті; створює коксовий шар – це шлях, де проходить електричний струм, і значна частина енергії, необхідної для хімічних реакцій і процесу синтезу шихти, виробляється завдяки ефекту Джоуля; єдиний матеріал, який залишається в твердому стані по всій висоті печі, він сприяє проникності шихти.

При виробництві феросплавів в умовах виробництва треба мінімізувати питомі витрати електричної енергії. Її споживання залежить головним чином від реакцій, що відбуваються в зоні попереднього відновлення (зони 1, 2 і 3 на

рис. 1), тоді як стабільна робота визначається розміром коксового шару та хімічними реакціями, що там відбуваються. На основі даних наведених в [1], ми можемо розділити піч на чотири зони та схематично представити основні хімічні реакції, які там відбуваються, як показано на рисунку 1. Різні зони визначаються як:

- зона 1: відбувається сушіння завантаженої шихти, у цій області також відбувається низькотемпературне відновлення MnO_2 ;

- зона 2: відбувається частина непрямого відновлення вищих оксидів марганцю до MnO ;

- зона 3: непряме відновлення оксидів марганцю відбувається одночасно з реакцією Будуара; можливе повне відновлення оксидів заліза в твердому стані, відбувається розкладання доломіту;

- зона 4: MnO розчиняється в рідкому шлаку та частково відновлюється до рідкого Mn ; невелика кількість кремнезему відновлюється, а частина вуглецю з коксу також розчиняється в рідкому металі.

Існування зони попереднього відновлення та коксового шару було відзначено під час розкопок феромарганцевої електричної печі відновлення потужністю 75 МВт [2]. Схематично це наведено на рисунку 1. Коксове ліжко відповідає зоні 4, в якій відбуваються хімічні реакції прямого відновлення оксидів, в зонах 5 та 6 руда та флюси знаходяться в рідкому стані, змішані з коксом. Очевидно, що межі між різними зонами досить нечіткі.

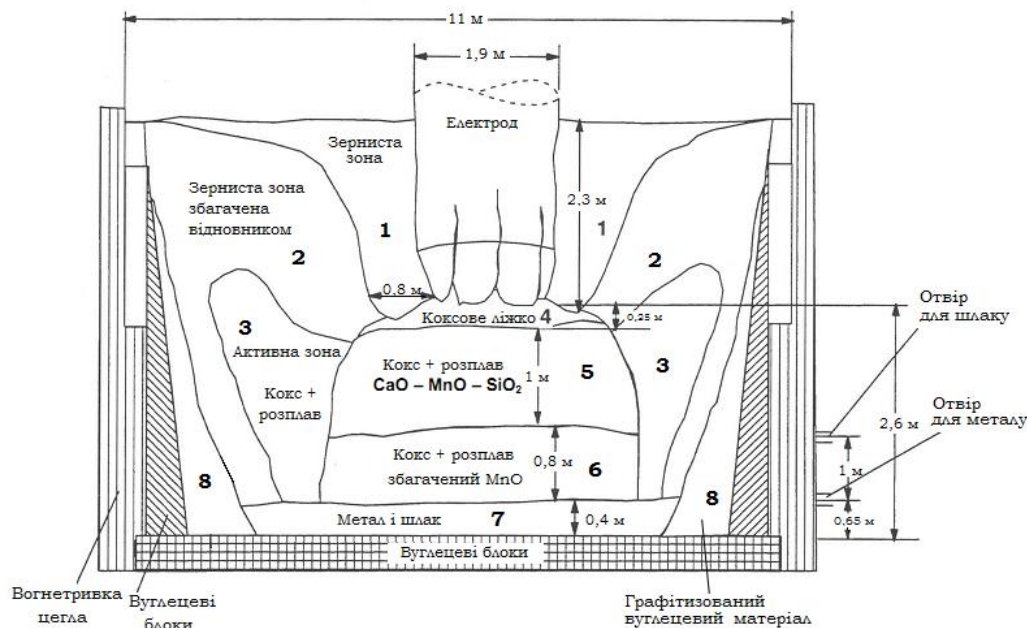
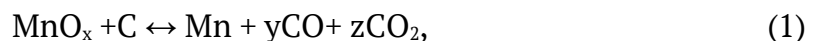


Рисунок 1 - Зони (ділянки) навколо електрода рудовідновної електричної печі для виробництва феромарганцю потужністю 75 МВт [2]

За даними [3], гетерогенні (газ-тверді) реакції, що відбуваються в зоні попереднього відновлення печі, мають великий вплив на загальне споживання коксу та електроенергії при виробництві марганцевих сплавів. Точніше, відновлення Mn_3O_4 до MnO може відбуватися паралельно з реакцією Будуара, тоді як відновлення MnO_2 до Mn_3O_4 відбувається при температурах нижче порогу газифікації коксу. Це пряме відновлення Mn_3O_4 вуглецем (непряме відновлення та реакція газифікації вуглецю) є ендотермічним і призводить до надмірного споживання відновника та енергії. Очевидно, це явище безпосередньо пов'язане з відновлюваністю руди та реакційною здатністю коксу до CO_2 . Мінімальне стехіометричне споживання вуглецю становить 1 моль С/моль утвореного Mn :



де $1 \leq x \leq 2$ та $y + z = 1$. Приблизно 70 кг вуглецю розчиняється в металі на тонну виробленого сплаву.

У рудовідновній електропечі ідеальний хід непрямого відновлення оксидів відбувається за умови достатнього часу перебування твердої шихти і відповідає наступній послідовності: повне перетворення MnO_2 , Mn_2O_3 і Mn_3O_4 в MnO . MnO не відновлюється опосередковано при звичайних температурах. Якщо припустити миттєву декарбонізацію приблизно при $900^\circ C$, на рівні,

відповідному цій температурі, газ збагачується CO_2 . Співвідношення CO/CO_2 у рівновазі з Mn_3O_4 становить близько $8 \cdot 10^{-5}$ при 1000°C . Після декарбонізації газ продовжує підніматися і окислюватися при контакті з оксидами металів. Дегідратація марганцевих руд відбувається при температурі від 300 до 400°C .

Кількість CO , що утворюється шляхом прямого відновлення MnO в коксовому шарі, достатня для прямого відновлення майже всіх вищих оксидів марганцю та оксидів заліза, присутніх у зоні попереднього відновлення. Таким чином, відновлюваність руди впливає на швидкість непрямого відновлення.

Реакційна здатність коксу є дуже важливим критерієм для вибору відновника для використання в електропечі для виробництва феросплавів, оскільки вона впливає на питому кількість вуглецю та енергоємність процесу. Автори [4] у своєму дослідженні поведінки коксу в електричній печі з зануреною дугою дійшли висновку, що відновник, який використовується для виробництва феросплавів, повинен бути більш реактивним, ніж той, який використовується в доменній печі, щоб забезпечити відновлення оксидів металів, присутніх у шихті.

Для цього необхідно дослідити газифікацію коксу за реакцією Будуара за трьома масштабами зростання (рис. 2):

- за масштабом хімічної реакції, що відбувається на поверхні пор шматка коксу, оцінити вплив складу газу на власну швидкість реакції та визначити кінетичні константи газифікації;
- у масштабі окремого коксового зерна зрозуміти механізми його реакції та визначити режим газифікації за певних умов, що накладаються стандартними методами вимірювання реактивності;
- в масштабі коксового шару визначити вплив окремих параметрів частинок і газу на швидкість газифікації нерухомого гранульованого шару.

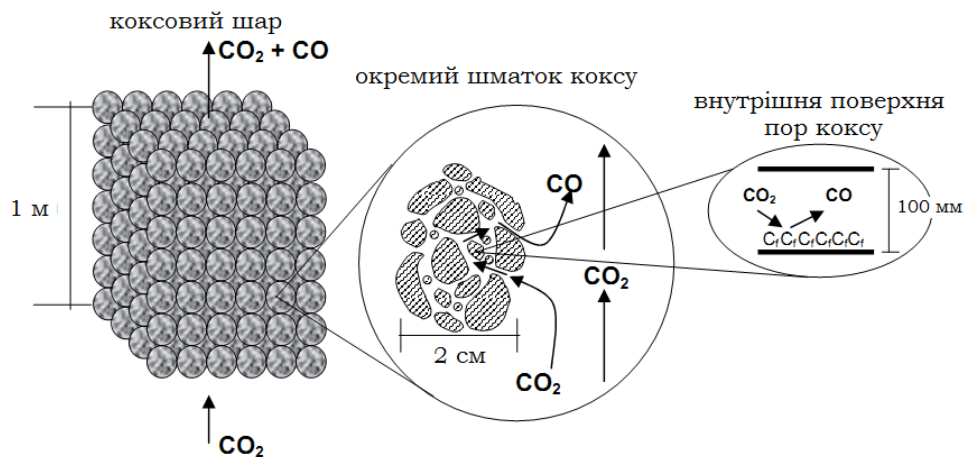


Рисунок 2 - Три ступеня газифікації коксу

Найпоширенішим тестом у промисловій практиці є японський тест під назвою CRI/CSR (індекс реактивності коксу та міцність коксу після реакції) [5]. Цей метод був представлений близько 30 років тому Nippon Steel Company і був розроблений для оцінки механічної міцності коксу для виробництва сталі після газифікації. На рисунку 3 показана шкала реакційної здатності різних видів коксу, які використовуються для виробництва марганцевих сплавів.

Діапазон реакційних здатностей відновників, які використовуються в електропечі, дуже широкий. Мікроструктура це параметр коксу, який може змінюватися, він впливає на реакційну здатність коксу. Кокс в основному має анізотропну мікроструктуру з наявністю шарів піролітичного вуглецю, що покривають внутрішню стінку деяких пор. Напівкокс має ізотропну мікроструктуру, яка включає смуги інертиніту та напівфузиніту, маленькі пори укладені в стінку великих пор. За даними [6] показано, що ізотропні мікротекстури більш реактивні, ніж анізотропні мікроструктури.

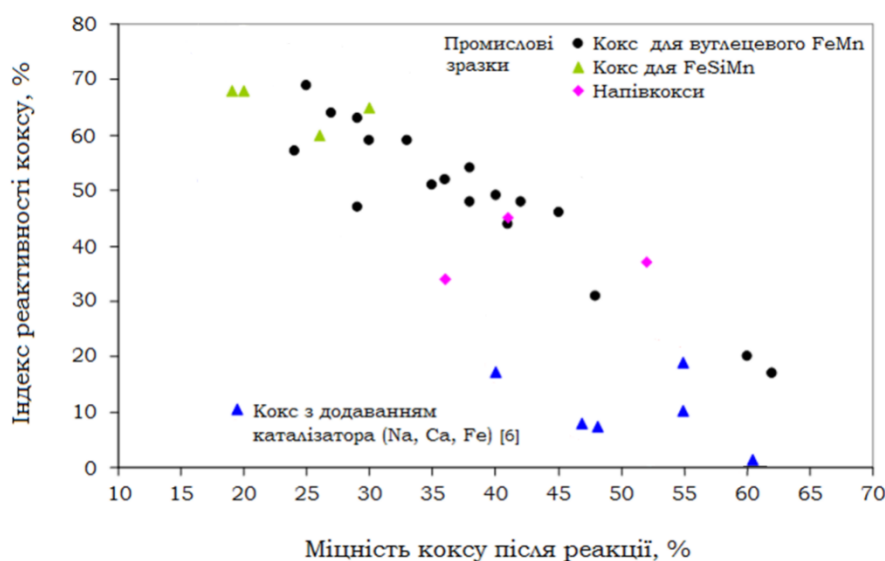


Рисунок 3 - Різновиди коксів, що використовуються для виробництва марганцевих сплавів в електропечі

Напівкокс відрізняється від спеціального металургійного коксу за вмістом залишкових летких речовин, пористістю, мікротекстурою та реакційною здатністю. Напівкокс має вищий вміст залишкових летких речовин, ніж звичайний кокс. Вища реакційна здатність напівкоксу пов'язана з його ізотропною мікроструктурою, яка є більш реакційно здатною, ніж анізотропна, яка переважає в коксі.

Таким чином, внутрішні властивості вуглецевого матеріалу мають великий вплив на реакційну здатність великого зразка навіть за високої температури. Низька реакційна здатність відновника може бути компенсована каталітичним ефектом лужних металів, які завжди присутні в шихті феромарганцевої електропечі, особливо калію. Для подальших досліджень необхідно оцінити якість електропічного коксу за показником початкової швидкості його газифікації, виміряної в хімічному режимі.

Висновки. При виробництві феросплавів в умовах виробництва необхідно мінімізувати питомі витрати електричної енергії. Її споживання залежить головним чином від реакцій, що відбуваються в зоні попереднього відновлення, тоді як стабільна робота визначається розміром коксового шару та хімічними реакціями, що там відбуваються.

Пряме відновлення оксидів вуглецем та реакція газифікації вуглецю є ендотермічним і призводять до надмірного споживання відновника та енергії, що безпосередньо пов'язане з відновлюваністю руди та реакційною здатністю коксу до CO_2 .

Реакційна здатність коксу є дуже важливим критерієм для вибору відновника для використання в електропечі для виробництва феросплавів, оскільки вона впливає на питому кількість вуглецю та енергоємність процесу.

ЛІТЕРАТУРА

1. Tangstad M. The High Carbon Ferromanganese Process - Coke Bed Relations. Ph.D. Thesis. The Norwegian Institute of Technology, Trondheim, 1996.
2. In The "dig-out" of a 75 MVA High Carbon Ferromanganese Electric Smelting Furnace / Barcza N. A., Koursaris A., See J. B., Gericke W. A. // 37th Electric Furnace Conference Proceedings. Detroit, 1979. - AIME: Detroit. – P. 19-33.
3. Ishak R., Tangstad M. In Degree of prereduction without coke consumption in industrial furnaces. // Proceedings of the Eleventh International Ferroalloys Congress. 18 – 21 February 2007. New Delhi, India. – P. 268-280.
4. Kamalpour S., Rankin W.J. In The behaviour of coke in submerged arc furnace smelting of ferromanganese. // Proceedings of the Tenth International Ferroalloys Congress. 1-4 February 2004. Cape Town, South Africa. – P. 381-391.
5. ISO-18894. Coke - Determination of coke reactivity index (CRI) and coke strength after reaction (CSR). International Organization for Standardization, 2006. - 20 p.
6. New Trends In Blast-Furnace Coke Characterization. / Vogt D., Steiler J.M., Duchene J.M. // Rev. Metall.-Cah. Inf. Techn. 1988, 85 (8-9), 651-660.

THE IMPORTANCE OF COKE QUALITY IN A SUBMERGED ARC ELECTRIC FURNACE FOR THE PRODUCTION OF FERROALLOYS

Isaiev A., Kramar I., Kamkina L., Mianovska Y.

Abstract. *In the production of ferroalloys under production conditions, it is necessary to minimize the specific consumption of electrical energy. Its consumption depends mainly on the reactions occurring in the pre-reduction zone, while stable operation is determined by the size of the coke bed and the chemical reactions occurring there. Schematically, the ferroalloy furnace is divided into four zones and the main chemical reactions occurring there are shown. In the coke bed zone, chemical reactions of direct reduction of oxides occur, in the zones below - ore and fluxes are in a liquid state, mixed with coke. The amount of CO formed by direct reduction of MnO in the coke bed is sufficient for direct reduction of almost all higher manganese oxides and iron oxides present in the pre-reduction zone. Thus, the reducibility of the ore affects the rate of indirect reduction.*

Heterogeneous (gas-solid) reactions occurring in the pre-reduction zone of the furnace have a large impact on the total consumption of coke and electricity in the production of manganese alloys. The reduction of Mn_3O_4 to MnO can occur in parallel with the Boudoir reaction, while the reduction of MnO_2 to Mn_3O_4 occurs at temperatures below the gasification threshold of the coke.

The reactivity of the coke is a very important criterion for the selection of a reducing agent for use in an electric furnace for the production of ferroalloys, as it affects the specific carbon content and energy intensity of the process. The most common test in industrial practice is the Japanese test called CRI/CSR (coke reactivity index and coke strength after reaction). The reducing agent used for the production of ferroalloys should be more reactive than that used in the blast furnace. The intrinsic properties of the carbon reducing agent have a large influence on its reactivity, the isotropic microtextures of semi-coke being more reactive.

Keywords: ore reduction furnace, coke, furnace structure, furnace zones, coke reactivity.

REFERENCE

1. Tangstad M. The High Carbon Ferromanganese Process - Coke Bed Relations. Ph.D. Thesis. The Norwegian Institute of Technology, Trondheim, 1996.
2. In The "dig-out" of a 75 MVA High Carbon Ferromanganese Electric Smelting Furnace / Barcza N. A., Koursaris A., See J. B., Gericke W. A. // 37th Electric Furnace Conference Proceedings. Detroit, 1979. - AIME: Detroit. – P. 19-33.
3. Ishak R., Tangstad M. In Degree of prereduction without coke consumption in industrial furnaces. // Proceedings of the Eleventh International Ferroalloys Congress. 18 – 21 February 2007. New Delhi, India. – P. 268-280.
4. Kamalpour S., Rankin W.J. In The behaviour of coke in submerged arc furnace smelting of ferromanganese. // Proceedings of the Tenth International Ferroalloys Congress. 1-4 February 2004. Cape Town, South Africa. – P. 381-391.
5. ISO-18894. Coke - Determination of coke reactivity index (CRI) and coke strength after reaction (CSR). International Organization for Standardization, 2006. - 20 p.
6. New Trends In Blast-Furnace Coke Characterization. / Vogt D., Steiler J.M., Duchene J.M. // Rev. Metall.-Cah. Inf. Techn. 1988, 85 (8-9), 651-660.

ВИЗНАЧЕННЯ ПРИФЕРЕНЦІЙНОГО СПОСОБУ ВИГОТОВЛЕННЯ ВИРОБІВ З МЕТАЛІВ І СПЛАВІВ

Кімстач Т.В.^{1,2}, Узлов К.І.³, Реп'ях С.І.³, Білий О.П.¹

¹Український державний університет науки і технологій, к.т.н., доцент, Україна

²Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАНУ, Україна

³Український державний університет науки і технологій, д.т.н., професор, Україна

Анотація. *За результатами аналізу сучасних та відомих критеріїв прогнозування придатності сплавів для виготовлення з них виробів деформуванням або литтям розроблено безрозмірні параметричні критерії та їх кількісні шкали. Використання цих критеріїв дозволить підвищити точність прогнозування їх преференційної придатності до виготовлення з них виробів деформацією або литвом. Для розробки безрозмірних параметричних критеріїв використано феноменологічний підхід до інтерпретації результатів системного аналізу механічних та окремих ливарних властивостей металів і сплавів в умовах невизначеності із запозиченням літературних довідкових даних, результатів експертних оцінок та власних досліджень. Отримані результати дозволять на початкових етапах розробки нових сплавів або технологій виготовлення з них виробів проводити прогнозування доцільності обробки металів та сплавів тиском або литтям безвідносно від їх виду та способу, що заощадить час та витрати як на розробку сплаву, так і на його впровадження у виробництво.*

Ключові слова: *сплав, усадка, деформація, литво, міцність, критерій, структура.*

Вступ. На сьогодні в патентах на винахід багатьох країн світу їх автори пропонують безліч сплавів, які, за розумінням їх винахідників, придатні до застосування у виробництві виробів шляхом лиття або/та деформації. Тим не менше, такі пропозиції розробників сплавів не завжди збігаються з реальним станом справ, а їх рекомендації щодо способів обробки запатентованих сплавів часто бувають хибними. Виходячи з цього, на будь якому підприємстві до використання будь якого металу або сплаву виконують їх первинне оцінювання з точки зору його можливості деформаційної або ливарної обробки.

Проводячи первинне оцінювання можливості деформаційної або ливарної обробки будь якого металу та сплаву, як правило, виходять із вимог до якості та

собівартості кінцевого виробу і продуктивності процесу. На основі цього аналізу приймають попереднє рішення щодо можливості та доцільності обробки даного металу або сплаву будь яким способом.

Зокрема, показником придатності сплаву до деформаційної обробки на попередньому етапі його оцінювання є максимальна величина пластичної деформації при якій тіло, що деформують, зберігає свою зовнішню цілісність. Для такого оцінювання, як правило, в цехах обробітки металів тиском (ОМТ) експериментально визначають величину безпечних ступенів деформації сплаву при різних температурах, величинах осаду і швидкостях його деформації тим чи іншим способом. Тим не менш, для визначення основних параметрів технологічного процесу обраного способу ОМТ таких даних не завжди достатньо оскільки пластичність будь-якого матеріалу залежить від багатьох факторів в числі яких: спосіб деформування, фазовий склад сплаву, розмір литого зерна заготовки та тип його кристалічної решітки, температура та швидкість деформування, величина разового осаду заготовки, тощо.

З викладеного витікає, що на сьогодні визначити єдиний показник пластичності для конкретного металу (сплаву) і всіх видів його ОМТ не є можливим. Тому для цих цілей в цехах ОМТ використовують так звані показники одиничної пластичності в числі яких:

- відносна деформація при осаді литого зразка металу (сплаву) до появи на ньому першої тріщини за умов всебічного тертя;
- величина ударної в'язкості литої заготовки за нормальної температури;
- відносне видовження або відносне звуження площі поперечного перерізу литого зразка при його розтягуванні за нормальної температури зі швидкістю не більше ніж 10 мм/с;
- твердість металу (сплаву) при 20 ± 1 °С в литому стані та ін.

При цьому враховують, що для ОМТ більш придатні не крихкі чисті метали і сплави з однофазною структурою у яких величина відносного видовження за нормальної температури не менше 20%, а співвідношення межі текучості до межі міцності ($\sigma_{0,2}/\sigma_B$) було не менше 0,95. При цьому швидкість і величина деформації матеріалу при ОМТ може бути тим більшою, чим більша

його температура і дрібніша величина зерна литої заготовки, технологічність сплаву для ОМТ тим вища, чим більше ефективний температурний інтервал його обробки тиском [1].

Основний матеріал. Виходячи з викладеного вище, з метою підвищення точності оцінювання придатності будь якого металу або сплаву до ОМТ або литва був прийнятий безрозмірний параметричний критерій “А”:

$$A = \alpha_{AV} / \alpha_B, \quad (1)$$

де α_{AV} , α_B – відповідно, абсолютно утруднена та вільна лінійна усадка литого металу (сплаву), %

За критерієм “А” метали (сплави), що мають $1,0 \geq A \geq 0,7$ більш придатні для ОМТ ніж для виготовлення продукції способами лиття, оскільки в литому стані такі метали і сплави схильні до утворення у виливках гарячих тріщин, жолоблення тощо. Якщо $0,7 > A > 0,5$, то такий метал (сплав) придатний для ОМТ, але з певними умовами в технологічному процесі його обробки, з обмеженням розмірів і конфігурації майбутнього виробу, тощо, і цілком придатний до виготовлення виливків з певним обмеженням конструкції та розмірів виливків. Метали та сплави з $A \leq 0,5$ необмежено придатні для виготовлення виливків будь-яким способом лиття і обмежено придатні для виготовлення виробів видами ОМТ за певних умов.

Наприклад, подвійні бронзи марок БрА7 та БрА5, що мають $A > 0,7$, як відомо, переважно використовують для виготовлення виробів способами ОМТ. Для виливків ці бронзи застосовують вкрай обмежено, зокрема, для гребних гвинтів малого розміру або для окремих елементів гребних гвинтів великого розміру [2]. В той же час, бронзи марок БрА9Мц2Л, БрА9Ж3Л, БрА11Ж6Н6, БрО5Ц5С [2], чавун та інші сплави з $A \leq 0,5$, переважно використовують для виготовлення виливків будь-якої маси, розмірів та конфігурації, за будь яким видом лиття. Виходячи з цього, за величиною критерію “А” метали та сплави класифікували за такими підгрупами:

підгрупа А1 – метали та сплави з величинами $1,0 \geq A \geq 0,7$;

підгрупа А2 - метали та сплави з величинами $0,7 > A > 0,5$;

підгрупа А3 - метали та сплави з величинами $A \leq 0,5$.

Другим параметричним критерієм щодо визначення можливості деформаційної обробки металів (сплавів) шляхом ОМТ або литтям було прийнято співвідношення “В”:

$$B = (\delta_5 \cdot \sigma_B) / (100 \cdot \sigma_{0,2}), \quad (2)$$

де δ_5 , – відносне видовження, %; σ_B , $\sigma_{0,2}$ – відповідно, межа міцності та текучості при розтягуванні зразків металу (сплаву) у литому стані за температури 20 ± 1 °С, МПа; 100 - балансова константа, %.

За результатом аналізу встановлено, що всі відомі метали та сплави за величиною критерію “В” можна поділити на 7 наступних підгруп технологічності (підгрупи складності їх деформування та/або лиття):

підгрупа В0 – метали та сплави з величинами $B \geq 1,8$;

підгрупа В1 – метали та сплави з величинами $1,8 > B \geq 0,9$;

підгрупа В2 – метали та сплави з величинами $0,9 > B \geq 0,5$;

підгрупа В3 – метали та сплави з величинами $0,5 > B \geq 0,2$;

підгрупа В4 – метали та сплави з величинами $0,2 > B \geq 0,1$;

підгрупа В5 – метали та сплави з величинами $0,1 > B > 0$;

підгрупа В6 – метали та сплави з величиною $B = 0$.

Підгрупа В0 - метали та сплави, вироби з яких виготовляють переважно у холодному стані їх заготовок будь-якими видами ОМТ з відносно великим ступенем одноразової деформації і на великій швидкості.

Підгрупа В1 - метали та сплави вироби з яких виготовляють як у холодному так і у гарячому стані їх заготовок будь-якими видами ОМТ з відносно великим ступенем одноразової деформації і на великій швидкості.

Підгрупа В2 – метали та сплави, вироби з яких переважно виготовляють з їх заготовок у гарячому стані обмеженим числом видів ОМТ з меншими, ніж в підгрупі В1, ступенем одноразової деформації та її швидкості.

Підгрупа В3 – метали та сплави, вироби з яких виготовляють виключно з їх заготовок у гарячому стані більше обмеженим, ніж для підгрупи В2, числом видів ОМТ, з меншими ступенем одноразової деформації та її швидкості.

Підгрупа В4 – метали та сплави, вироби з яких виготовляють виключно з їх заготовок у гарячому стані більше обмеженим, ніж для підгрупи В3,

числом видів ОМТ, з відносно невеликим ступенем одноразової деформації та її швидкості.

Підгрупа В5 – відносно крихкі метали та сплави, вироби з яких виготовляють виключно з їх заготовок у гарячому стані значно обмеженим, ніж для підгрупи В3, числом видів ОМТ, з малим ступенем одноразової деформації та її швидкості.

Підгрупа В6 – вкрай крихкі метали та багатофазні сплави, ОМТ яких можливо виконати за одним-двома видами, виключно в гарячому стані заготовки за певних умов, на вкрай малій швидкості та ступенем одноразової деформації з обмеженими розмірами та простою конфігурацією виробу або ОМТ матеріалів цієї групи неможливо виконати за будь-яких умов.

Висновки. 1. За результатами виконаного аналізу розроблено параметричні безрозмірні критерії (“А” та “В”), які поділено на групи, що за рахунок їх комбінацій дозволяє провести оцінку придатності чистих металів, чавунів, сталей та бронз з малим вмістом свинцю до можливості використання їх для лиття та/або способів ОМТ.

2. Величина ударної в'язкості, твердості, відносного видовження або звуження або співвідношення показника межі текучості до межі міцності будь якого литого металу (сплаву) як єдиного показника придатності литого металу (сплаву) до ОМТ не може бути рекомендована.

3. Подальший розвиток досліджень за запропонованим в даній роботі критеріальним напрямком доцільно виконати для сплавів на основі Ni, Al, Ti та ін.

ЛІТЕРАТУРА

1. Ray S. Principles and applications of metal rolling. Cambridge University Press, Delhi. 2016. URL :<https://www.cambridge.org/core/search?filters%5BauthorTerms%5D=Siddhartha%20Ray&eventCode=SE-AU>.
2. Грешта В.Л., Лисиця О.В., Степанова Л.П. Кольорові метали та сплави на їх основі : навчальний посібник. Запоріжжя: ЗНТУ, 2014. 286 с.

DETERMINATION OF THE PREFERENTIAL METHOD OF MANUFACTURING PRODUCTS FROM METALS AND ALLOYS

Tetiana Kimstach, Kostiantyn Uzlov, Sergei Repyakh, Oleksandr Bilyi

Abstract. *Based on the results of the analysis of modern and well-known criteria for predicting the suitability of alloys for manufacturing products from them by deformation or casting, dimensionless parametric criteria and their quantitative scales have been developed. The use of these criteria will allow to increase the accuracy of predicting their preferential suitability for manufacturing products from them by deformation or casting. To develop dimensionless parametric criteria, a phenomenological approach was used to interpret the results of a systematic analysis of mechanical and individual casting properties of metals and alloys under conditions of uncertainty, borrowing literature reference data, the results of expert assessments and our own research. The results obtained will allow, at the initial stages of developing new alloys or technologies for manufacturing products from them, to predict the feasibility of processing metals and alloys by pressure or casting, regardless of their type and method, which will save time and costs both for the development of the alloy and for its introduction into production.*

Keywords: *alloy, shrinkage, deformation, casting, strength, criterion, structure.*

REFERENCES

1. Ray S. Principles and applications of metal rolling. Cambridge University Press, Delhi. 2016. URL :<https://www.cambridge.org/core/search?filters%5BauthorTerms%5D=Siddhartha%20Ray&eventCode=SE-AU>.
2. Hreshta V.L., Lysytsia O.V., Stepanova L.P. Kolorovi metaly ta splavy na yikh osnovi : navchalnyi posibnyk. Zaporizhzhia: ZNTU, 2014. 286 p. [in Ukrainian].

СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЧНИХ СХЕМИ ВИГОТОВЛЕННЯ ЕКОНОМНОЛЕГОВАНИХ СТАЛЕЙ ДЛЯ ЛИСТОВОГО ПРОКАТУ

Кононенко Г.А.¹, Кімстач Т.В.², Подольський Р.В.³, Сафронова О.А.⁴

¹ІЧМ НАНУ, НТУ «ДП», д.т.н., ст.досл., Україна

²ІЧМ НАНУ, УДУНТ, к.т.н, доц, Україна

³ІЧМ НАНУ, докт. філ., Україна

⁴ІЧМ НАНУ, Україна

Анотація. Зниження вартості металопрокату, зокрема через виробництво економно та низьколегованих сталей з високими фізико-механічними характеристиками, є ключовим завданням сучасного виробництва сталі, яку застосовують в будівництві промислових і цивільних об'єктів, мостів, трубопроводів, кранів, рам і кузовів великовантажних автомобілів тощо. Сучасні галузі застосування висувають до нього високі вимоги щодо міцності, холодостійкості, низькотемпературної в'язкості та зварюваності. Існує велика кількість методів впливу на якість легованої сталі. Для цього використовують обробку в печах або поза ними інертними газами, синтетичними шлаками, модифікування, суворе дотримання технології виплавки або коригування хімічного складу сталі, що в багатьох випадках дозволяє уникнути подальшої термічної обробки зливка. Оцінюючи витрати часу та матеріалів для застосування різних методів покращення якості сталі, економічне легування у поєднанні з мікролегуванням є на сьогодні найбільш вигідним та перспективним способом досягнення необхідних властивостей сталі.

Ключові слова: сталь, якість, мікролегування, легуючий елемент, технологія

Вступ. Підвищення вагової ефективності металовиробів за рахунок високої надійності та довговічності їх роботи, зниження вартості металопрокату, зокрема, за рахунок створення економнолегованих сталей з високими характеристиками фізико-механічних властивостей є найважливішими завданнями сучасного матеріалознавства.

Одним з основних видів продукції чорної металургії, який масово виробляють, є листовий прокат. Його споживають у великих обсягах усі галузі промисловості у зв'язку з чим обсяг виготовлення такого прокату на сьогодні складає десятки мільйонів тон щорічно. Використовують листовий прокат для виготовлення конструкцій промислових та цивільних будівель, резервуарів,

мостів, трубопроводів, кранів, рам і кузовів великовантажних автомобілів, гірничодобувної техніки тощо.

Виходячи з цього, сучасний рівень розвитку техніки пред'являє до листового прокату одночасно високі вимоги щодо міцності, низькотемпературної в'язкості, холодостійкості та зварюваності, оскільки вимоги до прокату різних галузей промисловості мають свою специфіку.

Основний матеріал. Розвиток будівництва, автомобілебудування та машинобудування супроводжувався постійним підвищенням технічних вимог до конструкційних сталей. Тому питання технології виробництва аналогів імпортованих високоміцних листових сталей типу MARS 190-300, Miilux PROTECTION 320T-500T, ARMOX 370T-600T та інш., з яких виготовляють наноструктурований високоміцний листовий прокат з унікальним поєднанням механічних властивостей (міцність 700-2000 Н/мм², твердість понад 280 HB), мають велике значення для народного господарства будь якої країни. Тому велика кількість наукових досліджень присвячена:

- розробці та застосуванню низьколегованих сталей,
- питанням більш повного використання потенційних можливостей складу сталей,
- гарантованому забезпеченню необхідного класу міцності та зменшенню коливання властивостей листового прокату, при одночасному зниженні витрат дефіцитних легуючих елементів.

У зв'язку з цим, актуальним завданням, яке має велике наукове та практичне значення, є дослідження закономірностей комплексних процесів структуроутворення та формування властивостей сталей, легованих марганцем та кремнієм, а також мікролегованих карбідоутворюючими елементами (Mo, V, Ti, Nb) та розробка на їх основі складів та технологій виробництва листового конструкційного прокату різних класів міцності та високої пластичності, а також розробка способів стабілізації рівня властивостей.

Вплив легуючих елементів на властивості сталі обумовлено подрібненням зерна, зміцненням фериту внаслідок утворення твердих розчинів впровадження та заміщення, зміцненням в результаті виділення частинок

другої фази різного ступеня дисперсності та зміною прогартуваності. У зв'язку з цим сучасна технологія виробництва високоякісної сталі повинна забезпечувати відповідність технологічних параметрів заданим значенням. Для цього необхідний чіткий і збалансований підхід до виконання кожного з етапів сталеплавильного переділу. При цьому, технологія виробництва сталі повинна бути заснована на постійному експресному контролі технологічних параметрів і спрямована на отримання стабільного стану металу перед розливанням, що визначається вимогами до властивостей готової металопродукції.

Системний аналіз технологічного циклу виготовлення сталі в Україні та за кордоном свідчить, що технологічний ланцюг при цьому повинен обов'язково включати такі етапи:

підготовка шихтових матеріалів, яка має бути обрана заздалегідь з урахуванням чистоти та розмірів шихтових матеріалів, вмісту хімічних елементів, що не видаляються, і небажаних, але припустимих нормативно-технічною документацією домішок.

отримання напівпродукту, в якому міститься мінімальна кількість домішкових та необхідна кількість легуючих елементів, із заданим вмістом вуглецю, обмеженою кількістю кисню та із заданою температурою;

відсічення пічного шлаку при випуску або на спеціальному стенді з метою запобігання сульфурзації, фосфорації та вторинному окисленню;

дотримання шлакового режиму та розкислення плавки;

рафінування розплаву у вакуумі або шляхом продування через нього аргону;

розливання розплаву з обов'язковим захистом від вторинного окислення.

Важливу роль також відіграє модифікування розплавів лужними та лужноземельними металами, що є позапічним способом обробки сталі. Обробка сталі рідким синтетичним шлаком дозволяє проводити позапічну десульфуріацію та очищення від неметалевих включень та газів. Для цього використовують шлаки системи $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3$, що мають високу рафінуючу

здатність. Рідкий синтетичний шлак готують у шлакоплавильній печі після чого його зливають у ківш і випускають туди сталь.

Удосконалення технології позапічної обробки електросталі шляхом відсікання пічного шлаку при переливі металу з ківша в ківш, зниження в 1,5–2 рази витрати кускового алюмінію, що вводиться в ківш, без зменшення його вмісту в металі, та оптимізації вмісту в сталі алюмінію та кальцію, що вводяться порошковим дротом, дозволяє керувати складом, кількістю та формою неметалевих включень. Включення, що утворюються при цьому, складаються, в основному, з алюмінатів кальцію округлої форми з високою часткою еквімольних алюмінатів кальцію, що легко коалесцюють і видаляються з рідкої сталі. Утворення бідних за вмістом кальцію гекса- та біолюмінатів кальцію, що важко видаляються з рідкої сталі, зведено до мінімуму [1].

Виробництво товстолистого прокату за схемою: лита заготовка - кований сляб - прокат з використанням технології позапічного рафінування, вакуумування та модифікування дозволяє збільшити пластичність сталі за рахунок значного підвищення її чистоти.

Мінімізація кількості продуктів розкислення, оптимізація їх форми та складу при позапічній обробці сталі є необхідними, але недостатніми умовами отримання якісного зливка. Одним із пріоритетних напрямків у вирішенні проблем підвищення якості економнолегованої сталі в промислово розвинених країнах світу є використання в металургійних технологіях засобів магнітної гідродинаміки. Малоінерційна безконтактна дія електромагнітних полів на рідкий і кристалізований метал дає можливість керувати його температурою та швидкістю руху і, відповідно, процесами тепло- та масопереносу на всіх металургійних переділах.

Висновки. На сьогодні відома значна кількість важелів впливу на якість легованих сталей в числі яких є пічна та позапічна обробка розплаву у тому числі інертним газом, синтетичним шлаком, модифікуванням, при неухильному дотриманні технології плавки або за рахунок оптимізації хімічного складу сталі, зокрема, без послідувочої термічної обробки злитку.

Виходячи з оцінювання витрат часу та матеріалів на реалізацію більшості способів підвищення якості сталі найменш витратним є спосіб досягнення потрібної якості сталі за рахунок її економного та мікролегування.

ЛІТЕРАТУРА

1. Bhadeshia H.K.D.H.. Bainite in steels. Theory and Practice. Third Edition. 2015. 616p. <https://doi.org/10.1201/9781315096674>

MODERN TECHNOLOGICAL SCHEMES FOR THE PRODUCTION OF ECONOMICALLY ALLOYED STEELS FOR SHEET ROLLING

Kononenko G.A., Kimstach T.V., Podolskyi R.V., Safronova O.A.

Abstract. *Reducing the cost of rolled metal, in particular through the production of economical and low-alloy steels with high physical and mechanical characteristics, is a key task of modern steel production, which is used in the construction of industrial and civil facilities, bridges, pipelines, cranes, frames and bodies of heavy trucks, etc. Modern fields of application place high demands on it in terms of strength, cold resistance, low-temperature toughness and weldability. There are a large number of methods for influencing the quality of alloyed steel. For this purpose, treatment in or outside the furnaces with inert gases, synthetic slags, modification, strict adherence to smelting technology or adjustment of the chemical composition of the steel is used, which in many cases allows avoiding further heat treatment of the ingot. Estimating the time and material costs for applying various methods of improving the quality of steel, economical alloying in combination with microalloying is currently the most profitable and promising way to achieve the required properties of steel.*

Keywords: steel, quality, microalloying, alloying element, technology

АНАЛІЗ МОЖЛИВОСТЕЙ ЗМЕНШЕННЯ ВИКИДІВ CO₂ В ДОМЕННОМУ ВИРОБНИЦТВІ

Корнілов Б.В.¹, Чайка О.Л.², Москалина А.О.³, Чайка А.О.⁴

¹Інститут чорної металургії НАН України, к. т. н, Україна

²Інститут чорної металургії НАН України, к. т. н, ст. наук. співр., Україна

³Інститут чорної металургії НАН України, к. т. н, Україна

⁴Інститут чорної металургії НАН України, Україна

Анотація. Глобальне потепління висуває перед людством виклики щодо зменшення впливу антропогенних факторів на навколишнє середовище. Тому однією з нагальних задач є декарбонізація промислового виробництва в цілому та металургійній галузі зокрема, на яку приходить 6–8% викидів CO₂. Так як доменне виробництво збережеться як домінуюча ланка в отриманні сталі, оскільки вона є найбільш економічно вигідною з тепловим коефіцієнтом корисної дії до 90% що найменше до 2050 р., то зменшення викидів CO₂ з доменної печі є нагальною задачею.

Встановлено граничні значення ефективності використання технологій вдування ПВП, водню та водневмісних добавок, ефекту від їх підігріву, застосування металодобавки, а також зміни технічних та технологічних параметрів доменної плавки (температура дуття, зміна вмісту FeO у шихті, теплові втрати, ступінь використання CO та H₂) на викиди CO₂ та техніко-економічні показники.

Ключові слова: доменна піч, викиди CO₂, водень, природний та коксовий газ, пилувугільне паливо, металодобавка, параметри дуття, кокс.

Вступ. У зв'язку з глобальним потеплінням та пов'язаними з ним негативними наслідками в майбутньому більшість країн світу, у тому числі й Україна, ратифікували Паризьку угоду щодо клімату (2016 р.), які зобов'язують зменшити викиди CO₂. У світовій структурі викидів CO₂ на металургію припадає 6–8% викидів CO₂.

За прогнозами Міжнародного Енергетичного Агентства (IEA) до 2050 р. доменне виробництво збережеться як домінуюча ланка в отриманні сталі, оскільки вона є найбільш економічно вигідною з тепловим коефіцієнтом корисної дії до 90%, залишаючись при цьому найбільш затребуваною порівняно з іншими технологіями виробництва заліза. Нові технології отримання сталі поступово впровадяться, і це до 2050 р., за умови значних у

десятки мільярдів доларів інвестицій у реалізацію нових технологій, може призвести до зменшення традиційного способу виробництва сталі на 50%. у циклі виробництва стали дозволити зберегти конкурентоспроможність металургійної галузі в Україні та світі [1].

Основний матеріал. Для оцінки впливу потенціалу нових та існуючих технологій виробництва заліза на зменшення викидів CO_2 та техніко-економічні показники доменної плавки виконано розрахунки з використанням розробленої в ІЧМ НАНУ математичної моделі повного енергетичного балансу доменної плавки стосовно умов роботи доменної печі об'ємом 2000 м^3 .

Важливою задачею є визначення ефективності тієї чи іншої технології при впровадженні виробництва для оцінки економічного та екологічного ефекту від її застосування. Встановлено закономірності зміни та узагальнено результати ефективності застосування/зміни того чи іншого параметра на викиди CO_2 , вихід вторинних енергоресурсів (ВЕР) та витрату коксу.

Встановлено граничні значення ефективності використання технологій вдування ПВП, водню та водневмісних добавок (природного (ПГ) та коксового газу (КГ)) на викиди CO_2 , вихід ВЕР та витрату коксу (табл. 1). Показано, що водень та водневмісткі добавки дозволяють більшою мірою забезпечити зменшення викидів CO_2 та коксу, збільшити вихід вторинних енергоресурсів у порівнянні з ПУТ, а саме: використання водню до $500 \text{ м}^3/\text{т}$ дозволяє зменшити викиди CO_2 до 30%, витрату коксу до 25% та збільшити вихід ВЕР до 81%; використання природного газу до $200 \text{ м}^3/\text{т}$ дозволяє зменшити викиди CO_2 до 15%, витрату коксу до 35% та збільшити вихід ВЕР до 74%; використання коксового газу до $300 \text{ м}^3/\text{т}$ дозволяє зменшити викиди CO_2 до 15%, витрату коксу до 28% та збільшити вихід ВЕР до 60%[2,3].

Використання ПВП не дозволяє зменшити викиди CO_2 , а їх зменшення досягається тільки за рахунок зменшення витрати пари для підтримки теоретичної температури в заданих межах, однак може забезпечити найбільше зменшення витрати коксу (до 45% при витраті ПВП до $250 \text{ кг}/\text{т}$).

Таблиця 1

Ефективність застосування різних паливних добавок при максимальному їх застосуванні на викиди діоксиду вуглецю, вихід ВЕР та витрати коксу

	ПВП 250 кг/т	Природний газ 200 м ³ /т	Коксовий газ 300 м ³ /т	Водень 500 м ³ /т
Викиди CO ₂	-11% (-0,44%) *	-15% (-0,75%)	-15% (-0,5%)	-30% (-0,6%)
Вихід ВЕР	-10% (-0,4%)	+74% (+3,7%)	+60% (+2%)	+81% (+1,62%)
Витрата коксу	-45% (-1,8%)	-35% (-1,75%)	-28% (-0,93%)	-25% (-0,5%)
<i>З врахування підігріву паливної добавки:</i>				
	400°C	800°C	800°C	1000°C
Викиди CO ₂	-12% (-0,48%) *	-21% (-1,05%)	-20% (-0,67%)	-40% (-0,8%)
Вихід ВЕР	-8% (-0,32%)	+64% (+3,2%)	+57% (+1,9%)	+69% (+1,38%)
Витрата коксу	-44% (-1,76%)	-40% (-2%)	-32% (-1,07%)	-31% (-0,62%)

*для ПВП досягнення зниження викидів CO₂ досягається за рахунок зменшення витрати пари для підтримки теоретичної температури в заданих межах;

** у дужках зазначено зміну параметру зі збільшенням витрати паливної добавки на 10 кг/т (м³/т).

Збільшення ВЕР (тобто збільшення енергоємності доменного газу) при використанні водневмісних паливних добавок дозволить використовувати очищений від CO₂ доменний газ в інших переділах металургійного комбінату або вдувати в фурмене вогнище доменної печі. Використання коксового газу в доменній печі може бути перехідною технологією перед використанням водню.

Підігрів газоподібних паливних добавок може дати більший ефект - до 10%, 6% та 5% зменшення викидів CO₂ відповідно та 4-6% зменшення витрати коксу за рахунок можливості до більшого нагрівання – ПГ та КГ до 800°C H₂ – до 1000°C, порівняно з ПВП – до 400°C, яке забезпечить зменшення викидів ЗІ та зменшення витрати на 1%.

Застосування водневмісних паливних добавок спільно з ПВП є актуальною задачею через поширення технології вдування ПВП як в Україні, так і за кордоном. Встановлено, що спільне вдування в горн доменної печі водневмісних добавок спільно ПВП дозволяє вирішити одночасно дві задачі – зменшення викидів CO₂ і забезпечити мінімальну собівартість чавуну та сталі. Визначено критичні витрати паливних добавок, за яких, згідно з принципом

Грюнера, очікується досягнення повного відновлення заліза непрямим шляхом, а отже, і мінімальної витрати палива при досягненні ступеня прямого відновлення близького до 0% (табл. 2).

Таблиця 2

Витрата палива, за якої все залізо в печі відновлюється непрямим шляхом

Параметр	ПВП+ПГ	ПВП+КГ	ПВП+H ₂
Витрата ПВП, кг/т	200-250	200-250	200-250
Витрата водневмісної добавки, кг/т	193-180	300	485-450

Робота доменної печі за змінних шихтових умов призводить до зміни технологічних параметрів, таких як теплові втрати, ступінь використання СО та H₂, що позначається на викиди CO₂ та техніко-економічні показники. Також на викиди CO₂ впливає застосування металодобавки, зміна температури дуття та вміст FeO в шихті. Встановлено граничні значення ефективності застосування металодобавки та технологічних заходів щодо збільшення температури дуття, зміни вмісту FeO у шихті, зменшення теплових втрат та збільшення ступеня використання СО та H₂ на викиди CO₂, вихід ВЕР та витрату коксу (табл. 3).

Таблиця 3

Ефективність застосування металодобавки, технічних та технологічних заходів на викиди діоксиду вуглецю, вихід ВЕР та витрата коксу

	Метало- добавка	Вміст FeO в шихті	Темпера- тура дуття	Теплові втрати	Ступінь ви- користання СО	Ступінь ви- користання H ₂
Діапазон зміни:	0-500 кг/т	0-20%	от 1100°C до 1450°C	від 20 до 5 МВт	від 40% до 50%	від 40% до 70%
Викиди CO ₂	-47% (-0,93%)	-9,9% (-0,49%)	-6,4% (-1,82%)	-2,3% (-0,15%)	-13,2% (-1,32%)	-7,2% (-0,24%)
Вихід ВЕР	-108% (-2,16%)	-10,3% (-0,52%)	-26,5% (-7,6%)	-0,4% (-0,03%)	-48,4% (-4,84%)	-29% (-0,97%)
Витрата коксу	-16% (-0,33%)	-12% (-0,6%)	-2% (-0,49%)	-0,6% (-0,04%)	-11,9% (-1,19%)	-6,4% (-0,21%)

* у дужках зазначено зміну впливу збільшення витрати металодобавки на 10 кг/т, температури дуття на 100°C, ступеня використання СО і H₂ та вмісту FeO в шихті на 1% та зменшення теплових втрат на 1 МВт.

Встановлено граничні значення ефективності використання технологій вдування паливних добавок, застосування металодобавки, а також зміни

технічних та технологічних параметрів доменної плавки на викиди CO_2 та техніко-економічні показники: використання чистих металодобавок в доменній печі дозволяє суттєво зменшити викиди CO_2 , однак їх використання обмежене наявністю та ціною; збільшення температури дуття на кожні 100°C дозволить зменшити викиди CO_2 на 1,8% та витрату коксу на 0,5%; збільшення ступеню використання CO та H_2 в доменній печі на кожен 1% дозволить зменшити викиди CO_2 на 1,3% та 0,25% відповідно; збільшення частки FeO в шихті в доменній печі на кожен 1% дозволить зменшити викиди CO_2 на 0,5%; зменшення теплових втрат в системі охолодження на кожен 1 МВт дозволить зменшити викиди CO_2 на 0,15%.

Висновки

1. Встановлено граничні значення ефективності використання технологій вдування ПВП, водню та водневмісних добавок (природного та коксового газу) на викиди CO_2 , вихід ВЕР та витрату коксу, в тому числі і з врахуванням їх підігріву. Показано, що водень та водневмісткі добавки дозволяють більшою мірою забезпечити зменшення викидів CO_2 та збільшити вихід вторинних енергоресурсів у порівнянні з ПВП.

2. Визначено критичні витрати паливних добавок, за яких, згідно з принципом Грюнера, очікується досягнення повного відновлення заліза непрямым шляхом.

3. Встановлено граничні значення ефективності застосування металодобавки, а також зміни технічних та технологічних параметрів доменної плавки (температура дуття, зміна вмісту FeO у шихті, теплові втрати, ступінь використання CO та H_2) на викиди CO_2 та техніко-економічні показники.

ЛІТЕРАТУРА

1. Аналіз тенденцій розвитку уявлень та технологій, спрямованих на зменшення емісії діоксиду вуглецю в доменному виробництві. Чайка О. Л., Корнілов Б. В., Меркулов О. Є., Москалина А. О., Лебідь В. В., Ізюмський М. М. *Метал і лиття України*. 2022. № 2 (329). С. 8–19. <https://doi.org/10.15407/steelcast2019.10.064>
2. Nathan Barrett, Subhasish Mitra, Hamid Doostmohammadi, Damien O’dea, Paul Zulli, Sheng Chew, Tom Honeyands. Assessment of Blast Furnace Operational Constraints in the

Presence of Hydrogen Injection. ISIJ International. 2022, Vol. 62 Iss. 6, P. 1168-1177. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2021-574>

3. Prospects for the Use of Hydrogen and Hydrogen-Containing Additives to Reduce CO₂ Emissions and to Improve the Performance of Blast Furnace Smelting. Chaika O., Kornilov B., Myravyova I., Moskalyna A., Lebid V., Ivancha M. (2024). Science and Innovation, 20(5), 35–52. <https://doi.org/10.15407/scine20.05.035>

Analysis of opportunities for reducing CO₂ emissions in blast furnace production

Kornilov B.V., Chaika O.L., Moskalyna A.O., Dzhygota M.G.

Abstract. *Global warming poses challenges for humanity to reduce the impact of anthropogenic factors on the environment. Therefore, one of the urgent tasks is the decarbonization of industrial production in general and the metallurgical industry in particular, which accounts for 6–8% of CO₂ emissions. Since blast furnace production will remain the dominant link in steel production, as it is the most economically advantageous with a thermal efficiency of up to 90% at least by 2050, reducing CO₂ emissions from the blast furnace is an urgent task.*

The limiting values of the efficiency of using technologies for blowing PCI, hydrogen and hydrogen-containing additives, the effect of their heating, the use of metal additives, as well as changes in the technical and technological parameters of blast furnace smelting (blow temperature, change in the FeO content in the charge, heat losses, degree of use of CO and H₂) on CO₂ emissions and technical and economic indicators have been established.

Keywords: *blast furnace, CO₂ emissions, hydrogen, natural and coke oven gas, PCI, metal additive, blast parameters, coke.*

REFERENCE

1. Analiz tendentsii rozvytku uiavlen ta tekhnolohii, spriamovanykh na zmenshennia emisii dioksydu vuhletsu v domennomu vyrobnytstvi. Chaika O.L., Kornilov B.V., Merkulov O.Ye., Moskalyna A.O., Lebid V.V., Iziumskyi M.M. Metal i lyttia Ukrainy. – 2022. № 2 (329). S. 8–19. [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15407/steelcast2019.10.064>
2. Assessment of Blast Furnace Operational Constraints in the Presence of Hydrogen Injection. Nathan Barrett, Subhasish Mitra, Hamid Doostmohammadi, Damien O’dea, Paul Zulli, Sheng Chew, Tom Honeyands. ISIJ International. 2022, Vol. 62 Iss. 6, P. 1168-1177. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2021-574>
3. Prospects for the Use of Hydrogen and Hydrogen-Containing Additives to Reduce CO₂ Emissions and to Improve the Performance of Blast Furnace Smelting. Chaika O., Kornilov B., Myravyova I., Moskalyna A., Lebid V., Ivancha M. (2024). Science and Innovation, 20(5), 35–52. <https://doi.org/10.15407/scine20.05.035>

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПОДВІЙНОГО ВІДПАЛУ НА ЯКІСТЬ ВАЛКОВИХ ЧАВУНІВ З КУЛЯСТИМ ГРАФІТОМ

Іванова Л.Х.¹, Хитько О.Ю.², Білий А.П.³, Шемет В.Ю.³

¹Український державний університет науки і технологій, д.т.н., проф., Україна

²Український державний університет науки і технологій, к.т.н., доц., Україна

³Український державний університет науки і технологій, Україна

Анотація. Проведено дослідження впливу подвійного відпалу на структуру та властивості валкових чавунів виконання ЛШНМ-58. В результаті проведених досліджень з застосуванням складного плану, одержаного суміщенням плану 2⁴ з 4×4 латинським квадратом був обраний оптимальний режим подвійного відпалу: I стадія – температура 1000 °С, витримка 1 год; II стадія – температура 600 °С, витримка 3 год. Подвійний відпал чавунів робочого шару приводив до сфероїдизації перлітного та графітизації перлітного і евтектичного цементиту, у чавунів від шийок валків – до різномірної за морфологією продуктів евтектоїдного перетворення структури, до складу якої входили графіт, ферит, перліт різної дисперсності, бейніт, мартенсит та фосфідна евтектика. За цього міцнісні властивості термооброблених чавунів були більшими, ніж чавунів валків у литому стані на 8...96%. В результаті проведених досліджень була розроблена, випробувана та рекомендована до впровадження технологія високотемпературного термічного оброблення прокатних валків виконання ЛШНМ-58.

Ключові слова: чавун, прокатний валок, подвійний відпал, структура, властивість

Вступ. Кафедра ливарного виробництва Українського державного університету науки і технологій понад шістдесят років займається дослідженням впливу різних факторів на якість литих чавунних валків [1-4]. Одним з важливих питань для теорії та практики виробництва чавунних прокатних валків є дослідження впливу термічного оброблення, в тому числі подвійного відпалу, на структуру та властивості валкових чавунів [5].

Мета роботи. Визначити вплив подвійного відпалу на мікроструктуру та властивості матеріалу прокатних валків, обрати оптимальний режим відпалу та провести його промислове випробовування.

Основний матеріал. Методи дослідження та обробки експериментальних даних, у тому числі режими теплової обробки, різні методи аналізу та

визначення властивостей чавуну – всі ці методичні питання були вирішені наступним чином. У лабораторних умовах теплове оброблення проводили на спеціальній установці, що включала високотемпературну піч із нагрівачами з хроміту лантану та систему автоматики. У промислових умовах термічне оброблення прокатних валків здійснювали в газових камерних печах з викочуванням подом. Зразки для дослідження мікроструктури, фізико-механічних властивостей та службових характеристик вирізали від нижнього торця бочок та нижніх шийок при механічній обробці литих прокатних валків. Мікроскопічне дослідження проводили на оптичному метало-мікроскопі Neophot 21. Будову матриці валкових чавунів оцінювали за ГОСТ 3443-87. Межу міцності при вигині $\sigma_{\text{виг}}$ зразків розмірами 10x10x55 мм визначали на універсальній машині МУП-50. Модуль пружності – характеристику конструкційної надійності чавунів визначали ультразвуковим методом на приладі УЗІС-ЛЕТІ. Величини твердості, границь міцності та модуля пружності розраховували розраховували як середню трьох випробувань.

Для оцінки впливу параметрів подвійного відпалу на структуру і властивості дослідних чавунів і вибору оптимального режиму термічного оброблення був застосований складний план, одержаний суміщенням плану 24 з 4×4 латинським квадратом. Це було викликано тим, що даний експеримент був багатофакторним, а також тим, що поряд з основними факторами (температура 1-ї стадії відпалу – С: 1000 та 900°C, 2-ї стадії – А: 700 та 600°C, тривалість 1-ї стадії – D: 3 та 1 год, 2-ї стадії – В: 6 та 3 год) був присутній фактор Т – валковий чавун з різним ступенем легованості, що було джерелом неоднорідностей. Перевірку гіпотези про незначущість усіх взаємодій проводили за критерієм Фішера.

Структура чавунів робочого шару валків у литому сталі являла собою половинчасті, а шийок – сірі чавуни. Короткочасна витримка при 900°C приводила до графітизації невеликої кількості евтектичного цементиту у чавунах робочого шару валків, в основному структура матриці після 6- та 3-годинної витримки при 700°C складалася з із зернистого перліту, цементиту та графіту. Біля графітних включень у деяких зразках спостерігали майже чисті

феритні поля. Зі збільшенням часу витримки 1-ї стадії відпалу, а також збільшенням її температури кількість структурно вільного цементиту значно скорочувалася, в основному залишалися переплавлені ділянки фосфідної евтектики, навколо яких розташовувався крупнозернистий перліт у вигляді кайми. Ферит займав центральні ділянки дендритних гілок та оточував графітні включення. У деяких місцях в центральних ділянках дендритів утворювався тонкопластинчастий перліт і троостит. Структура матриці дослідних чавунів робочого шару валків після 6-годинної витримки при 600°C виходила такою ж, як після витримки за більш високої температури 700°C. У деяких місцях перліт виходив більш розрідженим зернистим або сорбітоподібним, по границях деяких зернин аустеніту утворювалася тонка сітка цементиту.

Перша стадія відпалу зразків від шийок валків призводила до зменшення кількості фосфідної евтектики та фериту, особливо помітному з підвищенням температури і тривалості витримки за відпалу. Перліт був в основному зернистим, по границях евтектичних колоній він мав сорбітоподібну будову, зустрічалися також ділянки тонкопластинчастого перліту. За відпалу за таким параметрами: температура 1-ої стадії 1000°C, тривалість витримки 3 години, температура 2-ої стадії 600°C, тривалість витримки 6 год у структурі деяких чавунів по границях колишніх аустенітних зернин зустрічалася сітка вторинного цементиту, біля крупних графітних включень перліт мав дрібнозернисту будову, фериту не було.

Обробку одержаних експериментальних даних та визначення оптимального режиму подвійного відпалу проводили за допомогою комплексного показника якості - узагальненої функції бажаності [5,6], яка була побудована на основі аналізу літературних даних про механічні та експлуатаційні властивості чавуну для прокатних валків. Якість валків оцінювали 7 параметрами: для робочого шару прокатних валків: межа міцності при вигині, твердість, модуль пружності, термостійкість; для чавуну шийок валків: межа міцності при вигині, твердість, модуль пружності. У вихідному литому стані комплексний показник якості-узагальнена функція бажаності G

дослідних чавунів робочого шару та шийок валків дорівнював 0,302. Всього було проведено 16 режимів подвійного відпалу, комплексний показник якості - узагальнена функція бажаності G дослідних чавунів робочого шару та шийок валків після подвійного відпалу коливався у межах від 0,349 до 0,682. В результаті проведеного активного експерименту встановлено, що до оптимального режиму подвійного відпалу слід віднести такі параметри: температура 1-ої стадії 1000°C і тривалість витримки 1 год, температура 2-ої стадії 600°C і тривалість витримки 3 год, за яких комплексний показник якості - узагальнена функція бажаності G мала максимальне значення – 0,682, у 2,2 рази більшою за вихідний литий стан.

Термочасові параметри високотемпературної термічної обробки, розроблені на стадії лабораторних досліджень, були покладені в основу промислового режиму термічного оброблення прокатних валків із чавунів з кулястим графітом виконання ЛШНМ-58 (розміри бочки 0,73×1,10 м). Робочий шар таких валків в литому сталі мав звичайну для таких валків структуру, що складалася з графіту кулястої і компактної форм, перліту, будова якого характеризувалася балом ПД1,0, фериту і цементиту. Термічне оброблення проводили за таким режимом: в печі нагрівання зі швидкістю 25-50 град/год до 1000°C, витримка протягом 1 год, потім поза піччю – примусове охолодження до температури робочого шару 580-620°C в потоці повітряної або водно-повітряної суміші до охолодження. Другу стадію відпалу проводи у печі, вона включала витримку для вирівнювання температури по перерізу валків протягом 3 годин при температурі 600°C та охолодження зі швидкістю 25-30 °C/год до 100 °C. В результаті такого термічного оброблення пластинчастий перліт повністю зникав в усіх валках. Перетворення вторинного аустеніту проходило з утворенням собітоподібного та зернистого перліту. У деяких ділянках дендритних гілок за евтектичного перетворення цементит нашаровувався на надлишковому, а ферит виділявся у вигляді невеликих ділянок. Кількість евтектичного цементиту зменшувалася на 3-8%. Механічні властивості термооброблених чавунів були більшими, ніж чавунів валків у литому стані на 8...96%.

Висновки. Одним з важливих питань для теорії та практики виробництва чавунних прокатних валків є дослідження впливу їх термічного оброблення. В результаті проведених експериментів встановлено, що оптимальним режимом подвійного відпалу є: 1 стадія – температура 1000°C, витримка 1 год, 2 стадія – температура 600°C, витримка 3 год, за яких комплексний показник якості – узагальнена функція бажаності G має максимальне значення – 0,682, у 2,2 рази більшою за вихідний литий стан. В результаті проведених досліджень була розроблена, випробувана та рекомендована до впровадження технологія високотемпературного термічного оброблення прокатних валків виконання ЛШНМ-58.

ЛІТЕРАТУРА

1. Кривошеєв А. Є. Литі валки. Теоретичні та технологічні основи виробництва. – М.: Металургвид, 1957. – 360 с.
2. Білай Г. Є. Дослідження впливу модифікації на кристалізацію чавуну, структури і властивостей листопрокатних валків: Автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.323 / Дніпропетр. металург. і-т. – Дніпропетровськ, 1967. – 23 с.
3. Колотило Є. В. Дослідження і удосконалення виробництва листопрокатних валків з модифікованих чавунів: Автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.16.04 / Дніпропетр. металург. і-т. – Дніпропетровськ, 1977. – 23 с.
4. Іванова Л. Х. Теоретичні основи та практичні методи одержання литих прокатних валків із комплексномодифікованих чавунів: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.16.04 / Націон. металург. академія України. – Дніпропетровськ, 2008. – 35 с.
5. Іванова Л. Х. Розробка технологічних способів зниження напружень в чавунних валках і підвищення їх міцності: дис. ... канд. техн. наук : 16.05.04 / Дніпропетр. металург. і-т. – Дніпропетровськ, 1984. – 275 с.
6. Harrington E. C. The Desirability Function // Industrial Quality Control. – 1965. – Vol.21, №10. – P. 494–498.

STUDY OF THE EFFECT OF DOUBLE ANNEALING ON THE QUALITY OF SPHEROIDAL GRAPHITE CAST IRONS

Liudmyla Ivanova, Yevhen Kolotylo, Andrii Bilyi, Vladyslav Shemet

Abstract. *The study of the influence of double annealing on the structure and properties of rolled cast irons of the LShNM-58 design was carried out. As a result of the studies conducted using a complex plan obtained by combining plan 24 with a 4×4 Latin square, the optimal double annealing mode was selected: stage I - temperature 1000 °C, holding*

time 1 h; stage II - temperature 600 °C, holding time 3 h. Double annealing of cast irons of the working layer led to spheroidization of pearlite and graphitization of pearlite and eutectic cementite, in cast irons from the necks of the rolls - to a structure heterogeneous in morphology of eutectoid transformation products, which included graphite, ferrite, pearlite of different dispersion, bainite, martensite and phosphide eutectic. At the same time, the strength properties of heat-treated cast irons were higher than those of cast iron rolls by 8...96%. As a result of the research, a technology for high-temperature heat treatment of rolling rolls of the LShNM-58 design was developed, tested and recommended for implementation.

Keywords: cast iron, rolling roll, double annealing, structure, property

REFERENCES

1. Kryvosheyev A. YE. Lyti valky. Teoretychni ta tekhnolohichni osnovy vyrobnytstva. – M.: Metalurhvyd, 1957. – 360 s. [in Ukrainian].
2. Bilay H. YE. Doslidzhennya vplyvu modyfikatsiyi na krystalizatsiyu chavunu, struktury i vlastyivostey lystoprokatnykh valkiv: Avtoref. dys. ... kand. tekhn. nauk : 05.323 / Dnipropetr. metalurh. i-t. – Dnipropetrovs'k, 1967.– 23 s. [in Ukrainian].
3. Kolotylo YE. V. Doslidzhennya i udoskonalennya vyrobnytstva lystoprokatnykh valkiv z modyfikovanykh chavuniv: Avtoref. dys. ... kand. tekhn. nauk : 05.16.04 / Dnipropetr. metalurh. i-t. – Dnipropetrovs'k, 1977.– 23 s. [in Ukrainian].
4. Ivanova L. KH. Teoretychni osnovy ta praktychni metody oderzhannya lytykh prokatnykh valkiv iz kompleksnomodyfikovanykh chavuniv: Avtoref. dys. ... d-ra tekhn. nauk : 05.16.04 / Natsion. metalurh. akademiya Ukrayiny. – Dnipropetrovs'k, 2008. – 35 s. [in Ukrainian].
5. Ivanova L. KH. Rozrobka tekhnolohichnykh sposobiv znyzhennya napruzhen' v chavunnykh valkakh i pidvyshchennya yikh mitsnosti: dys. ... kand. tekhn. nauk : 16.05.04 / Dnipropetr. metalurh. i-t. – Dnipropetrovs'k, 1984. – 275 s. [in Ukrainian].
6. Harrington E. C. The Desirability Function // Industrial Quality Control.– 1965.– Vol.21, №10.– P. 494–498.

ЗАСТОСУВАННЯ ГЕНЕТИЧНОГО АЛГОРИТМА ДО РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧІ РОЗМІЩЕННЯ-АКТИВАЦІЇ

Сергеев О.С.¹

¹ НТУ «Дніпровська політехніка», Україна

Анотація. У роботі розглянуто застосування генетичного алгоритму для розв'язання задачі розміщення-активації. Наголошено на актуальності проблеми медичної логістики, особливо в умовах кризових ситуацій. Автором сформульовано практичну постановку задачі та запропоновано математичну модель. Відповідно до математичної постановки, отримано, що задача є комбінованою задачею неперервно-дискретної оптимізації, в якій неперервна оптимізація використовується для розміщення центрів дистрибуції а дискретна - для активації субрегіональних центрів. Для розв'язання задачі використовується генетичний алгоритм із пріоритетним кодуванням хромосом, у якому застосовано зважений кросовер. Відбір хромосом здійснюється методом рулетки, а операція мутації реалізована у вигляді змішаної адаптивної процедури з двома можливими варіантами змін: заміною або вставкою. Результати роботи можуть бути застосовні до покращення логістичних процесів у сфері медичної логістики регіонального рівня.

Ключові слова: дискретна оптимізація, неперервна оптимізація, генетичний алгоритм, логістика, транспортування

Система медичної логістики України останніми роками перебуває під впливом низки серйозних кризових ситуацій, що створює значні виклики та додаткове навантаження. Зокрема, пандемія COVID-19 вказала на недостатню готовність логістичних структур до оперативного забезпечення населення необхідними ліками та імунобіологічними препаратами. Повномасштабне вторгнення 2022 року виявило нагальну потребу в ефективному транспортуванні та розподілі значних обсягів лікарських засобів як гуманітарної допомоги. Це зумовило необхідність відкриття нових розподільчих центрів у регіонах. Перейдемо до розгляду практичної постановки проблеми. Для оперативного реагування на критичну ситуацію створюється M субрегіональних центрів (СРЦ), які забезпечують накопичення, зберігання та первинний розподіл ліків і виробів медичного призначення (ВМП). Через обмежені ресурси та логістичні труднощі урядом активується

лише L з M центрів, обраних за географічним розташуванням, транспортною доступністю, ємністю складів та швидкістю реагування. Активовані СРЦ здійснюють перерозподіл до K центрів дистрибуції, розташованих в області, які вже надають послуги та медичні засоби населенню своїх зон. Саме ці центри необхідно розмістити. Завдання планування – визначити комбінацію регіональних і субрегіональних центрів, місця розташування центрів дистрибуції та розробити транспортний план, що мінімізує витрати й повністю задовольняє потреби населення у ліках і ВМП. Ця задача може бути описана за допомогою математичної моделі задачі розміщення-активації, а саме:

$$\min_{\theta(\cdot) \in \Theta, \tau^I \in \Omega^N, v \in R_{NM}^+} \sum_{j=1}^M A_j \theta_j + \sum_{i=1}^N \int_{\Omega_i} c_i^I(x, \tau_i^I) \rho(x) dx + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M c_{ij}^I v_{ij}^I, \quad (1)$$

за обмежень:

$$\sum_{j=1}^M v_{ij}^I \theta_j = \int_{\Omega_i} \rho(x) dx, \quad i = \overline{1, N}, \quad (2)$$

$$\int_{\Omega} \rho(x) dx \leq \sum_{j=1}^M b_j^{II} \theta_j, \quad j = \overline{1, M}, \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^N v_{ij}^I \leq b_j^{II}, \quad \sum_{j=1}^M \theta_j \leq L, \quad j = \overline{1, M}, \quad (4)$$

$$\bigcup_{i=1}^N \Omega_i = \Omega, \quad \text{mes}(\Omega_i \cap \Omega_j) = 0, \quad i \neq j, \quad i, j = \overline{1, N}, \quad (5)$$

$$v_{ij}^I \geq 0, \quad i, j = \overline{1, N}, \quad \theta_j \in \{0; 1\}, \quad j = \overline{1, M}, \quad (6)$$

$$\tau^I = (\tau_1^I, \tau_2^I, \dots, \tau_N^I), \quad \tau^I \in \Omega^N. \quad (7)$$

У цій моделі:

Ω – зона обслуговування клієнтів;

Ω_i – обслуговування клієнтів для i -го ЦД;

N – необхідна кількість ЦД;

M – загальна кількість СРЦ, доступних для активації;

L – максимальна кількість можливих активованих СРЦ;

J – набір субрегіональних центрів, доступних для активації;

b_j^{II} – пропускна здатність j -го СРЦ;

A_j – витрати на активацію j -го СРЦ;

$c_i^I = c(x, \tau_i^I)$ – транспортні витрати між ЦД i та клієнтом у точці x ;

$c_{ij} = c(\tau_i^I, \tau_j^{II})$ – транспортні витрати між СРЦ та ЦД;

$\rho(x)$ – попит на лікарські засоби у точці x області;

$\tau_i^r = (\tau_{i1}^r, \tau_{i2}^r)$ – координати ЦД ($r=I$) або СРЦ ($r=II$);

v_{ij}^I – об'єм (в одиницях ваги) лікарських засобів та медичного обладнання, що транспортується з СРЦ j до ЦД i ;

$\theta_j = 1$, якщо СРЦ j активовано; $\theta_j = 0$ інакше.

Для розв'язання оптимізаційних задач ми пропонуємо використати комбінацію підходів двох теорій: еволюційний підхід, а саме генетичний алгоритм [1] для дискретної оптимізації; застосування підходів із теорії оптимального розбиття множин [2] для неперервної оптимізації. Загальна схема розв'язання наведена на рис. 1, де представлені основні етапи запропонованого загального алгоритму розв'язання задачі, що відображає класичну структуру генетичного алгоритму. Основна особливість запропонованого підходу полягає в етапі оцінювання хромосом. Розглянемо детальніше процедуру оцінювання. Для цього спочатку здійснюється розміщення центрів дистрибуції за допомогою модуля розміщення [3], що використовує методи з теорії оптимального розбиття множин. Після цього виконується декодування хромосоми та активація складів регіонального центру. В результаті отримується схема перевезень та визначається фітнес хромосоми. Алгоритм складається з наступних основних кроків.

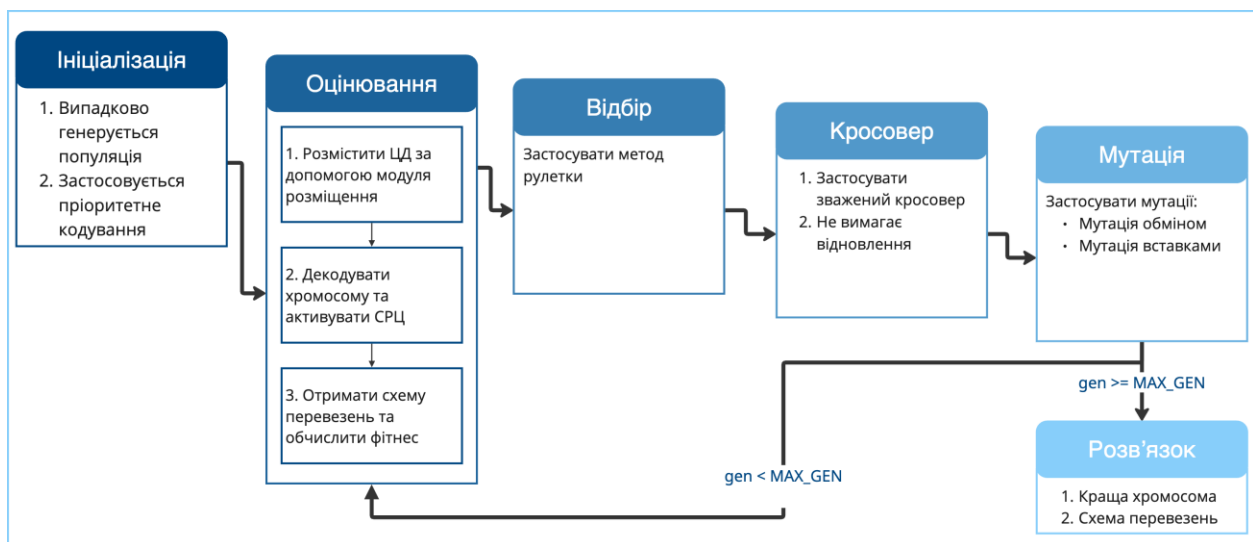


Рисунок 1 – Основні кроки розв'язання задачі

На першому етапі створюється початкова популяція шляхом випадкової генерації потенційних рішень. Плани перевезень представляються за допомогою пріоритетного кодування, після чого здійснюється їх перетворення на хромосоми.

На другому етапі проводиться оцінювання отриманих хромосом шляхом обчислення значення цільової функції. Для кожної хромосоми визначаються оптимальні місця розташування ЦД, шляхом розв'язання відповідної задачі із застосуванням модуля розміщення.

Після оцінювання виконується відбір найкращих хромосом за методом рулетки. Для схрещування застосовується зважений кросинговер, що дозволяє уникнути додаткових процедур відновлення коректності рішення. Мутація реалізована у вигляді змішаної адаптивної процедури, яка передбачає два варіанти: заміну та вставку.

Цикл ітеративно повторюється до досягнення критерію зупинки, яким виступає максимальна кількість поколінь. В результаті виконання алгоритму отримується хромосома з найкращою пристосованістю, яка представляє план транспортування.

Висновки. У роботі досліджено задачу розміщення-активації. Наголошено на актуальності цієї проблеми, особливо за умов виникнення кризових ситуацій, коли якісне й оперативне управління логістичними процесами має критичне значення для забезпечення населення необхідними медичними ресурсами.

У рамках дослідження запропоновано математичну модель задачі, яка поєднує неперервну оптимізацію для визначення оптимального розташування центрів дистрибуції (ЦД) та дискретну оптимізацію для активації субрегіональних центрів (СРЦ).

Розроблено комбінований алгоритм розв'язання на основі генетичного алгоритму, що використовує пріоритетне кодування хромосом. В алгоритмі реалізовано зважений кросовер та відбір хромосом методом рулетки. Мутація здійснюється за допомогою змішаної адаптивної процедури із двома варіантами: заміною або вставкою.

Отримані результати можуть бути використані для покращення регіональних логістичних процесів у сфері медичного забезпечення.

ЛІТЕРАТУРА

1. Gen M., Lin L. Genetic algorithms and their applications. *Springer handbook of engineering statistics*. 2012. P. 635–674. URL: https://doi.org/10.1007/978-1-4471-7503-2_33.
2. Two-stage problems of optimal location and distribution of the humanitarian logistics system's structural subdivisions / L. S. Koriashkina et al. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2024. No. 1. P. 130–139. URL: <https://doi.org/10.33271/nvngu/2024-1/130>.
3. Сергеев О. С., Ус С. А. Дослідження двох підходів до розв'язання двоетапної задачі розміщення-активації. *Науковий вісник Ужгородського університету. Серія: Математика і інформатика*. 2024. Т. 45, № 2. С. 249–258. URL: [https://doi.org/10.24144/2616-7700.2024.45\(2\).249-258](https://doi.org/10.24144/2616-7700.2024.45(2).249-258).

APPLICATION OF A GENETIC ALGORITHM TO SOLVE THE LOCATION- ACTIVATION PROBLEM

Oleksii Serhieiev

Abstract. *The work considers the use of a genetic algorithm to solve the problem of placing and activating logistic network objects. The urgency of the problem in medical logistics, especially in crisis situations, is emphasized. The author formulates a practical statement of the problem and develops a corresponding mathematical model. According to the mathematical formulation, the problem is a combined optimization problem, where there is a continuous optimization problem for the location of the distributional centers (DC) and a discrete optimization problem for the activation of the subregional centers (SRC). To solve the problem, we use a genetic algorithm with priority coding of chromosomes, which uses a weighted crossover. The chromosomes are selected by the roulette method, and the mutation operation is implemented as a mixed adaptive procedure with two possible variants of changes: swap or insertion. The results of the work can be applied to improve logistic processes in the field of medical logistics at the regional level.*

Keywords: *discrete optimization, continuous optimization, genetic algorithm, logistics, transportation*

REFERENCE

1. Gen M., Lin L. Genetic algorithms and their applications. *Springer handbook of engineering statistics*. 2012. P. 635–674. URL: https://doi.org/10.1007/978-1-4471-7503-2_33.
2. Two-stage problems of optimal location and distribution of the humanitarian logistics system's structural subdivisions / L. S. Koriashkina et al. *Naukovyi Visnyk*

Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. 2024. No. 1. P. 130–139.
URL: <https://doi.org/10.33271/nvngu/2024-1/130>.

3. Serhieiev O. S., Us S. A. Doslidzhennia dvokh pidkhodiv do rozviazannia dvoetapnoi zadachi rozmishchennia-aktyvatsii [in Ukrainian]. Naukovyi visnyk Uzhhorodskoho universytetu. Serii: Matematyka i informatyka. 2024. T. 45, № 2. S. 249–258. URL: [https://doi.org/10.24144/2616-7700.2024.45\(2\).249-258](https://doi.org/10.24144/2616-7700.2024.45(2).249-258).

ПРОБЛЕМА РЕНОВАЦІЇ ТЕХНІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ ДОВГОТРИВАЛОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

Петрина Д.Ю.¹, Харун В.Р.², Петрик І.Я.²

¹Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,
д.т.н., професор, Україна

²Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,
к.т.н., доцент, Україна

Анотація. *Вихід з ладу технічного обладнання через проблеми довготривалої експлуатації, а також реновація та ремонт цього обладнання – важлива проблема багатьох підприємств, що працюють з машинами виробництва минулого століття. Технічний знос, моральне старіння, економічна неефективність, екологічні проблеми – ось далеко не вся проблематика такого обладнання. Процес реновації повинен відбуватися з дотриманням якісної оцінки технічного стану, контролю якості всіх процесів реновації з дотриманням всіх її технологічних процесів. Сертифікація відновленого обладнання повинна відбуватися з врахуванням його зносу та об'єму ремонтних робіт. Методи неруйнівного контролю дозволяють забезпечити оцінку як поточного стану, так і якості проведення реноваційних робіт. Співпраця з надійними постачальниками обладнання, які забезпечать висококваліфікований монтаж та проведення необхідного його налагодження – один з ефективних методів безперебійної роботи підприємства.*

Ключові слова: *реновація, технічний знос, довготривала експлуатація, методи неруйнівного контролю, сертифікація.*

Більшість підприємств та заводів України працюють на обладнанні, яке було введено в дію за часи Радянського Союзу у середині та другій половині ХХ століття, і вже вичерпало свій нормативний термін експлуатації. Довготривала експлуатація призводить до зносу конструкцій, появи тріщин, корозії, втрати міцності матеріалів та інших дефектів, що загрожують безпеці людей та стійкості будівель (1-3).

Виробничі необхідності великих заводів та підприємств вимагають використовувати таке обладнання, яке не втратило своєї працездатності, проте потребує додаткової та частішої оцінки технічного стану. Закупівля нового

обладнання вимагає значних капіталовкладень і тому, реновація існуючих конструкцій є, як правило, економічно вигіднішим рішенням.

Основна проблематика експлуатації такого обладнання:

Технічний знос: Фізичне зношування деталей, механізмів та вузлів обладнання призводить до зниження його продуктивності, збільшення витрат на ремонт та підвищення ризику аварійних ситуацій. Як приклад можна навести знос поверхні барабана лебідки вантажопідіймального механізму (ВПМ) мостового крану (рис.1).



Рисунок 1 – Барабан лебідки ВПМ після тривалого терміну експлуатації

Навіть неозброєним оком видно втрату циліндричності барабану та знос витків гвинтових канавок.

Моральне старіння: Розробка нових технологій та матеріалів робить старе обладнання менш конкурентоспроможним, знижує його енергоефективність та обмежує можливості виробництва нових видів продукції. Наприклад, використання кранових електродвигунів з контактними кільцями та фазним ротором, які оснащені релейно-контактною системою керування та їх альтернатива – сучасні компактні частотні перетворювачі. Заміна такої системи керування на сучасні компактні частотні перетворювачі дозволяє знизити споживання електроенергії, скоротити витрати на техобслуговування [1].

Економічна неефективність: Збереження старого обладнання часто пов'язане з високими витратами на ремонт та обслуговування, а також з втратами виробництва через простой.

Екологічні проблеми: Старе обладнання зазвичай має нижчі екологічні стандарти, що призводить до збільшення викидів шкідливих речовин та забруднення довкілля.

Інтеграція в сучасні виробничі процеси: Старе обладнання часто важко інтегрувати в сучасні автоматизовані виробничі системи, що обмежує можливості впровадження нових технологій управління та контролю.

Реновація – це комплексний процес, який вимагає не лише фінансових інвестицій, але й глибокого аналізу технічного стану обладнання, оцінки економічної ефективності різних варіантів модернізації, а також врахування специфіки виробництва. Процес відновлення обладнання може бути достатньо трудомістким та багатоетапним. Необхідний системний аналіз технічного стану підприємства, розробка оптимальної стратегії модернізації з урахуванням фінансових можливостей та перспектив розвитку виробництва. Важливо провести детальний економічний аналіз різних варіантів реновації, враховуючи витрати на модернізацію, очікуваний приріст продуктивності, зниження витрат на енергію та ремонт, а також термін окупності інвестицій.

Оцінка технічного стану з метою виявлення дефектів та визначення обсягів існуючих робіт, розробка проекту реновації, безпосередньо сам ремонт, та регулярний контроль якості на всіх етапах реновації – основні технічні завдання, які стоять перед відповідними службами підприємств та заводів.

На практиці керівники відділень та працівники стикаються з наступними реаліями:

Основним, і досить часто єдиним методом виявлення дефектів на таких заводах – це візуальний огляд.

Відсутність обладнання (спектрографів, дефектоскопів і.т.п.) для аналізу механічних характеристик та пошкоджуваності.

Тендерна політика у питаннях реновації призводить до вибору партнерів за принципом меншої ціни, що не завжди гарантує якісно проведених заходів по ремонту обладнання.

Недотримання технологічних процесів виготовлення нових деталей та вузлів, що призводить до швидкого виходу з ладу цілого обладнання.

Відсутній контроль якості виконаних робіт по реновації.

Для контролю працездатності машин і механізмів, які повинні проходити сезонну сертифікацію найчастіше запрошуються контролюючі організації, які і

проводять цей контроль, виявляють та дають рекомендації щодо подальшої доцільності проведення їх реновації. Вузлові ремонти та заміна певних деталей виконують при повному виході з ладу робочого обладнання або ж при візуальному виявленні дефектів. Такого виду ремонтні роботи є скоріш несистемними і без відповідного контролю стану матеріалу та якості виконаних робіт можуть в подальшому створювати прецеденти аварійних ситуацій.

Ще одним з ключових моментів реновації обладнання – це тендерне проведення таких операцій. Досить часто замовник – підприємство, повинно вибирати найдешевших виконавців відповідних робіт, які досить часто не дотримуються технології процесу або термообробки, що призводить до високого відсотку браку у виготовленні. Відсутність обладнання для проміжного контролю як у замовника так і у виконавця призводить до подальших поломок а, відповідно, і до економічних втрат.

Тому на нашу думку проблему реновації промислових підприємств слід виконувати дотримуючись комплексного підходу з дотриманням відповідних рекомендацій, технологій та поетапного контролю.

Одним з відомих методів контролю якості матеріалу є метод неруйнівного контролю. Його застосування дозволяє точніше і швидше виявляти проблемні місця у обладнанні, та спростить контроль процесу реновації на всіх етапах.

Ще одним із ефективних заходів у проведенні реновації є співпраця з надійними постачальниками обладнання, які забезпечать не тільки поставку обладнання, але й його встановлення, налагодження та обслуговування.

При проведенні ремонтних робіт необхідно створювати проектні групи з залученням фахівців різного профілю для розробки та реалізації проекту, при потребі залучати зовнішніх консультантів. Повинен відбуватися строгий контроль якості виконання робіт на всіх етапах проекту.

Висновок. Реновація технічного обладнання промислових підприємств – це стратегічно важливий крок для забезпечення довгострокового успіху підприємства. Вона дозволяє не тільки оновити виробничі потужності, але й підвищити конкурентоспроможність, знизити витрати та поліпшити якість

продукції. Необхідно розглядати реновацію не як витрати, а як інвестиції, які принесуть віддачу в довгостроковій перспективі, вона має бути частиною загальної стратегії розвитку підприємства. Великі проекти реновації краще розбивати на менші етапи для зниження ризиків. Залучення досвідчених партнерів – постачальників обладнання, інженерних компаній та консультантів – один з ключових кроків для успішної реновації та функціонування підприємства.

ЛІТЕРАТУРА

1. Модернізація вантажопідіймальних кранів
URL: <https://interteh.com.ua/services/modernizacziya-kranov/> (дата звернення: 30.01.2025).
2. Yasniy, P. & Nykyforchyn, Hryhoriy & Iasniy, Volodymyr & Zvirko, Olha. (2022). Preface – In service Damage of Materials: Diagnostics and Prediction. Procedia Structural Integrity. 36. 1-2. 10.1016/j.prostr.2021.12.074.
3. Правила охорони праці під час експлуатації вантажопідіймальних кранів, підіймальних пристроїв і відповідного обладнання: Наказ Міністерства соціальної політики України № 62 від 19.01.2018. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0244-18> (дата звернення 05.02.2025).

THE PROBLEM OF RENOVATION OF LONG-TERM OPERATION TECHNICAL EQUIPMENT OF INDUSTRIAL ENTERPRISES

Petryna D.Yu., Harun V.R., Petryk I.Ya.

Abstract. *Failure of technical equipment due to problems of long-term operation, as well as renovation and repair of this equipment is an important problem of many enterprises working with machines manufactured in the last century. Technical wear, obsolescence, economic inefficiency, environmental problems are far from all the problems of such equipment. The renovation process must take place with a qualitative assessment of the technical condition, quality control of all renovation processes with compliance with all its technological processes. Certification of restored equipment must take place taking into account its wear and tear and the volume of repair work. Non-destructive testing methods allow for an assessment of both the current condition and the quality of renovation work. Cooperation with reliable equipment suppliers who will provide highly qualified installation and necessary adjustment is one of the effective methods for uninterrupted operation of the enterprise.*

Keywords: *renovation, technical wear, long-term operation, non-destructive testing methods, certification.*

REFERENCE

1. Modernization of lifting cranes
URL: <https://interteh.com.ua/services/modernizacziya-kranov/> (access date: 01/30/2025).
2. Yasniy, P. & Nykyforchyn, Hryhoriy & Iasniy, Volodymyr & Zvirko, Olha. (2022). Preface – In service Damage of Materials: Diagnostics and Prediction. Procedia Structural Integrity. 36. 1-2. 10.1016/j.prostr.2021.12.074.
3. Occupational safety rules during the operation of cranes, lifting devices and related equipment: Order of the Ministry of Social Policy of Ukraine No. 62 dated January 19, 2018.
URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0244-18> (access date February 5, 2025).

ОПТИМІЗАЦІЯ ХІМІЧНОГО СКЛАДУ СТАЛІ МАРКИ ОС ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ТВЕРДОСТІ

Поворотня І.Р.¹, Сафронова О.А.², Подольський Р.В.³, Кононенко Г.А.⁴

¹ІЧМ НАН України, канд. техн. наук, Україна

²ІЧМ НАН України, аспірант, Україна

³ІЧМ НАН України, докт. філ., Україна

⁴ІЧМ НАН України, НТУ «Дніпровська Політехніка», докт. техн. наук., Україна

Анотація. У представлений роботі здійснено комплексний аналіз оптимізації хімічного складу сталі в межах існуючих марок із використанням концепції спрямованого хімічного зв'язку. Цей науковий підхід базується на уявленні про металевий розплав як єдину хімічну систему, де взаємодія між елементами визначає властивості матеріалу. Основна увага приділяється впливу варіацій вмісту ключових матричних елементів — вуглецю, кремнію та марганцю — на зарядовий стан системи, що описується параметром ZY . Під час розрахункового експерименту встановлено, що ефективне функціонування металевої системи забезпечується при співвідношенні Mn/Si у межах 2,8–3,2. Досягнення цього діапазону переважно досягається за рахунок регулювання вмісту кремнію, що сприяє збереженню хімічної рівноваги в розплаві. Зі збільшенням цього співвідношення понад оптимальні межі зростає вплив надлишкового марганцю, що може негативно позначатися на стабільності системи та властивостях сталі. Це свідчить про необхідність точного контролю хімічного складу для отримання матеріалу з бажаними експлуатаційними характеристиками.

Ключові слова: залізнична вісь, хімічний склад, вуглець, кремній, марганець, співвідношення, механічні властивості.

Враховуючи особливості діапазонів хімічного складу в рамках марочного (матричного) є значна важкість не тільки у відтворення різних комбінацій хімічного складу, але і в визначенні оптимальних комбінацій введення хімічних елементів їх засвоєння та вплив на кінцеві механічні властивості [1]. Таким чином, застосування концепції спрямованого хімічного зв'язку дозволяє на етапі розрахунків виявляти оптимальні співвідношення легуючих елементів, що забезпечують бажані фізико-хімічні властивості сплаву. Це дозволяє суттєво скоротити обсяг експериментальних досліджень та знизити витрати на створення нових матеріалів з покращеними характеристиками.

Розрахунок для сталі марки ОС з хімічним складом досліджуваної сталі відповідає хімічному складу, зазначеному у стандарті ДСТУ 31334:2009.

Зміна матричних елементів здійснювалась від мінімального до максимального значення згідно вказаного вмісту з відповідним кроком (С з кроком 0,008; Mn з кроком 0,033; Si з кроком 0,022).

Сталь марки ОС частково входить у інтервал $1,2 \leq ZY \leq 1,21$, який був визначений на попередніх етапах досліджень, та було встановлено, що за менших значень ZY проведення нормалізації після гарячої пластичної деформації вуглецевих сталей не призводить до підвищення твердості. На рис.1 дані, які задовольняють вказану вимогу, розташовані нижче червоної лінії. Усі елементи матричної системи у конкретному випадку для сталі марки ОС призводять до зростання значень параметру ZY . Встановлено, що інтенсивність впливу елементів на параметр ZY різна, за відносного значення 0,5-0,6 відбувається зміна найбільш ефективного параметру.

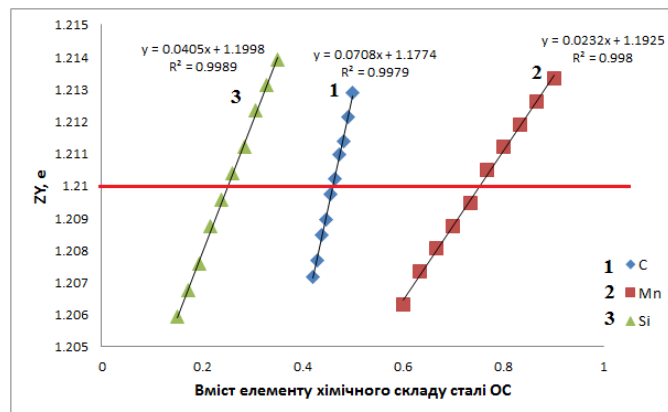


Рисунок 1 – Вплив зміни вмісту вуглецю, кремнію, марганцю на параметр міжатомної взаємодії – ZY

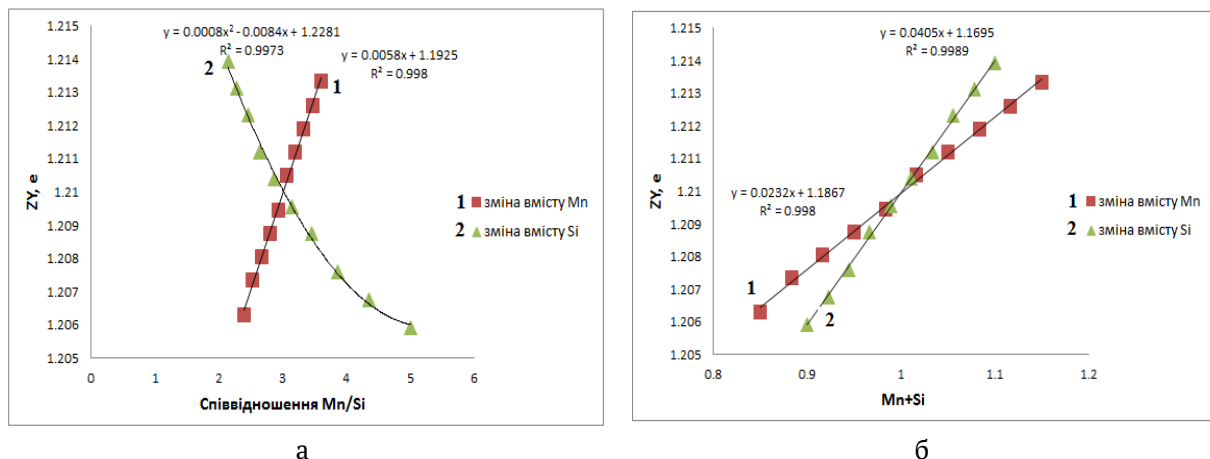


Рисунок 2 – Взаємозв'язок зарядового стану сталі ОС: а) з співвідношенням Mn/Si; б) з (Mn+Si)

В результаті проведеного математичного експерименту встановлено, що за значень Mn/Si для сталі марки ОС на рівні 2,8-3,2 відбувається зміна найбільш інтенсивного впливу співвідношення елементів на ZY сталі. До цього значення найбільший вплив та спадаючий характер функції носить збільшення параметру Mn/Si за рахунок зміни кремнію, а за подальшого збільшення Mn/Si вже стає більш ефективним збільшення вмісту марганцю, який має зростаючий характер. Таким чином, для підвищення параметру ZY, збільшення якого призводить до підвищення твердості необхідно віддавати перевагу збільшенню марганцю після значення Mn/Si на рівні 2,8-3,2, а до цього інтервалу – збільшенню вмісту кремнію. Найбільші значення параметру ZY спостерігали за змінювання кремнію при постійних середніх значеннях вуглецю та марганцю, ця закономірність з високою точністю ($R^2=0,997$) описується параболічною функцією.

В результаті дослідження впливу сумарного вмісту кремнію та марганцю на зарядовий стан сталі марки ОС встановлено, що в інтервалі значень 0,98-1,02 відбувається зміна провідного елементу, що впливає на цей параметр. До вказаного інтервалу найбільший вплив чинить зміна вмісту марганцю, після цього інтервалу – кремнію. Задля досягнення максимальних значень твердості (які спостерігається за високих значень параметру ZY) залізничних осей марки ОС рекомендовано дотримуватись наступних підходів: виходячи з аналізу рис. 1 та 2 вміст кремнію має бути наближеним до максимального в межах марочного (0,35%), при цьому вміст вуглецю та марганцю може бути на

середньому рівні (0,75% марганцю та 0,46% вуглецю). Подальше збільшення вуглецю і марганцю також може дати певний приріст твердості, однак їх вплив не має високої ефективності. Важливо відзначити, що за хімічного складу сталі для якого параметр ZY відповідає діапазону 1,20-1,21 вплив термічної обробки на твердість відсутній. Тому, з точки зору забезпечення максимального рівня твердості за мінімальної кількості обробок, для сталей з хімічним складом, який відповідає вказаній умові (рис. 1, нижче червоної лінії) можна не проводити термічне оброблення після гарячої пластичної деформації для підвищення твердості. Рівень червоної лінії відповідає середнім значенням вмісту елементів. Таким чином, за зменшення вмісту кремнію з максимального до середнього є можливість відмовитись від цілого етапу виготовлення осі – термічного оброблення, при цьому твердість матиме задовільний рівень.

Висновки. Дослідження показало, що для сталі марки ОС оптимальне співвідношення Mn/Si для підвищення твердості знаходиться в діапазоні 2,8-3,2. До цього значення ефективніше зменшувати вміст кремнію, а після – збільшувати вміст марганцю. Інтервал значень ZY , що визначає зміну інтенсивності впливу, становить 1,215-1,217 е.

Розроблені загальні рекомендації щодо вибору раціонального хімічного складу. Для забезпечення максимальної твердості може бути використаний раціональний підхід: вміст кремнію має бути наближеним до максимального рівня в межах марочного, вміст вуглецю і марганцю – не нижче середнього. Для сталей марок ОС наступна термічна обробка після гарячої пластичної деформації забезпечує підвищення твердості. Для сталі марки ОС за певного хімічного складу наступна нормалізація не призведе до суттєвого підвищення твердості, тобто може бути забезпечений достатній рівень твердості без проведення вказаного етапу виробництва.

ЛІТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Clarke A.J., Miller M., Field R., Coughlin D., Gibbs P., Clarke K.D., Alexander D., Powers K., Papin A.P., Krauss G. Atomic and nanoscale chemical and structural changes in quenched and tempered 4340 steel. Acta Materialia. – 2014, 77. P.17–27

OPTIMIZATION OF THE CHEMICAL COMPOSITION OF OS STEEL TO INCREASE HARDNESS

Povorotnya I.R., Safronova O.A., Podolskyi R.V., Kononenko G.A.

Abstract. *In the presented work, a comprehensive analysis of the optimization of the chemical composition of steel within the existing grades using the concept of directional chemical bonding has been carried out. This scientific approach is based on the idea of a metal melt as a single chemical system, where the interaction between elements determines the properties of the material. The main attention is paid to the influence of variations in the content of key matrix elements — carbon, silicon and manganese — on the charge state of the system, which is described by the parameter ZY. During the calculation experiment, it was established that the effective functioning of the metal system is ensured at a Mn/Si ratio within 2.8–3.2. Achieving this range is mainly achieved by regulating the silicon content, which contributes to maintaining chemical equilibrium in the melt. With an increase in this ratio beyond the optimal limits, the influence of excess manganese increases, which can negatively affect the stability of the system and the properties of the steel. This indicates the need for precise control of the chemical composition to obtain a material with the desired performance characteristics.*

Keywords: *railway axle, chemical composition, carbon, silicon, manganese, ratio, mechanical properties.*

ВДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДОЛОГІЇ ЗАСТОСУВАННЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ

Сазонов П.О.¹, Клименко С.В.²

¹Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, аспірант, Україна

²Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара,

к.т.н., доцент, Україна

Анотація. Ультразвуковий неруйнівний контроль (УЗК) є одним із найефективніших та найпоширеніших методів для виявлення внутрішніх дефектів у матеріалах і конструкціях різного призначення. УЗК застосовується для контролю якості складних технічних об'єктів (СТО), в тому числі й об'єктів підвищеної небезпеки, де навіть незначні дефекти можуть призвести до серйозних наслідків. Однак існуючі методи УЗК мають певні обмеження, зокрема, щодо точності оцінки дефектів. Це пов'язано з розбіжністю амплітуд сигналів, які відбиваються від різних відбивачів у контрольних зразках, що використовуються для налаштування апаратури. З метою підвищення точності проведених вимірювань були розроблені аналітичні моделі амплітуд сигналів від відбивачів. Ці моделі дозволяють удосконалити методологію УЗК, зокрема, завдяки впровадженню обґрунтованих поправок, що дозволяють усунути розбіжності амплітуд і покращити точність результатів контролю. Впровадження таких підходів сприяє підвищенню надійності та безпеки технічних об'єктів, а також зменшенню ризику виникнення аварійних ситуацій через непомічені дефекти.

Ключові слова: ультразвуковий контроль (УЗК), неруйнівний контроль (НК), складні технічні об'єкти (СТО), метод, зразок, сигнал, дефект, модель дефекту.

Складні технічні об'єкти – це багатокomпонентні системи, що поєднують високий рівень технологічної складності, інтеграцію різних механізмів та систем керування. До них належать інфраструктурні об'єкти, енергетичні установки, транспортні системи, а також авіаційна та космічна техніка. Їхня надійність і безпека залежать не лише від якості виготовлення окремих деталей, а й від ефективності взаємодії всіх компонентів, роботи систем моніторингу та управління. Застосування методів неруйнівного контролю постає єдиним засобом контролю якості елементів складних технічних об'єктів, який за визначенням здатний забезпечити належний рівень контролю, який не шкодить об'єкту контролю та не виводить його з ладу. Ультразвуковий неруйнівний контроль, завдяки перевагам у вигляді

відсутності шкоди оточуючому середовищу та оператору, швидкості проведення контролю, можливості протоколювання та автоматизації, можливості виявляти внутрішні дефекти, високої розподільчої здатності, можливості контролю малих та складних за формою об'єктів, все більшій доступності з розвитком технічного прогресу відіграє ключову роль у забезпеченні безпеки складних технічних об'єктів (СТО). Він дозволяє виявляти потенційні дефекти на ранніх стадіях, запобігати аварійним ситуаціям і забезпечувати стабільну експлуатацію, здійснювати моніторинг розвитку дефектів у процесі експлуатації. Високотехнологічне виробництво потребує сучасних систем контролю, які гарантують високу якість продукції та довговічність інженерних конструкцій. Безпека інженерних об'єктів – це комплексний процес, що включає аналіз проектних рішень, контроль якості матеріалів, моніторинг стану конструкцій та застосування передових методів неруйнівного контролю. Наявність дефектів у матеріалах може призвести до значних економічних втрат та аварій. Особливу увагу приділяють критичним зонам, де можуть виникати тріщини, корозія або інші пошкодження, що впливають на міцність і стійкість конструкції [1-3].

Ультразвукові методи неруйнівного контролю дозволяють виявляти дефекти у внутрішній структурі матеріалів без їх руйнування, що робить ці методи незамінними у сучасному виробництві [1]. Завдяки швидкості проведення контролю, можливості автоматизації та електронного протоколювання результатів, ультразвукові методи контролю не лише виявляють приховані дефекти, а й дозволяють оцінити їхній розвиток у динаміці. Це дає змогу приймати вчасні інженерні рішення та запобігати небезпечним ситуаціям.

При застосуванні методів ультразвукового контролю найбільш розповсюдженими методами вимірювання розмірів дефектів є амплітудний метод та метод умовної протяжності. Амплітудний метод передбачає вимірювання розмірів дефекту на основі вимірювання амплітуди отриманого від дефекту сигналу. Метод умовної протяжності заснований на вимірюванні відстані, на яку переміщують п'єзоелектричний перетворювач за умов

наявності сигналу від дефекту певною амплітудою. Останній метод дає дуже неточні результати. Але й амплітудний метод можна назвати задовільним лише при застосуванні перетворювачів з фазованими апертурними решітками. Дійсно, при застосуванні ультразвукових дефектоскопів, які працюють з перетворювачами з фазованими апертурними решітками, наприклад з 16 п'єзоелементами на частоті 5 МГц, легко досягти границь похибки на рівні $\pm 0,1$ мм при вимірюванні дефекту розмірами від 2 до 6 мм діаметром на глибини від 20 до 100 мм у конструкційних сталях, алюмінії або пластику. Але ультразвукові дефектоскопи, які працюють з перетворювачами з фазованими апертурними решітками мають дуже розвинену логіку та наразі у кілька разів дорожчі ніж звичайні. Перетворювачі з фазованими апертурними решітками в десятки разів дорожче звичайних. І найголовніше - перетворювачі з фазованими апертурними решітками мають великий розмір і потребують у кілька разів більшу площу надійного акустичного контакту з об'єктом контролю. Всі ці недоліки обмежують використання у промисловості застосування ультразвукових дефектоскопів, які працюють з перетворювачами з фазованими апертурними решітками, не дивлячись на те що вони отримали дуже широке застосування у медицині. Мініатюрність об'єктів контролю у промисловості разом з ускладненим доступом до їх поверхні робить перспективи застосування ультразвукових дефектоскопів, які працюють з перетворювачами з фазованими апертурними решітками дуже обмеженими. Тому станом на зараз і у найближчій перспективі найчастіше застосовують і будуть застосовувати ультразвукові дефектоскопи зі звичайними сумісними або роздільно-сумісними п'єзоперетворювачами.

Проте при застосовуванні ультразвукових дефектоскопів зі звичайними сумісними або роздільно-сумісними п'єзоперетворювачами одним із основних недоліків амплітудного методу є розбіжності сигналів від ідентичних відбивачів навіть за високої точності виготовлення контрольних зразків [2]. Такі розбіжності можуть сягати 6 дБ і більше, що позначає похибку при вимірюванні розміру дефекту, яка сягає значень цього розміру. Застосування такої комбінації методів змушує виробників або «переребраковувати»

продукцію, що призводить до суттєвого підвищення її вартості, або миритися з нестабільною якістю продукції.

Висновки. Проведено аналіз сучасних методів ультразвукового неруйнівного контролю, типів імітаторів дефектів, які використовуються в калібрувальних і контрольних зразках: бокові свердлення, плоскодонні отвори, поверхневі пропили та умовно нескінченні поверхні.

На основі проведених досліджень аналітичних моделей амплітуд сигналів, запропоновано метод зменшення розбіжностей амплітуд сигналів від відбивачів у контрольних зразках УЗК за рахунок застосування поправок до фактичних амплітуд сигналів від цих відбивачів.

Застосування аналітичних моделей амплітуд сигналів та поправки до відтворюваної амплітуди сигналу від відбивача у контрольному зразку під час його калібрування значно підвищує ефективність УЗК.

ЛІТЕРАТУРА

1. ISO 9712:2021 Non-destructive testing — Qualification and certification of NDT personnel
2. ISO 5577:2017 Non-destructive testing — Ultrasonic testing — Vocabulary
3. Josef Krautkrämer, Herbert Krautkrämer - Werkstoffprüfung mit Ultraschall, Springer-Verlag, 2013, ISBN 3642529615 – 415-420 с.

IMPROVEMENT OF THE METHODOLOGY FOR ULTRASONIC NON-DESTRUCTIVE TESTING APPLICATION

Pavlo Sazonov, Svitlana Klymenko

Abstract. *Ultrasonic non-destructive testing (UT) is one of the most effective and widespread methods for detecting internal defects in materials and structures for various purposes. UT is used for quality control of complex technical objects (CTO), including high-risk objects, where even minor defects can lead to serious consequences. However, existing UT methods have certain limitations, in particular, regarding the accuracy of defect assessment. This is due to the discrepancy in the amplitudes of signals reflected from different reflectors in test blocks used for equipment adjustment. In order to increase the accuracy of the measurements, analytical models of the amplitudes of signals from reflectors were developed. These models allow improving the UT methodology, in particular, by introducing reasonable corrections that eliminate amplitude discrepancies and improve the accuracy of the UT results. The implementation*

of such approaches helps to increase the reliability and safety of technical facilities, as well as reduce the risk of emergencies due to unnoticed defects.

Keywords: *ultrasonic testing (UT), non-destructive testing (NDT), complex technical objects (CTO), method, test block, signal, defect, model of defect.*

REFERENCE

1. ISO 9712:2021 Non-destructive testing — Qualification and certification of NDT personnel
2. ISO 5577:2017 Non-destructive testing — Ultrasonic testing — Vocabulary
3. Josef Krautkrämer, Herbert Krautkrämer - Werkstoffprüfung mit Ultraschall, Springer-Verlag, 2013, ISBN 3642529615 – 415-420 c.

STUDY OF OPERATIONAL RELIABILITY OF PORTAL CRANES

“GANZ” 5-30

Viktor Strelbitskyi

Odessa National Maritime University, PhD, Assoc. Prof. Ukraine

Abstract. *The study analyzed malfunctions of the mechanisms of GANTZ portal cranes with a lifting capacity of 5 tons that occur during operation under heavy load conditions in a river port. Based on the data obtained, the availability, failure and recovery rates of the equipment were calculated.*

The analysis of the study results showed that the largest number of failures was found in the mechanisms for moving, lifting and changing the reach of the crane boom. The main reasons for the failure of the lifting mechanisms are the wear of brake pulleys, destruction and wear of shafts and bearings in gearboxes. The failures of the slewing mechanisms are mainly due to damage to the coupling that connects the gearbox to the open gear. Failures of the boom outreach change mechanisms are caused by damage to the rack and pinion teeth, hinge joints, bearings, and dampers.

Keywords: *portal crane, reliability, availability, failure*

River ports widely use portal cranes for loading and unloading operations [1-6]. However, in Ukraine, more than 90% of these cranes have already exhausted their intended service life, but continue to be actively used [1-5].

Given that portal cranes are a key element of the technological process, their reliable and uninterrupted operation directly affects the efficiency of port lines.

Since gantry cranes are critical to port operations, their wear and tear and intensive use lead to fatigue damage, breakdowns, and accidents. [1-9]. For this reason, ensuring their reliable and safe operation is a top priority.

Studies of the reliability of portal crane mechanisms that have been in operation for more than 35 years in sea and river ports have received insufficient attention, as evidenced by the analysis of works presented in the sources [1-9].

For the study, 16 cranes of the same type, each with a lifting capacity of 5 tons, were selected, operating in grab mode in the waters of sea and river ports.

The information contained in the relevant maintenance and repair logs of the respective cranes from 2015 to 2022 was used for the analysis.

The reliability of the cranes was assessed by a complex indicator - the availability factor (K_r):

$$K_r = \frac{T_M}{T_M + T_B} \quad (1)$$

where T_M - is the average operating time between crane failures for a specified period of time;

T_B - is the average recovery time for a specified period of time.

Estimated value of the average availability factor $K_r = 0,84$.

The analysis of the study results showed that the largest number of failures was found in the mechanisms for moving, lifting and changing the reach of the crane boom. The main reasons for the failure of the lifting mechanisms are the wear of brake pulleys, destruction and wear of shafts and bearings in gearboxes. The failures of the slewing mechanisms are mainly due to damage to the coupling that connects the gearbox to the open gear. Failures of the boom outreach change mechanisms are caused by damage to the rack and pinion teeth, hinge joints, bearings, and dampers. Replacing the dampers is not difficult.

It was established that violations of the rules of use and repair technology led to defects in the mechanisms.

REFERENCES

1. Hryhorov O. V., Petrenko N. O. Vantazhopidiomni mashyny: Navch. posibnyk. Kharkiv: NTU «KhPI», 2005. 304 s. [in Ukrainian].
2. Strelbitskyi V. V. Perspektyvy vykorystannia kvadrokopteriv dlia diahnostuvannia portalnykh kraniv // Topical issues of practice and science. Abstracts of XXVI International Scientific and Practical Conference. Varna, Bulgaria. – 2021. – S. 760-762. [in Ukrainian].
3. Strelbitskyi V. V., Nemchuk O. O. Eksperymentalne doslidzhennia vplyvu napratsiuvannia ta asymetrii tsykladu na trishchynostiikist stalei portalnykh kraniv // Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Tekhnichni nauky. – 2020. – №. 1. – S. 245-248 [in Ukrainian].
4. Strelbitskyi V.V. Doslidzhennia vplyvu napratsiuvannia na dovhovichnist mekhanizmu peresuvannia mostovoho krana. The XXIV International Science Conference «About the problems of practice, science and ways to solve them», May 04 – 07, 2021, Milan, Italy. S. 363-364. [in Ukrainian].
5. Strelbitskyi V. V. Doslidzhennia tekhnichnoho stanu mekhanizmiv peresuvannia kozlovykh kraniv KK-12,5 / V. V. Strelbitskyi, V. A. Yaremenko, Ye. M. Kokoshko // Intelektualni transportni tekhnolohii : IV mizhnar. nauk.-tekhn. konf. (27-28 lystopada 2023 r.) : tezy dopovidei. Kharkiv : UkrDUZT, 2023. S. 285-286. [in Ukrainian].

6. Strelbitskiy V. Diagnosis of the technical condition of rope blocks of gantry cranes //The 15th International scientific and practical conference “New knowledge: strategies and technologies for teaching young people”(April 16–19, 2024) Lisbon, Portugal. International Science Group. 2024. – 2024. – С. 280.
7. Zahrebelnyi Ye. O., Strelbitskiy V. V. Analiz defektiv mekhanizmiv peresuvannia portalnykh kraniv «Kondor» //The 10th International scientific and practical conference “Analysis of modern ways of development of science and scientific discussions”(November 29-December 02, 2022) Bilbao, Spain. International Science Group. 2022. – 2022. – S. 561. [in Ukrainian].
8. Strelbitskiy V. Otsinka nadiinosti mekhanizmiv portalnykh kraniv Albatros //Herald of Khmelnytskyi National University. Technical sciences. – 2022. – T. 313. – №. 5. – S. 196-199. . [in Ukrainian].

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ НАДІЙНОСТІ ПОРТАЛЬНИХ КРАНІВ «ГАНЦ» 5-30

Стрельбіцький Віктор

Одеський національний морський університет, м. Одеса. к.т.н., доцент. Україна

Анотація: У дослідженні здійснено дослідження відмови, що виникають у механізмах портальних кранів «ГАНЦ» вантажопідйомністю 5 тон під час інтенсивної експлуатації в умовах річкового порту. На основі зібраних даних обчислено показники готовності, інтенсивності відмов та швидкості відновлення. Результати аналізу виявили, що найбільша частота відмов спостерігається в механізмах руху, підйому вантажу, регулювання вильоту стріли, а також у металевих конструкціях крана.

Головними причинами виходу з ладу підйомних механізмів є зношування гальмівних барабанів, пошкодження та зношеність валів і підшипників у редукторах. Несправності поворотних механізмів здебільшого пов'язані з пошкодженнями муфти, яка з'єднує редуктор із відкритою зубчастою передачею. Відмови механізмів зміни вильоту стріли зумовлені пошкодженням зубців рейок, шарнірних з'єднань, підшипників та демпферних пристроїв.

Ключові слова: портальний кран, надійність, коефіцієнт готовності, відмова.

ЛІТЕРАТУРА

1. Григоров О. В., Петренко Н. О. Вантажопідйомні машини: Навч. посібник. Харків: НТУ «ХПІ», 2005. 304 с.
2. Стрельбіцький В. В. Перспективи використання квадрокоптерів для діагностування портальних кранів //Topical issues of practice and science. Abstracts of XXVI International Scientific and Practical Conference. Varna, Bulgaria. – 2021. – С. 760-762.
3. Стрельбіцький В. В., Немчук О. О. Експериментальне дослідження впливу напручування та асиметрії циклу на тріщиностійкість сталей портальних кранів //

Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2020. – №. 1. – С. 245-248.

4.. Стрельбіцький В.В. Дослідження впливу напрацювання на довговічність механізму пересування мостового крана. The XXIV International Science Conference «About the problems of practice, science and ways to solve them», May 04 – 07, 2021, Milan, Italy. С. 363-364.

5. Стрельбіцький В. В. Дослідження технічного стану механізмів пересування козлових кранів КК-12,5 / В. В. Стрельбіцький, В. А. Яременко, Є. М. Кокошко // Інтелектуальні транспортні технології : IV міжнар. наук.-техн. конф. (27-28 листопада 2023 р.) : тези доповідей. Харків : УкрДУЗТ, 2023. С. 285-286 .

6. Strelbitskiy V. Diagnosis of the technical condition of rope blocks of gantry cranes //The 15th International scientific and practical conference “New knowledge: strategies and technologies for teaching young people”(April 16–19, 2024) Lisbon, Portugal. International Science Group. 2024. – 2024. – С. 280.

7. Загребельний Є. О., Стрельбіцький В. В. Аналіз дефектів механізмів пересування порталних кранів «Кондор» //The 10th International scientific and practical conference “Analysis of modern ways of development of science and scientific discussions”(November 29-December 02, 2022) Bilbao, Spain. International Science Group. 2022. – 2022. – С. 561.

8. Стрельбіцький В. Оцінка надійності механізмів порталних кранів Альбатрос //Herald of Khmelnytskyi National University. Technical sciences. – 2022. – Т. 313. – №. 5. – С. 196-199.

ХАРАКТЕРИСТИКА ШУНГІТОВИХ ПОРІД ДЛЯ ВИКОРИСТАННЯ В ПРОЦЕСАХ ОДЕРЖАННЯ СПЛАВІВ

Чумак Д.Д.¹, Камкіна Л.В.², Мянєвська Я.В.³

¹ УДУНТ ДМетІ, аспірант, Україна

² УДУНТ ДМетІ, проф., д.т.н., Україна

³ УДУНТ ДМетІ, проф., д.т.н., Україна

Анотація. Розглянуто природний композиційний матеріал шунгіт, який має складний мінеральний склад. Одним з основних компонентів мінеральної складової шунгітових порід різних груп є кремнезем. Вуглець шунгіту рівномірно розподілений у силікатному каркасі з дрібнодисперсних кристалів кварцу. Як сировина шунгіт може бути використаний для виплавки силікомарганцю та феросиліцію. Вміст високоактивного вуглецю і кремнезему у співвідношенні, близькому до стехіометричного для реакції відновлення кремнію вуглецем, сприяє майже повному відновленню кремнію з цього матеріалу.

Припускаючи, що шунгітова порода є системою Si-C-O, виконані термодинамічні розрахунки складу рівноважної газової фази для діапазону температур 1300-2300 К. Результати розрахунків рівноважного складу газової фази в системі Si-C-O за $P = 1$ атм показали, що мінімальна температура виникнення конденсованого карбиду кремнію (β -SiC) дорівнює 1756 К.

Ключові слова: шунгіт, кремнезем, вуглець, відновлення, термодинаміка системи Si-C-O.

Шунгітовими називають велику групу природних композиційних матеріалів, специфічні властивості яких обумовлені структурою та властивостями шунгітового вуглецю та складним мінеральним складом. Шунгітові породи різноманітні по формі проявів, часу формування, генезису, речовинного складу та інших ознак. Шунгітові породи містять давню метаморфізовану речовину, що складається з вуглецю (>95%), водню (~1%), азоту (~0,75%), сірки (~0,3%) та кисню (до 1,5%). Шунгітовий вуглець характеризується багаторівневою фрактальною структурою, що утворилася в результаті послідовної агрегації графенових фрагментів (~1 нм) [1]. Питомий електричний опір, $1/\sigma$, аморфного вуглецю в шунгіті становить приблизно від 1000 до 2000 мкОм і є досить малим порівняно з іншими мінералами [9].

Мінеральна складова шунгітових порід представлена головним чином кварцем, карбонатами, слюдами, польовими шпатами і сульфідами. Одним з основних компонентів мінеральної складової шунгітових порід різних груп є кремнезем, що входить до складу кварцу і складних силікатів. При дослідженні шунгітових порід із вмістом вуглецю 3,5; 30 та 98 мас.% методом малокутового рентгенівського розсіювання були отримані структурні характеристики кварцу, що входить до складу породи та показано близький розмір кристалітів (~60 нм) та наявність структури з фрактальною поверхнею, що відрізняє кварц шунгітових порід від кварцитового кварцу [2]. Аналогічні розгалужені структури можуть бути отримані з колоїдних суспензій, у процесі твердіння яких зберігаються структури вихідного колоїда. Вивчення особливостей взаємодії кварцу та вуглецю у шунгітових породах важливо для визначення нових підходів до оцінки якості шунгітової сировини, а також пошуку та розробки нових, високотехнологічних напрямків його використання.

Різновиди кварцу шунгітових порід наступні: кварц, що входить до складу шунгітових порід масивної текстури та до складу уламкової частини порід прожилкової та брекчієвої текстури. Цей кварц є частиною вуглець-кварцового агрегату, що є досить однорідним комплексом, що складається в основному з шунгітового вуглецю та кварцу [3].

Шунгітові породи належать до класу вуглецевих порід, що відрізняються вмістом вуглецю та різноманітністю мінералів, і є природними вуглецево-мінеральними композитними матеріалами. Силікатні мінерали високодисперсні та рівномірно розподілені у вуглецевій матриці. Основними породоутворюючими мінералами є кварц, слюда, альбіт і пірит. За вмістом кремнію та алюмінію шунгітові породи Млинківського району Правобережного району Українського щита поділяються на дві групи: I група (основна) – вміст SiO_2 від 48,1% до 59,6%, вміст Al_2O_3 від 9,5% до 12,8%; II група – вміст SiO_2 від 75,4% до 78,0%, вміст Al_2O_3 від 5,8% до 7,0%. Для II групи спостерігається чітка зворотна (лінійна) кореляція між вмістом кремнію та алюмінію [4, 9].

Будова і властивості шунгітових порід зумовлюють їх застосування в окислювально-відновних процесах: у доменному виробництві ливарного

(висококремністого) чавуну: вимоги якості ($\text{SiO}_2 + \text{C}$) $\geq 83\%$, модуль $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{C} \leq 0,3$, фракція щебеня 10-100 мм $\geq 94\%$, вміст фосфору $\leq 0,1\%$, сірки $\leq 1,8\%$; у феросплавному виробництві з вимогами до якості: вміст вуглецю 20-30%, кремнійвміщуюча сировина $(\text{C} + \text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3) = 85-93\%$, $\text{CaO} + \text{MgO} = 2,0-2,8\%$, $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO} = 1,7-3,5\%$, фракція щебеня 10-40 мм; у виробництві карбіду і нітриду кремнію; шунгітові породи можуть служити джерелом отримання вуглецевовмісних матеріалів.

Вуглець шунгіту рівномірно розподілений у силікатному каркасі з дрібнодисперсних кристалів кварцу [2]. Специфічна структура шунгіту визначає його високу електропровідність – коефіцієнт електропровідності 1500 См/м. Сума (C+Si) у шунгітах знаходиться в межах 83...88 мас.%. Характерною особливістю шунгіту є високе значення його питомої поверхні (до 30 м²/г) із середнім діаметром пор 14 нм [5, 4].

Таблиця 1

Хімічний склад шунгіту, %

C	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	Fe ₂ O ₃	MgO	MnO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	S _{сульф.}	P ₂ O ₅
10-21	51-78	0,55-0,7	6-12	0,5-2	0,3-4	0,55-4	0,01-0,08	1-4,5	0,2-1,3	1,3-2,3	0,2-4,2	0,16-0,34

Шунгітові породи піддаються збагаченню вуглецем та активації (термічній, механохімічній) для збільшення питомої площі поверхні та об'єму пор [6, 5].

Дослідження останніх років показали, що шунгіт є специфічною формою вуглецю, що представляє собою некристалічний, неграфітований, фуллереноподібний вуглець, який відрізняється від графітового на рівні надмолекулярної, атомної та зонної (електронної) структури [7]. Шунгітовий вуглець має високу реакційну здатність з-за своєї молекулярної структури яка є близькою як до графіту, так і до газової сажі та скловуглецю [2]. В наслідок цього окисно-відновні реакції за його участю відбуваються за більш низьких температур. При відновленні кремнію 1 кг шунгітового вуглецю еквівалентний за реакційною здатністю 3-4 кг вуглецю коксу. Утворення карбіду кремнію при відновленні з шунгітової породи відбувається при температурах на 300-500 °C нижче, ніж на традиційній шихті.

Як сировина шунгіт може бути використаний для виплавки силікомарганцю та феросиліцію. Вміст високоактивного вуглецю і кремнезему у співвідношенні, близькому до стехіометричного для реакції відновлення кремнію вуглецем, сприяє майже повному відновленню кремнію з цього матеріалу [3]. Додавання до шунгіту в суміш залізовмісних матеріалів полегшує відновлення кремнію завдяки можливості утворення силіцидів заліза.

Шунгіт аналізували за допомогою термогравіметрії/диференційного термічного аналізу (TG-DTA) в умовах атмосферного повітря, і результат показаний на рисунку 1. Вміст води становив приблизно 1% від втрати ваги. Пік приблизно при 500 °C вказує на випаровування сірки. Термічний розклад вугільного піриту, який починається приблизно при 400 °C, завершується при 600 °C. При температурах від 500°C до 850°C вуглець окислювався до CO_2 , і спостерігалася втрата ваги зразка. Був зареєстрований екзотермічний пік при температурах від 500 до 700°C, що міг бути викликаний утворенням карбиду кремнію.

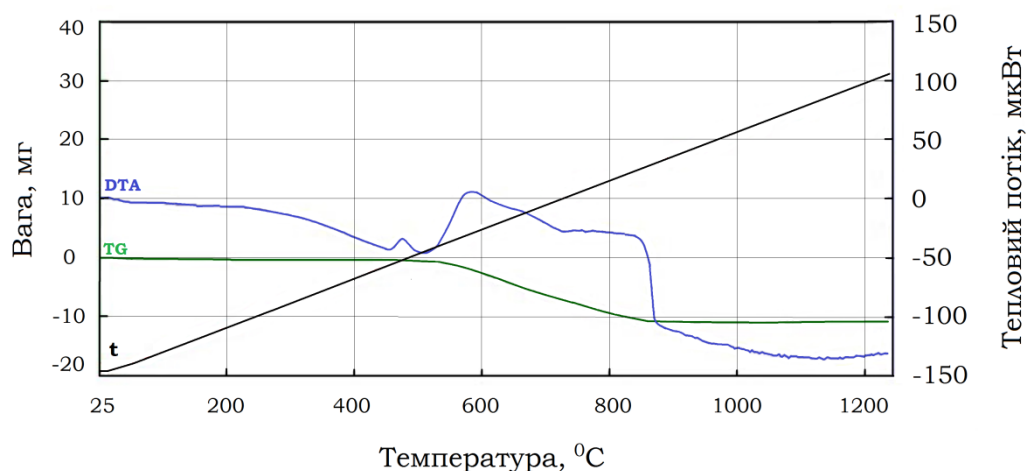


Рисунок 1 - Термогравіметричний аналіз шунгіту

За останні кілька десятиліть мікрохвильове нагрівання знайшло широке застосування в хімічних процесах. При мікрохвильовому опроміненні відбувається перетворення електромагнітної енергії в теплову, а ефективність перетворення залежить від діелектричної природи матеріалів. Споживання енергії під час мікрохвильового нагрівання менше, ніж у інших процесах нагрівання, а час обробки менший [9]. Вуглецеві матеріали, такі як

графіт, створюють мікроплазму, при опроміненні мікрохвилями, що в свою чергу сприяє мікрохвильовим карботермічним реакціям.

Мікрохвильову піч (потужність 1000 Вт) використовували для випаровування та видалення сірки з шунгіту. Сірку в шунгіті можна легко видалити шляхом випаровування (температура кипіння сірки: 445°C) [8]. Опромінення викликало нагрівання шунгіту. Після 3 хвилин нагрівання температура зросла до $\sim 400^{\circ}\text{C}$ і 80% сірки випарувалося в результаті розкладання піриту. Після 9 хвилин мікрохвильового впливу температура зросла до $\sim 1000^{\circ}\text{C}$. Загальна втрата ваги шунгіту становила близько 10%, оскільки деяка кількість вуглецю спалювалася разом з киснем в атмосферному повітрі. Мікрохвильове опромінення протягом 9 хвилин зменшило вміст сірки в шунгіті до 0,2%, тобто на 92%. Результат показано на рисунку 2.

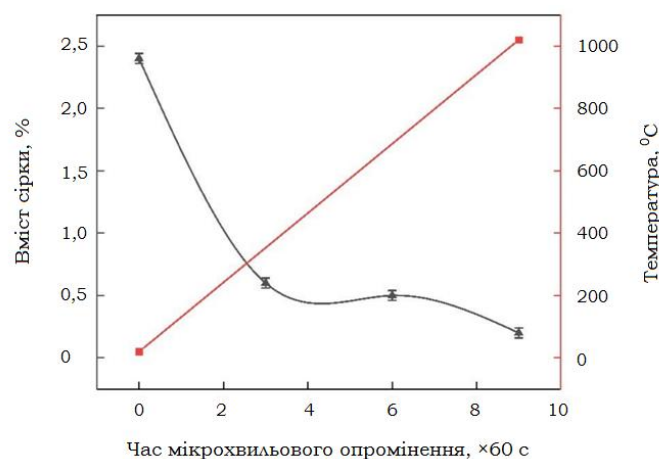


Рисунок 2 - Зміна вмісту сірки в шунгіті залежно від часу мікрохвильового опромінення

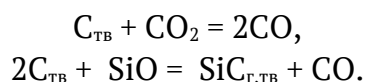
Виявлено, що суміші з графіту та карбиду кремнію, краще піддаються мікрохвильовому нагріванню за рахунок високих швидкостей нагріву без виникнення дуги. Утворення карбиду кремнію (SiC) в опроміненому шунгіті приводить до більш ефективного нагріву суміші та підвищує енергоефективність процесу.

Важливою характеристикою деяких шунгітових порід є вельми сприятливе співвідношення в них вуглецю та кремнезему (28-32% і 57-60%), близьке до стехіометричного для відновлювальних реакцій у системі Si-C-O. Відновлення кремнезему вуглецем є складним процесом, при якому йдуть проміжні реакції,

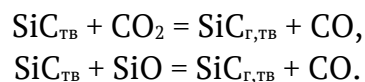
що призводять до утворення газоподібних монооксидів вуглецю та кремнію. Припускаючи, що шунгітова порода є системою Si-C-O, виконані термодинамічні розрахунки складу рівноважної газової фази для діапазону температур 1300-2300 К. Результати розрахунків рівноважного складу газової фази в системі Si-C-O за $P = 1$ атм показали, що мінімальна температура виникнення конденсованого карбіду кремнію (β -SiC) дорівнює 1756 К.

З розрахунків випливає також, що в інтервалі температур 1300-1962 К SiO утворюється не шляхом дисоціації кремнезему з виділенням атомарного та молекулярного кисню, а переважно при взаємодії кремнезему з оксидом вуглецю, тобто $\text{SiO}_{2\text{тв}} + \text{CO} = \text{SiO} + \text{CO}_2$.

Враховуючи, що при досліджених температурах реакції в газовій фазі досягають рівноваги дуже швидко, зупинимось тільки на реакціях, що протікають за участю конденсованих фаз. Так, в інтервалі температур 1300-1756 К отримують розвиток реакції:



При температурі 1756 К в системі «зникає» конденсований вуглець і з'являється конденсований карбід кремнію:



При температурах 1962-2300 К рівноважна система складається з конденсованого карбіду кремнію і кремнію, при надлишку вуглецю та температурі 1756-2300 К з конденсованого карбіду кремнію та вуглецю.

Роль твердого вуглецю в процесі відновлення переважно зводиться до генерації CO при взаємодії з газоподібними SiO і CO₂.

Таким чином, основними висновками термодинамічного аналізу хімічних перетворень у системі Si-C-O в діапазоні 1300-2300 К є:

- при температурі 1756 К в системі "зникає" конденсований вуглець і з'являється конденсований карбід кремнію;
- при температурі 1962 К в системі зникає конденсований кремнезем та виникає конденсований кремній; при температурах 1962-2300 К; рівноважна система складається з конденсованого карбіду кремнію та кремнію, при

надлишку вуглецю та температурі 1756-2300 К – з конденсованого карбіду кремнію та вуглецю;

- роль твердого вуглецю в процесі відновлення зводиться в основному до генерації CO при взаємодії з газоподібними SiO і CO₂;

- для зсуву реакцій у бік отримання карбіду кремнію слід видаляти із зони реакції CO.

Проводились дослідження впливу термообробки шунгітових порід при температурах 1400, 1600 та 1800°C. Час витримки за кінцевої температури становив 2-4 години. Час нагріву до кінцевої температури становив 20-30 хвилин. Тиглі з шунгітовою породою зважувалися до та після проведення експерименту для визначення виходу газоподібних продуктів реакції. При температурі процесу термообробки породи 1400°C вже починається процес карбідоутворення, проте в отриманому продукті переважно присутній елементарний кремній, зберігається ще й діоксид кремнію, що не прореагував.

З підвищенням температури процесу до 1600°C різко підвищується вміст карбіду кремнію і знижується вміст кремнію. Особливо це проявляється для великих фракцій та шматкової породи. При обробці при 1800 °C для будь-якої фракції шунгітової породи досягається 100% вміст карбіду кремнію або близький до нього.

Були проведені лабораторні дослідження одержання спеченого матеріалу з додавання 11,5% шунгіту, що відповідає заміні 50% вуглецю коксу вуглецем шунгіту, його склад, %: Mn – 28,98; SiO₂ – 38,56; Fe – 2,93; C – 0,82; SiC – 0,76.

Висновки. Шунгіт являє собою природній композиційний матеріал, специфічні властивості яких обумовлені структурою та властивостями шунгітового вуглецю та складним мінеральним складом. Одним з основних компонентів мінеральної складової шунгітових порід різних груп є кремнезем, що входить до складу кварцу і складних силікатів. Особливості взаємодії кварцу та вуглецю у шунгітових породах важливо для пошуку та розробки нових, високотехнологічних напрямків його використання. Вуглець шунгіту рівномірно розподілений у силікатному каркасі з дрібнодисперсних кристалів кварцу, специфічна структура шунгіту визначає його високу

електропровідність, високе значення його питомої поверхні (до 30 м²/г) із середнім діаметром пор 14 нм.

Як сировина шунгіт може бути використаний для виплавки силікомарганцю та феросиліцію. Вміст високоактивного вуглецю і кремнезему у співвідношенні, близькому до стехіометричного для реакції відновлення кремнію вуглецем, сприяє майже повному відновленню кремнію з цього матеріалу.

Припускаючи, що шунгітова порода є системою Si-C-O, виконані термодинамічні розрахунки складу рівноважної газової фази для діапазону температур 1300-2300 К. Результати розрахунків рівноважного складу газової фази в системі Si-C-O за P = 1 атм показали, що мінімальна температура виникнення конденсованого карбїду кремнію (β -SiC) дорівнює 1756 К.

ЛІТЕРАТУРА

1. Сніжко О.М., Лашко С.П., Яценко В.Г. Про шунгіти та шунгітову мінеральну сировину України. // Збірник наукових праць Інституту геохімії довілля. - 2005. - Вип.11. - С. 80–88.
2. Новые данные о высокоуглеродистых шунгитоподобных породах Млынковского участка (Криворожско-Кременчугская зона, Украинский щит) / Яценко В.Г, Заборовская Л.П., Покалюк В.В., Лашко С.П., Заборовский В.С., Лыжаченко Н.Н. // Геохимия техногенезу. - № 2. - 2019. - С. 33-45. <https://doi.org/10.15407/geotech2019.30.033>
3. Ignatov I., Mosin O. Composition and structural properties of fullerene analogous mineral shungite. Mathematical model of interaction of shungite with water molecules. Adv. Phys. Theor. Appl. 2014, 28, 10–21.
4. Geospatial data on the distribution of silicon and aluminum in the thickness of shungite rocks of the Mlynkovskii area (Ukrainian Shield) / Lashko S. P., Yatsenko V. G., Pokalyuk V. V., Zaborovskaya L. P. // Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects 2020. 11-14 May 2020, Kyiv, Ukraine. Volume 2020, p.1-5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2020geo064>
5. Removal of Impurities from Shungite Via a Combination of Physical and Chemical Treatments. / Fujita T., Aoki T., Ponou J. et al. // Minerals 2021, 11, 245.
6. Preparation of Activated Shungite and Characterization of Its Chemical Composition and Adsorption Properties. / Kazankapova M.K., Nauryzbaev M.K., Efremov S.A. et al. // Solid Fuel Chem. 2019, 53, 241–247.
7. Ferrari A.C., Robertson J. Interpretation of Raman spectra of disorderes and amorphous carbon // Physical review B. 2000. Vol. 61, No 20. P. 14095–14107. DOI:10.1103/PhysRevB.61.14095

8. Application of TG-FTIR to study SO₂ evolved during the thermal decomposition of coal-derived pyrite. / Cheng H., Liu Q., Huang M., Zhang S., Frost R.L. // *Thermochimica Acta*. - 2013. - Vol. 555. - P. 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2012.12.025>
9. Microwave heating characteristics of graphite based powder mixtures. / Chandrasekaran S., Basak T., Srinivasan R. // *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2013, 48, 22–27. <http://dx.doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2013.09.008>

CHARACTERISTICS OF SHUNGITE ROCK FOR USE IN ALLOY PRODUCTION PROCESSES

Chumak D., Kamkina L., Mianovska Y.

Abstract. *The natural composite material shungite, which has a complex mineral composition, is considered. One of the main components of the mineral component of shungite rocks of different groups is silica. Shungite carbon is evenly distributed in a silicate framework of finely dispersed quartz crystals. Shungite can be used as a raw material for smelting silicomanganese and ferrosilicon. The content of highly active carbon and silica in a ratio close to the stoichiometric one for the reaction of silicon reduction by carbon contributes to almost complete reduction of silicon from this material. Assuming that the shungite rock is a Si-C-O system, thermodynamic calculations of the composition of the equilibrium gas phase for the temperature range of 1300-2300 K were performed. The results of calculations of the equilibrium composition of the gas phase in the Si-C-O system at $P = 1$ atm showed that the minimum temperature of the formation of condensed silicon carbide (β -SiC) is 1756 K.*

Keywords: *shungite, silica, carbon, reduction, thermodynamics of the Si-C-O system.*

REFERENCE

1. Snizhko O.M., Lashko S.P., Yatsenko V.G. On shungites and shungite mineral raw materials of Ukraine. // *Collection of scientific papers of the Institute of Environmental Geochemistry*. - 2005. - Issue 11. - P. 80–88. [in Ukrainian].
2. New data on high-carbon shungite-like rocks of the Mlynkovsky site (Krivoy Rog-Kremenchug zone, Ukrainian shield) / Yatsenko V.G., Zaborovskaya L.P., Pokalyuk V.V., Lashko S.P., Zaborovsky V.S., Lyzhachenko N.N. // *Geochemistry of technogenesis*. - No. 2. - 2019. - P. 33-45. <https://doi.org/10.15407/geotech2019.30.033>
3. Ignatov I., Mosin O. Composition and structural properties of fullerene analogous mineral shungite. Mathematical model of interaction of shungite with water molecules. *Adv. Phys. Theor. Appl.* 2014, 28, 10–21.
4. Geospatial data on the distribution of silicon and aluminum in the thickness of shungite rocks of the Mlynkovskii area (Ukrainian Shield) / Lashko S. P., Yatsenko V. G., Pokalyuk V. V., Zaborovskaya L. P. // *Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects* 2020. 11-14 May 2020, Kyiv, Ukraine. Volume 2020, p.1-5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2020geo064>
5. Removal of Impurities from Shungite Via a Combination of Physical and Chemical Treatments. / Fujita T., Aoki T., Ponou J. et al. // *Minerals* 2021, 11, 245.

6. Preparation of Activated Shungite and Characterization of Its Chemical Composition and Adsorption Properties. / Kazankapova M.K., Nauryzbaev M.K., Efremov S.A. et al. // Solid Fuel Chem. 2019, 53, 241–247.
7. Ferrari A.C., Robertson J. Interpretation of Raman spectra of disordered and amorphous carbon // Physical review B. 2000. Vol. 61, No 20. P. 14095–14107. DOI:10.1103/PhysRevB.61.14095
8. Application of TG-FTIR to study SO₂ evolved during the thermal decomposition of coal-derived pyrite. / Cheng H., Liu Q., Huang M., Zhang S., Frost R.L. // Thermochimica Acta. - 2013. - Vol. 555. - P. 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2012.12.025>
9. Microwave heating characteristics of graphite based powder mixtures. / Chandrasekaran S., Basak T., Srinivasan R. // International Communications in Heat and Mass Transfer. 2013, 48, 22–27. <http://dx.doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2013.09.008>

ДОСЛІДЖЕННЯ ПІДШИПНИКІВ КОВЗАННЯ: КОНСТРУКЦІЙНІ РІШЕННЯ ТА
АНАЛІЗ МЕТОДОМ КІНЦЕВИХ ЕЛЕМЕНТІВ

Яйчук О.О.¹, Поворотній В.В.²

¹Український державний університет науки і технологій, аспірант, Україна

²Український державний університет науки і технологій, к. т. н, доцент, Україна

Анотація. У сучасному машинобудуванні та металургії підшипники ковзання є невід'ємною частиною роторних агрегатів, таких як турбіни, генератори, насоси та інші системи, що працюють в умовах високих навантажень і високих швидкостей обертання. Надійність роботи цих підшипників є критичним фактором, оскільки їхній вихід з ладу може призвести до серйозних економічних втрат через вимушений простій обладнання. Дослідження спрямовані на підвищення ефективності, довговічності та стійкості до зношування підшипників ковзання. Важливу роль відіграють числові методи аналізу, такі як метод кінцевих елементів (МКЕ), що дозволяє моделювати їхню поведінку під дією навантажень та температур. Крім того, експериментальні випробування показали ефективність застосування полімерних покриттів та змащувальних рідин з низькою в'язкістю для покращення робочих характеристик підшипників. Оптимізація конструкцій, дозволяє підвищити стійкість підшипників ковзання та зменшити вібрації при роботі у складних умовах.

Ключові слова: підшипники ковзання, аналіз методом кінцевих елементів, полімерні матеріали, експериментальні дослідження, конструкції підшипників ковзання, змащення підшипників ковзання.

Основними завданнями аналізу системи ротор-підшипник є розрахунок витрат та гідродинамічних сил, а також оцінка вібраційного стану ротора. При створенні нових високоефективних конструкцій підшипників необхідно враховувати не тільки їх гідродинамічні, а й ротординамічні характеристики (жорсткості та демпфування). Динамічні характеристики роторів швидкохідних машин, в основному, визначаються діючими в зазорах проточної частини гідродинамічних сил, які, в залежності від конструкції та умов роботи ущільнювальних і підшипникових вузлів, можуть стабілізувати його динаміку і знижувати віброактивність, або, навпаки, викликати втрату динамічної стійкості та руйнівні для машин автоколивання ротора.

Одним із ключових методів, використаних у дослідженні, є числове моделювання з використанням методу кінцевих елементів (МКЕ). Цей метод

дозволяє детально проаналізувати поведінку підшипників ковзання під впливом різних навантажень, температурних коливань та умов змащування. За допомогою моделювання рис. 1 було проведено розрахунки деформацій та напружень у підшипниках, що дозволило виявити критичні зони зношування та можливі місця виникнення дефектів. Моделювання показало, що правильний вибір матеріалів та оптимізація конструкції дозволяють суттєво знизити рівень тертя і втрати енергії в підшипниках, що працюють в умовах високих швидкостей [1].

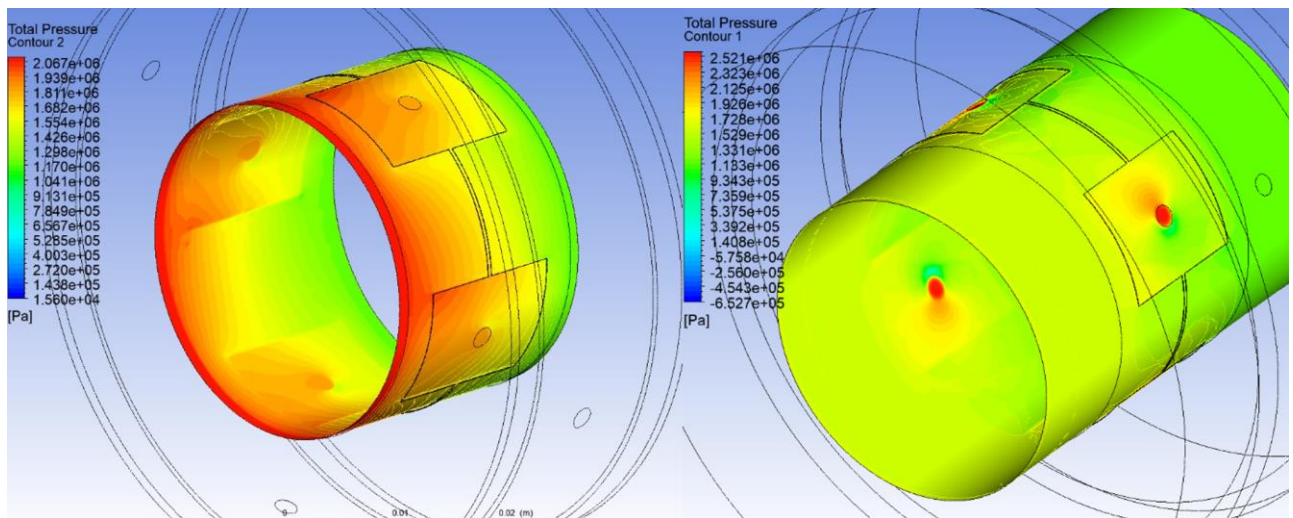


Рисунок 1 – Деякі результати розрахунку перепаду повного тиску на підшипнику ковзання за різних граничних умов

Особлива увага приділялася аналізу гідродинамічних та теплових процесів, що відбуваються у підшипниках під час роботи. Було змодельовано різні режими роботи підшипників з використанням змащувальних рідин різної в'язкості, що дозволило визначити оптимальні параметри для їхньої стабільної роботи. Моделювання дозволило оцінити вплив високих температур та навантажень на знесення підшипників, а також динамічну стійкість роторних систем, що працюють на високих швидкостях [2].

В рамках дослідження було проведено низку експериментів, спрямованих на вивчення зносостійкості та експлуатаційних характеристик підшипників ковзання за умов високих навантажень і різних режимів змащування. Експерименти проводилися на спеціальних стендах, де підшипники піддавалися навантаженням, що імітували реальні умови роботи.

Для тестування було використано підшипники з різними типами покриттів, включаючи полімерні матеріали, зокрема тefлон. Випробування показали, що застосування полімерних покриттів значно зменшує знос підшипників і підвищує їхню стійкість до тертя.

Висновки. Дослідження показали, що поєднання числового аналізу методом кінцевих елементів та експериментальних випробувань дозволяє оптимізувати конструкцію підшипників ковзання та підібрати найкращі матеріали для їхнього виготовлення. Впровадження полімерних покриттів сприяє підвищенню ефективності підшипників, зниженню тертя та зносу, а також покращенню тепловідведення [3]. Вдосконалення конструкцій, дозволяє забезпечити стабільну роботу підшипників у високошвидкісних агрегатах, що є критично важливим для промислових систем, які працюють у важких умовах експлуатації.

ЛІТЕРАТУРА

1. Nakano S. et al. An Advanced Microturbine System with Water-Lubricated Bearings //International Journal of Rotating Machinery. – 2009. – Т. 2009. – №. 1. – С. 718107. URL: <https://doi.org/10.1155/2009/718107>
2. Elsayed E. K., Alaa M. A. E. L. B. A study on hydrodynamic water lubricated journal bearing //Engineering Research Journal. – 2017. – Т. 153. – С. M1-M15.
3. Іщенко, А. О., Радіоненко, О. В., Антоненко, А. В., Родак, А. А. Застосування полімерних матеріалів у підшипниках ковзання //Металургійні процеси та обладнання. - 2008. - №. 4. - С. 22-25.

RESEARCH ON JOURNAL BEARINGS: DESIGN SOLUTIONS AND FINITE ELEMENT ANALYSIS

Oleksandr Yaichuk, Viktor Povorotnii

Abstract. *In modern mechanical engineering and metallurgy, journal bearings are an integral part of rotating equipment such as turbines, generators, pumps, and other systems operating under high loads and high rotational speeds. The reliability of these bearings is a critical factor, as their failure can lead to significant economic losses due to unplanned equipment downtime. Research is aimed at improving the efficiency, durability, and wear resistance of journal bearings. Numerical analysis methods, such as the finite element method (FEM), play an important role by allowing the simulation of bearing behaviour under load and temperature conditions. Additionally, experimental tests have demonstrated the effectiveness of using polymer coatings and low-viscosity lubricants to enhance the performance of bearings. Optimizing the design of bearings*

improves their stability and reduces vibration when operating under challenging conditions.

Keywords: *journal bearings, finite element analysis, polymer materials, experimental research, bearing design, bearing lubrication.*

REFERENCE

1. Nakano S. et al. An Advanced Microturbine System with Water-Lubricated Bearings //International Journal of Rotating Machinery. – 2009. – T. 2009. – №. 1. – C. 718107. URL: <https://doi.org/10.1155/2009/718107> [in English].
2. Elsayed E. K., Alaa M. A. E. L. B. A study on hydrodynamic water lubricated journal bearing //Engineering Research Journal. – 2017. – T. 153. – C. M1-M15. [in English].
3. Ishchenko, A. O., Radionenko, O. V., Antonenko, A. V., Rodak, A. A. Zastosuvannya polymernykh materialiv u pidshypnykakh kovzannya // Metalurhiyni protsesy ta obladnannya. – 2008. – No. 4. – pp. 22–25. [in Russian].

МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ СКЛАДУ ШЛАКУ НА НАДХОДЖЕННЯ ВОДНЮ В МЕТАЛ

Автономов Д.В., Камкін В.Ю., Тогобицька Д.М., Мянговська Я.В.

Анотація. Проведено моделювання впливу хімічного складу шлакових розплавів на ступінь розчинності водню та парів води та розроблено моделі структури шлакових та металевих розплавів, які використані для оцінки впливу різних варіантів розміщення домішкових елементів у розплавах на їхній зарядовий стан. Розчинення водяної пари припадають на область шлаків з деяким надлишком кисню, а розчинення водню – область шлаків з дефіцитом кисню. Іншими словами, розчинення води в шлаках відбувається лише в окислювальних умовах, а водню – у відновлювальних. У світлі викладеного логічно припустити, що домінуюча роль p у багатофакторних залежностях є ознакою перебування водню в відносно нейтральному стані, підвищення ролі параметра Δe свідчить про активізацію його взаємодії з навколишніми атомами матриці, в першу чергу кисню.

Ключові слова: водень, розчинність, шлак, властивості шлаку, моделювання.

Вступ. Як відомо, якість готової металопродукції значною мірою визначається вмістом шкідливих домішок, у тому числі водню. Водень є неминучою домішкою, що погіршує експлуатаційні властивості сталей та сплавів. Проблема боротьби з воднем у сталі стала однією з актуальних і важко вирішуваних. Існують деякі прийоми, що забезпечують зниження вмісту розчинених газів у металі. Одним із них є підбір оптимального шлакового режиму та підвищення в'язкості шлаку перед випуском для гальмування масообмінних процесів на межі шлак-метал.

Мета роботи. Шлакові розплави супроводжують практично всі основні виробництва металу, та його властивості, і навіть склад (зокрема і вміст водню) визначають якість кінцевої продукції.

Розглядаючи закономірності розподілу водню між металом і шлаком, слід зазначити, що паралельно протікає ряд аналогічних процесів, зокрема, перерозподіл кисню, марганцю, заліза тощо, необхідність обліку наслідків яких ускладнює вибір тієї чи іншої схеми аналізу процесу розподілу як водню, і будь-якого іншого компонента. Саме тому в цій роботі особлива увага приділяється моделюванню властивостей шлакових розплавів та

прогнозуванню впливу складу шлаку на ступінь розчинності в ньому водню та парів води.

Теоретичний аналіз розчинності водню у шлаках.

Вивчення розчинності водню в металургійних фазах не може бути обмежене тільки сталеплавильними системами. Використання природного газу в доменній плавці робить актуальним вивчення особливостей розподілу водню на різних стадіях формування чавуну. Спінюваність газомістких доменних шлаків значною мірою впливає на газодинаміку процесу плавки, а водночас і на продуктивність доменних печей [1].

Припущення про існування іонів водню в шлакових або металевих розплавах у вигляді протона давно вже розглядалося як малоймовірне з огляду на очікувану сильну його взаємодію з оточуючими атомами, а тим більше аніонами типу O^{2-} матриці. З іншого боку, аналіз публікацій як раннього, і більш пізнього періоду [2, 3] дає підстави вважати, що форма існування іонів водню, їх зарядовий стан розуміється як якась постійна. Значення Z_n є дробовими і змінюються залежно як властивостей партнера утворених зв'язків, і їх довжини (d) [4]. Розроблені моделі структури шлакових та металевих розплавів використані для оцінки впливу різних варіантів розміщення домішкових елементів у розплавах на їхній зарядовий стан. Результати розрахунків виконано при припущенні, що структура розплавів системи $CaO-SiO_2$ повністю упорядкована, тобто, характеризується інтегральними модельними параметрами, прийнятими для металевих розплавів (Z^Y), де Z - заряд неполяризованого іона елемента може бути дробової величиною; α - кут нахилу прямих в координатах $lgRu$ від Z . Прийняли, що розміщення всіх домішок у структурі шлакових розплавів відбувається по вакантних вузлах аніонної ґрати, або по катіонних міжвузлів. Обидва ці випадки є крайніми гіпотетичними варіантами взаємного розташування атомів домішки та матриці. Вони дають певну якісну інформацію, в якій можна бачити масштаб впливу складу розплаву, його структури та хімічної індивідуальності домішкового компонента на процеси міжатомної взаємодії у розплавах, де інтегральними характеристиками виступають: хімічний еквівалент складу - Δe ,

що характеризує взаємодію зв'язку катіон-аніон; структурний параметр – d , що показує середньостатистичну міждерну відстань; показник стехіометрії – ρ , який визначається відношенням числа катіонів K до числа аніонів A в 100г розплаву; електрохімічний еквівалент – $\text{tg}\alpha$, що характеризує хімічну індивідуальність аналізованого поєднання елементів.

Аналіз досить великої кількості експериментальних даних показує, що шлак, порівняно з металом, зазвичай відносно пересичений воднем. Це свідчить про те, що шлак дійсно є захисним середовищем і передача водню через нього металу пов'язана з необхідністю подолання іонами енергетичного бар'єру на міжфазному кордоні метал-шлак.

Результати дослідження різними авторами розчинності H_2O в розплавах системи CaO-SiO_2 , для тих самих складів істотно різняться. Для розробки узагальнюючої моделі використано дані вивчення систем $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$, CaO-MgO-SiO_2 та $\text{CaO-SiO}_2\text{-FeO-Fe}_2\text{O}_3$ і для яких за розробленою раніше методикою [5] визначено модельні параметри електронної будови (табл.1). Аналіз об'єднаного масиву такої інформації про розчинність води ($\text{cm}^3/100\text{g}$) у шлаках узагальнює рівняння

$$C_{\text{H}_2\text{O}}^0 = -452,3 - 33\Delta e + 2341\text{tg}\alpha + 89,5\rho + 0,0294t - 34,0\Delta e \quad (r=0,87), \quad (1)$$

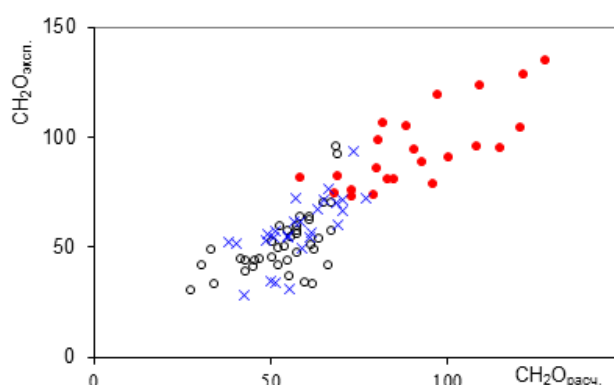
де параметр Δe є показником хімічної мікронеоднорідності структури шлаків. Графічна інтерпретація цих результатів наведено на рис.1.

Таблица 1.

Модельні параметри структури шлаків системи $\text{CaO-SiO}_2\text{-FeO-Fe}_2\text{O}_3$

№	d	Δe	$\text{Tg}\alpha$	ρ	$\Delta\Delta e$
1	3.143	-3.344	0.114	0.746	-1.33
2	3.260	-4.219	0.101	0.677	-0.74
3	3.227	-3.913	0.106	0.699	-0.98
4	3.270	-4.082	0.104	0.705	-0.86
5	3.276	-3.875	0.107	0.736	-1.08
6	3.292	-3.905	0.107	0.737	-1.10
7	3.352	-4.367	0.099	0.715	-0.69
8	3.336	-4.188	0.102	0.731	-0.84
9	3.383	-4.783	0.098	0.719	-0.60
10	3.399	-4.638	0.095	0.707	-0.47
11	3.55	-4.559	0.096	0.829	-0.57
12	3.426	-4.749	0.093	0.710	-0.37
13	3.217	-4.071	0.103	0.671	-0.83
14	3.456	-4.774	0.093	0.729	-0.35

Аналіз отриманих результатів показав, що для доменних шлаків, що формуються в умовах відновлювальної атмосфери, на поглинання водяної пари визначальний вплив надає зміна параметра ρ , тобто. ступеня заповненості аніонних міжвузлів катіонами. Для шлаків ж окислювального виробництва ситуація змінюється і основне навантаження в поглинальній здатності шлаку переходить від ρ (для $C_{H_2O}=f(\rho)$ $r=0,19$) до Δe (для $C_{H_2O}=f(\Delta e)$ $r=0,69$). З цього погляду опис всіх даних як єдиного масиву інформації (рис.1) недостатньо коректно, але водночас показово з погляду ілюстрації можливостей методології фізико-хімічного моделювання. Перемикання навантаження з одного фактора на інший у розглянутому вище випадку можна трактувати як посилення ролі хімізму у взаємодії газу з атомами матриці у разі окислювальних процесів.



О – CaO-Al₂O₃-SiO₂, ✕ – CaO-MgO-SiO₂, X – CaO-SiO₂-FeO-Fe₂O₃

Рисунок 1- Співвідношення між розрахованими та експериментальними значеннями розчинності води в шлаках

Слід мати на увазі, що випадки розчинення водяної пари припадають на область шлаків з деяким надлишком кисню, а випадки розчинення Н₂ на область шлаків з дефіцитом кисню. Іншими словами, розчинення води в шлаках відбувається тільки в окислювальних умовах, а водню у відновлювальних. У світлі викладеного логічно припустити, що домінуюча роль ρ у багатофакторних залежностях є ознакою перебування водню в відносно нейтральному стані, підвищення ролі параметра Δe свідчить про активізацію його взаємодії з навколишніми атомами матриці, в першу чергу кисню.

Висновки. Проведено моделювання впливу хімічного складу шлакових розплавів на ступінь розчинності водню та парів води та розроблено моделі структури шлакових та металевих розплавів, які використані для оцінки впливу різних варіантів розміщення домішкових елементів у розплавах на їхній зарядовий стан. Результати розрахунків виконано при припущенні, що структура розплавів системи CaO-SiO_2 повністю упорядкована. Аналіз експериментальних даних показує, що шлак, порівняно з металом, зазвичай відносно пересичений воднем. Це свідчить про те, що шлак дійсно є захисним середовищем і передача водню через нього металу пов'язана з необхідністю подолання іонами енергетичного бар'єру на міжфазному кордоні метал-шлак. Аналіз отриманих результатів показав, що для доменних шлаків, що формуються в умовах відновлювальної атмосфери, на поглинання водяної пари визначальний вплив надає зміна параметра ρ , тобто ступеня заповненості аніонних міжвузлів катіонами. Для шлаків ж окислювального виробництва ситуація змінюється і основне навантаження в поглинальній здатності шлаку переходить від ρ (для $C_{\text{H}_2\text{O}}=f(\rho)$ $r=0,19$) до Δe (для $C_{\text{H}_2\text{O}}=f(\Delta e)$ $r=0,69$).

ЛІТЕРАТУРА

1. Приходько Е.В., Тогобицька Д.М. Фізико-хімічне моделювання процесів міжатомної взаємодії у металургійних розплавах. Вісник ПДТУ: Сб.научн.трудів. Вип. №7.- Маріуполь, 1998.- С. 72-83.
2. Ткачов В.І., Холодний В.І., Левіна І.М. Працездатність сталей та сплавів у середовищі водню. -Львів: Вид.ФМІ, 1999. -255 с.
3. Гаврилюк В.Г. Розподіл вуглецю у сталі. -К.: Наукова думка, 1987. -208 с.
4. Приходько Е.В., Белькова А.І. Фізико-хімічні критерії з метою оцінки впливу мікронеоднорідності структури оксидних розплавів з їхньої властивості //Теорія і практика металургії. – Дніпропетровськ. -1998. -№3. -С.25-28.
5. Приходько Е.В., Белькова А.І. Фізико-хімічні критерії з метою оцінки впливу мікронеоднорідності структури оксидних розплавів з їхньої властивості //Теорія і практика металургії. – Дніпропетровськ. -1998. -№3. -С.25-28.

SIMULATION OF THE INFLUENCE OF SLAG COMPOSITION ON HYDROGEN ACCESS TO METAL

Avtonomov D.V., Kamkin V.Yu., Togobytska D.M., Mianovska Ya.V.

Abstract. *The influence of the chemical composition of slag melts on the degree of solubility of hydrogen and water vapor was simulated and models of the structure of slag*

and metal melts were developed, which were used to assess the influence of various options for placing impurity elements in melts on their charge state. The dissolution of water vapor falls on the region of slags with some excess oxygen, and the dissolution of hydrogen - on the region of slags with a deficiency of oxygen. In other words, the dissolution of water in slags occurs only under oxidizing conditions, and hydrogen - under reducing conditions. In light of the above, it is logical to assume that the dominant role of ρ in multifactorial dependencies is a sign of hydrogen being in a relatively neutral state, an increase in the role of the parameter Δe indicates the intensification of its interaction with the surrounding atoms of the matrix, primarily oxygen.

Keywords: *hydrogen, solubility, slag, slag properties, modeling.*

REFERENCE

1. Prykhodko E.V., Tohobytska D.M. Fizyko-khimichne modeliuвання protsesiv mizhatomnoi vzaiemodii u metalurhiinykh rozplavakh. Visnyk PDTU: Sb.nauchn.trudiv. Vyp. №7.- Mariupol, 1998.- S. 72-83.
2. Tkachov V.I., Kholodnyi V.I., Levina I.M. Pratsездatnist stalei ta splaviv u seredovyshchi vodniu. -Lviv: Vyd.FMI, 1999. -255 s.
3. Havryliuk V.H. Rozpodil vuhletsu u stali. -K.: Naukova dumka, 1987. -208 s.
4. Prykhodko E.V., Bielkova A.I. Fizyko-khimichni kryterii z metoiu otsinky vplyvu mikroneodnorodnosti struktury oksydneykh rozplaviv z yikhnoi vlastyvoli //Teoriia i praktyka metalurhii. – Dnipropetrovsk. -1998. -№3. -S.25-28.
5. Prykhodko E.V., Bielkova A.I. Fizyko-khimichni kryterii z metoiu otsinky vplyvu mikroneodnorodnosti struktury oksydneykh rozplaviv z yikhnoi vlastyvoli //Teoriia i praktyka metalurhii. – Dnipropetrovsk. -1998. -№3. -S.25-28.

ВИКОРИСТАННЯ ДРІБНОДИСПЕРСНИХ МАРГАНЦЕВИХ КОНЦЕНТРАТІВ В МЕТАЛУРГІЙНИХ ПРОЦЕСАХ

Ольшанський О.В., Панов О.О., Анкудінов Р.В., Мянговська Я.В.

Анотація. *Аналіз фізико-хімічних властивостей концентратів 2-го сорту показує, що характерна для них зернисто-піщана структура не забезпечує достатньої комкуємості аглошихти і не дозволяє при проведенні її грануляції отримати необхідний гранулометричний склад і міцнісні показники гранулюемого матеріалу. Одним із шляхів підвищення ступеня використання хвостів є попередня підготовка з введенням в'язучих речовин «Реагент торфгідрооксидний». У лабораторних умовах НМетАУ реагент торфгідрооксидний випробуваний при отриманні агломерату з шихти, що містить хвости збагачення марганцевої руди. Якість отриманого агломерату: вихід придатного - 81,3%; міцність на удар - 3,0%; міцність на стирання - 1,5%; хімічний склад готового агломерату: Мпзаг. - 28,72%, S - 0,211, C - 0,91%. Згідно з результатами фрактографічного аналізу виявлена тонка структура зламу спеченого зразка. Структура поверхні руйнування характеризується ямковою мікробудовою. Характерним є рельєф, утворений сукупністю окремих фасеток. Така будова пояснюється тим, що при досягненні граничних станів в локальних обсягах на ділянках, що представляють собою перешкоди для безперервності деформації, зароджуються мікропорожнечі.*

Ключові слова: *марганцева руда, концентрати, огрудкування, реагент торфгідрооксидний, агломерація, мікроструктура, екологія.*

Металургійна промисловість, а тим більш якісна металургія, в умовах ринку не може успішно функціонувати без використання легуючих металів, в тому числі без марганцю, хрому, ванадію, титану і інших металів. Серед цих металів провідне місце займає марганець, близько 90% його оксидів, з'єднань і сплавів використовується в чорній металургії. Однією із пріоритетних задач гірничо-металургійного комплексу України щодо раціонального використання марганцю родовища Нікопольського марганцеворудного басейну є розробка і впровадження на усіх стадіях наскрізної технологічної схеми ефективних технологій видобутку і збагачення руди, агломерації концентратів і виплавки марганцевих феросплавів широкого сортаменту, які забезпечують підвищення коефіцієнта корисного вилучення марганцю із руди і виплавки конкурентоспроможних марганцевих сплавів.

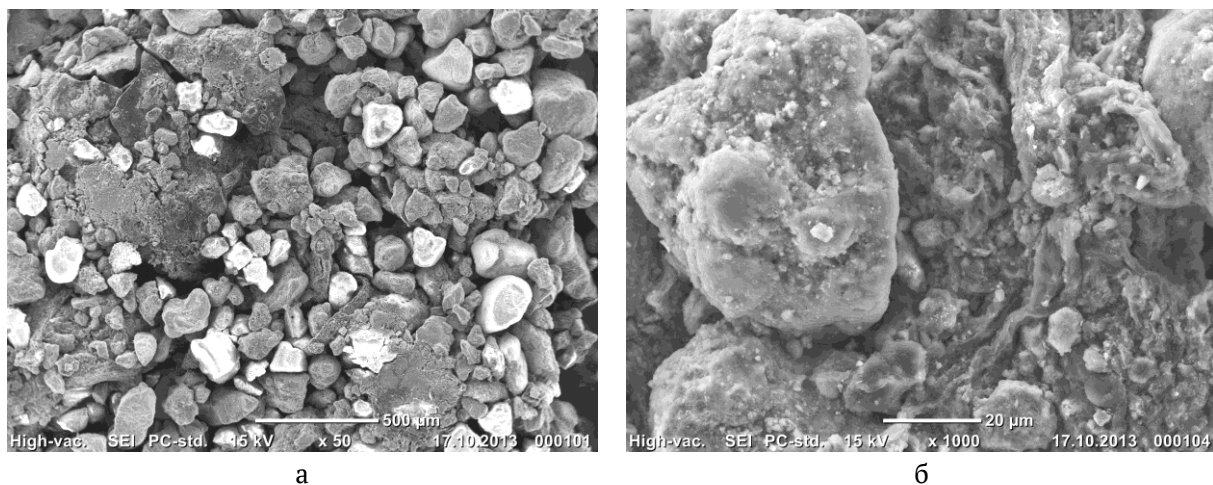
Найбільш відомим освоєним промисловим способом окускування вітчизняної марганцеворудної сировини, який має розвиток в останнє десятиліття, є агломерація [1-4]. При розробці Нікопольського родовища марганцевих руд в шламосховищах Покровського гірничо-збагачувального комбінату наміто шламів з середнім вмістом марганцю 10-12%. Аналіз фізико-хімічних властивостей концентратів 2-го сорту показує, що характерна для них зернисто-піщана структура не забезпечує достатньої комкуємості аглошихти і не дозволяє при проведенні її грануляції отримати необхідний гранулометричний склад і міцнісні показники гранулюємого матеріалу. Надалі це призводить до зниження продуктивності агломашини. Однак, труднощі їх використання полягають в поганому злипанні при огрудкуванні та брикетуванні, що потребує розробки технології огрудкування зі встановленням ефективного зв'язуючого.

Агломерат повинен мати високу міцність, кускуватість, пористість і значну відновлювальність при заданому хімічному складі. Однак використання марганецьвмісних шламів в агломераційному процесі обмежується їх фізичними, фізико-хімічними властивостями і вмістом шкідливих домішок. Збільшення частки шламів в агломераційній шихті вимагає вирішення наступних завдань: пошук способів підготовки, що дозволяють підвищити допустиму для утилізації в агломераційній суміші межу вологості шламів; поліпшення усереднення шламів в агломераційній шихті, забезпечення газопроникності шару, що спікається на агломераційній стрічці і скорочення виносу пилу. Для залучення у виробництво феросплавів марганцевих шламів їх необхідно окусковувати з метою поліпшення газопроникності їх насипної маси і отримання окатишів необхідної форми і розміру.

Одним із шляхів підвищення ступеня використання хвостів є попередня підготовка з введенням в'язучих речовин «Реагент торфгідрооксидний». У лабораторних умовах НМетАУ реагент торфгідрооксидний випробуваний при отриманні агломерату з шихти, що містить хвости збагачення марганцевої руди. Шихта для агломерації складалася: хвости збагачення руди - 73,53%; коксик - 7,35%; РТГ (реагент торфгідрооксидний) - 4,41%; зворот - 14,71%.

Співання здійснювали за таких умов: висота шару шихти – 300 мм; розрядження - 1000 мм вод.ст.; час запалювання - 1,5 хв.; температура запалювання - 1220°C; час співання - 14,5 хв.; максимальна температура співання - 1360°C; усадка - 80 мм. Якість отриманого агломерату: вихід придатного - 81,3%; міцність на удар - 3,0%; міцність на стирання - 1,5%; хімічний склад готового агломерату: $Mn_{зар.}$ - 28,72%, S - 0,211, C - 0,91%.

Морфологічний аналіз спеченої суміші і вихідних компонентів проводили за допомогою растрового електронного мікроскопа NeoScope II (фірми Jeol, Японія) в режимі високого вакууму при прискорюючій напрузі 15 кВ. Режим спостереження - secondary electron image (вторинні електрони). Характерний вид структур суміші до співання і після співання показаний на рис. 1 і 2.



а

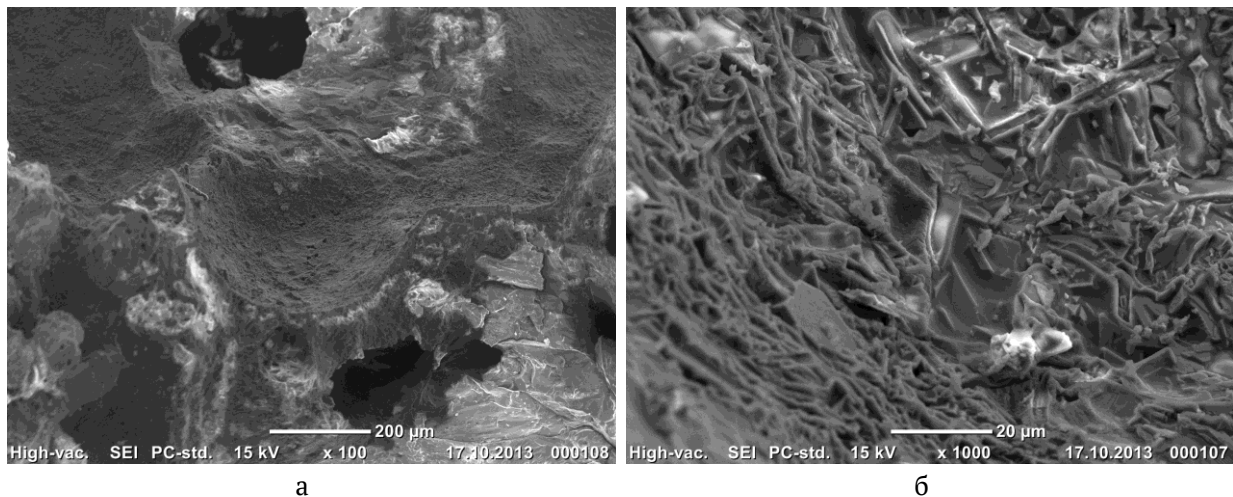
б

а – $\times 50$; б – $\times 1000$;

Рисунок 1 - Структура суміші до співання

Структура вихідної суміші представлена двома структурними складовими, які розрізняються за способом відображати вторинні електрони, розміром, формою і за способом розподілу часток в суміші. Відповідно до класифікації за способом відображати вторинні електрони, в структурі розрізняються світла структурна складова, що має в своїй основі вуглець (торф) і темно-сіра структурна складова, що має в своїй основі оксиди металу. У структурі вихідної суміші, згідно розмірного фактора, торф представлений частками дисперсністю від 0,6-170 мкм, в той же час, частинки, що містять оксиди металу мають дисперсність від 5,6-500 мкм, що істотно перевищує розмір торф'яних частинок. Дрібнодисперсні частки торфу (до 1,5 мкм)

рівномірно розподіляється на поверхні великих частинок, сформованих в процесі огрудкування. Згідно форми, темно-сіра структурна складова представлена частками граної форми і частки, що утворилися в процесі огрудкування (частки близько 20 мкм, які злиплися під впливом підвищеної вологості і руйнуються під дією незначного навантаження (рис. 2.9, а). У той же час, торф'яна складова не має такої різкої відмінності за формою.



а – $\times 100$; б – $\times 1000$

Рисунок 2 - Структура спеченої суміші

Згідно з результатами фрактографічного аналізу виявлена тонка структура зламу спеченого зразка. Структура поверхні руйнування характеризується ямковою мікробудовою. Характерним є рельєф, утворений сукупністю окремих фасеток. Така будова пояснюється тим, що при досягненні граничних станів в локальних обсягах на ділянках, що представляють собою перешкоди для безперервності деформації, зароджуються мікропорожнечі. Зі збільшенням напруги мікропорожнечі ростуть, зливаються, що призводить до повного руйнування з утворенням на зламі заглиблень у вигляді ямок, з'єднаних між собою перемичками. Різний розмір ямок свідчить про різнозернистість структури, яка пов'язана з різною дисперсністю вихідних матеріалів суміші.

На "стінках" чашкового зламу спостерігаються сильно витягнуті лунки (рис. 2.10 г). Вони є результатом руйнування матеріалу уздовж поверхні локалізованого інтенсивного зсуву. Світла структурна складова суміші (торф) розташовується по межах зерен (лунок) і виконує сполучну функцію між більшими темно-сірими структурними складовими. У структурі поверхні зламу

виявлена макро- і мікропористість, яка також розташовується по межах зерен (лунок). За результатами кількісної металографії мінімальний розмір пір складає 20 мкм. Пори даного розміру складають 57% від всіх пір.

Відомо, що органічна речовина торфу складається з рослинних залишків, що зазнали різну ступінь розкладу. Походження торфу пов'язано з накопиченням залишків відмерлої рослинності, надземні органи якої гуміфікуються і мінералізуються в поверхневому шарі болота, що аерується, званому торфогенним горизонтом, ґрунтовими безхребетними тваринами, бактеріями і грибами. Підземні органи, що знаходяться в анаеробному середовищі, консервуються і утворюють структурну (волокнисту) частину торфу. Елементарний склад торфу: 50-60% вуглецю, 5,0-6,5% водню, 30-40% кисню, 1-3% азоту, 0,1-1,5% сірки на горючу масу. У компонентному складі органічної маси торфу вміст водорозчинних речовин становить 1-5%, бітумів 2-10%, легкогідролізуємих з'єднань 20-40%, целюлози 4-10%, гумінових кислот 15-20%, лігніну 5-20%.

В останні роки відзначається інтенсивне зростання числа досліджень в області хімії гумінових кислот. Це пояснюється їх винятковою роллю у багатьох геохімічних, біологічних і біохімічних процесах. Вони є високо реакційно-здатними і активними іонообмінними речовинами, які утворюють міцні зв'язки з багатьма іонами і молекулами, елементами, що знаходяться в розчині, а також включених в кристалічну структуру мінералів. Ці речовини вступають в реакцію взаємодії з катіонами металів з утворенням різного роду з'єднань. В основі цих взаємодій лежать процеси іонного обміну. Гумінові кислоти стабілізують розчинні форми кремнезему. Критичний час гелеутворення кремнезему зменшується через спільну коагуляцію золю кремнезему і гумінових кислот. Коагуляція відбувається як внаслідок підвищення вмісту гумінових кислот в розчині, так і через збільшення концентрації в ньому кремнезему і формуються малорозчинні продукти взаємної поліконденсації, що спостерігається при використанні реагенту торфгідроксидний в якості в'язучого при підготовці до спікання концентратів 2-го сорту фракції 0-1мм, які одержують при збагаченні марганцевої руди.

Висновки. Для використання у виробництві феросплавів дрібнодисперсних марганцевих вторинних матеріалів необхідно окусковувати з метою поліпшення газопроникності їх насипної маси і отримання гранул необхідної форми і розміру. Одним із шляхів підвищення ступеня використання хвостів є попередня підготовка з введенням в'язучих речовин «Реагент торфгідрооксидний». Згідно з результатами фрактографічного аналізу виявлена тонка структура зламу спеченого зразка. Характерним є рельєф, утворений сукупністю окремих фасеток. Така будова пояснюється тим, що при досягненні граничних станів в локальних обсягах на ділянках, що представляють собою перешкоди для безперервності деформації, зароджуються мікропорожнечі. У лабораторних умовах НМетАУ реагент торфгідрооксидний випробуваний при отриманні агломерату з шихти, що містить хвости збагачення марганцевої руди. Шихта для агломерації складалася: хвости збагачення руди - 73,53%; коксик - 7,35%; РТГ (реагент торфгідрооксидний) - 4,41%; зворот - 14,71%. Якість отриманого агломерату: вихід придатного - 81,3%; міцність на удар - 3,0%; міцність на стирання - 1,5%; хімічний склад готового агломерату: $Mn_{зар.}$ - 28,72%, S - 0,211, C - 0,91%.

ЛІТЕРАТУРА

1. Марганец. Гасик М.И. – М.: Металлургия, 1992. – 608 с.
2. Развитие производства марганцевых ферросплавов в электропечах. / Б.М. Сафонов, В.В. Мураховский // Сталь. – 1983. – №5. – С. 5-7.
3. Металлургия марганца Украины. / Б.Ф. Величко, В.А. Гаврилов, М.И. Гасик, С.Г. Грищенко и др. // – Київ: Техніка, 1996. – 472 с.
4. Теория и технология электрометаллургии ферросплавов. / Гасик М.И., Лякишев Н.П. // СП Интермет Инжиниринг, 1999. – 764 с.

USE OF FINELY DISPERSED MANGANESE CONCENTRATES IN METALLURGICAL PROCESSES

Olshansky O.V., Panov O.O., Ankudinov R.V., Myanovska Ya.V.

Abstract. Analysis of the physicochemical properties of the 2nd grade concentrates shows that the characteristic granular-sandy structure does not provide sufficient compaction of the sinter charge and does not allow to obtain the required granulometric composition and strength indicators of the granulated material during its granulation. One of the ways to increase the degree of utilization of tailings is preliminary preparation with the introduction of binders "Porf hydroxide reagent". In the laboratory conditions of

NMetAU, the peat hydroxide reagent was tested when obtaining a sinter from a charge containing tailings from the enrichment of manganese ore. The quality of the obtained sinter: yield of usable - 81.3%; impact strength - 3.0%; abrasion strength - 1.5%; chemical composition of the finished sinter: Mntotal - 28.72%, S - 0.211, C - 0.91%. According to the results of fractographic analysis, a fine fracture structure of the sintered sample was revealed. The structure of the fracture surface is characterized by a pitted microstructure. The relief formed by a set of individual facets is characteristic. Such a structure is explained by the fact that when limit states are reached in local volumes, microvoids are formed in areas that represent obstacles to the continuity of deformation.

Keywords: manganese ore, concentrates, agglomeration, peat hydroxide reagent, agglomeration, microstructure, ecology.

REFERENCE

1. Marhanets. Hasyk M.Y. – M.: Metallurhyia, 1992. – 608 s.
2. Razvytye proyzvodstva marhantsevykh ferrosplavov v elektropetchakh. / B.M. Safonov, V.V. Murakhovskiy // Stal. – 1983. – №5. – S. 5-7.
3. Metallurhyia marhantsa Ukrainy. / B.F. Velychko, V.A. Havrylov, M.Y. Hasyk, S.H. Hryshchenko y dr. // – Kyiv: Tekhnika, 1996. – 472 s.
4. Teoriya y tekhnolohiya elektrometallurhyy ferrosplavov. / Hasyk M.Y., Liakyshev N.P. // SP Ynternet Ynzhyrynynh, 1999. – 764 s.

СЕКЦІЯ 2

**ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ В ПРОЦЕСАХ ОДЕРЖАННЯ
МАТЕРІАЛІВ ІЗ ЗАДАНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ**

SECTION 2

**INFORMATION TECHNOLOGIES IN THE PROCESSES OF OBTAINING
MATERIALS WITH SPECIFIED PROPERTIES**

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ РІЗАННЯ СОРТОВОГО ПРОКАТУ НА РЕЙКОБАЛОЧНИХ ТА ВЕЛИКОСОРТНИХ СТАНАХ

Зінченко М. Д.¹, Потап О. Ю.², Бурчак А. А.³, Михайловський М. В.⁴

¹ Український державний університет науки і технологій, к. т. н., доцент, Україна

² Український державний університет науки і технологій, к. т. н., доцент, Україна

³ Український державний університет науки і технологій, ст. викладач, Україна

⁴ Український державний університет науки і технологій, к. т. н., доцент, Україна

Анотація. Метою роботи є дослідження умов різання останньої штанги мірної довжини та залишку прокату в умовах нестабільної довжини розкату, що є наслідком коливань розмірів заготовок та температурного режиму прокатки. В роботі показано, що величина залишку, починаючи з якого треба різати на дві штанги нормальної довжини, визначається економічною доцільністю, що дорожче – штанга мірної довжини та залишок або дві штанги нормальної довжини. Наведено вираз для отримання величини залишку в залежності від міри штанги мірної довжини, коефіцієнтів вартості штанг нормальної довжини та відходів. Для умов прокатки швелера 24 на стані 800 величина залишку складає 0,86 м. Показано, що для забезпечення максимального прибутку в залежності від величини залишку, остання штанга мірної довжини може бути порізана такими способами: на штангу мірної довжини та залишок, на дві штанги нормальної довжини або на штангу мірної довжини та штангу нормальної довжини.

Ключові слова: довжина розкату, різання, штанга мірної довжини, штанга нормальної довжини, залишок.

Вступ. При виробництві сортового прокату на великосортних і рейкобалочних станах прокат поставляється штангами мірної довжини відповідно замовленню, кратної мірної довжини, немірної довжини. Прокат виготовляється довжиною в межах від 4 м до 11,7 або 12 м. Різання готового прокату здійснюється на пилах гарячої різки, при цьому застосовуються різні схеми розкрою прокату [1].

Коливання довжини розкату, які обумовлені коливаннями розмірів заготовки, температури розкатів, зносом валків і підшипників, призводять до того, що остання штанга виявляється або мірної довжини із залишком, або скороченою, тобто немірної довжини. У випадку, якщо залишок перевищує величину технологічної обрізі, щоб запобігти переводу у відходи придатного

прокату, остання штанга мірної довжини і залишок ріжуться на дві штанги немірної нормальної довжини.

Однак виникає питання, починаючи з якої довжини залишку доцільно різати останню штангу мірної довжини і залишок на дві штанги немірної нормальної довжини.

Основний матеріал. Зрозуміло, що необхідно виходити з економічної доцільності, що коштує дорожче: штанга мірної довжини і залишок або дві штанги нормальної довжини. При цьому треба враховувати обмеження, які накладаються обладнанням, технологічним процесом прокатки та процесом різання розкату на пилах.

Ця умова може бути записана у наступному вигляді:

$$Cl_m + K_{отх} Cl_x = K_{норм} C(l_m + l_x) \quad (1)$$

де C – вартість 1 т штанг мірної довжини;

l_m – довжина штанги мірної довжини;

l_x – довжина залишку;

$K_{отх}$ – коефіцієнт вартості відходів;

$K_{норм}$ – коефіцієнт вартості штанг нормальної довжини.

Коефіцієнти вартості відходів і штанг нормальної довжини визначаються відносно вартості штанг мірної довжини і є безрозмірними.

Після перетворення виразу (1) отримаємо вираз для залишку l_x :

$$l_x = \frac{(1 - K_{норм})}{(K_{норм} - K_{отх})} l_m, \quad (2)$$

Можуть бути застосовані різні схеми різання залишку готового розкату в залежності від його довжини: різання на штангу мірної довжини і залишок, різання на дві штанги нормальної довжини, різання на штангу мірної довжини і штангу нормальної довжини. Але при цьому необхідно дотримуватися умови, щоб вартість отриманих після різання штанг була максимальною.

На рис. 1 наведені залежності умовної вартості прокату при різанні залишку за вказаними вище схемами різання для профілю швелер 24, які отримані для штанги мірної довжини 11,7 м і коефіцієнтів вартості $K_{норм} = 0,94$, $K_{отх} = 0,12$. Значення коефіцієнтів обрані виходячи з цін на прокат мірної і

нормальної довжини та відходи. Довжина залишку, при якому прокат доцільно різати на дві штанги нормальної довжини складає 0,86 м.

Залежність 1 відповідає випадку різання на штангу мірної довжини і залишок, залежність 2 відповідає випадку різання на дві штанги нормальної довжини, залежність 3 відповідає випадку різання на штангу мірної довжини і штангу нормальної довжини.

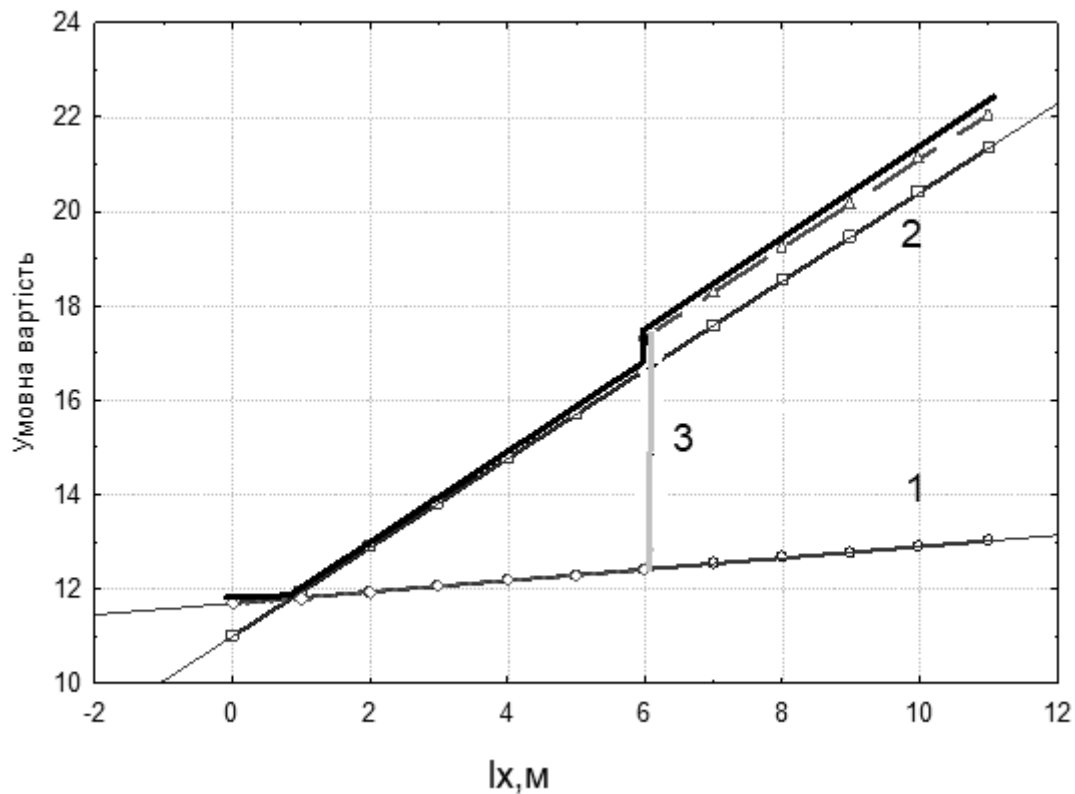


Рисунок 1 – Залежність умовної вартості від довжини залишку

Залежність 1 побудована за виразом:

$$V = l_m + K_{\text{відх}} * l_x \quad (3)$$

Залежність 2 побудована за виразом:

$$V = K_{\text{нрм}}(l_m + l_x) \quad (4)$$

Залежність 3 побудована за виразами:

$$\begin{aligned} V &= l_m + K_{\text{відх}} l_x, \text{ якщо } l_x \leq l_{\text{нрм.min}} \\ V &= l_m + K_{\text{нрм}} l_x, \text{ якщо } l_x \geq l_{\text{нрм.min}} \end{aligned} \quad (5)$$

Залежність 3 має ламаний характер, це обумовлено тим, що мінімальна довжина штанги нормальної довжини за технологічними умовами для швелера 24 становить 6 м. Тому, поки залишок не перевищує величину мінімального

значення, довжини штанги нормальної довжини дана залежність повторює залежність 1, тобто є мірна довжина штанги і залишок. Як тільки залишок стане рівним мінімальному значенню штанги нормальної довжини, то в цьому випадку відбувається стрибок на величину штанги нормальної довжини, і далі залежність 3 йде паралельно і вище залежності 2.

Очевидно, що ламана крива, яка обмежує вказані залежності, забезпечуватиме максимальний рівень доходу, а це вказує на те, що для отримання максимального доходу в залежності від величини залишку необхідно застосовувати різні схеми різання залишку.

Висновки. Аналіз процесу різання показав, що визначення різання останньої штанги та залишку на дві штанги нормальної довжини треба здійснювати в залежності від довжини залишку, яка залежить від мірної довжини штанги та коефіцієнтів вартості штанг нормальної довжини та відходів. Для забезпечення максимального рівня доходів від реалізації прокату треба різання розкату здійснювати такими способами: на штангу мірної довжини та залишок, на дві штанги нормальної довжини або на штангу мірної довжини та штангу нормальної довжини, але при цьому необхідно дотримуватися критерію максимальної вартості отриманих після різання штанг.

ЛІТЕРАТУРА

Технологічна інструкція з виробництва сортового прокату на стані 550-2 прокатного цеха № 2 ТІ 233-ПС-02-96. ДМЗ, 1997. 447 с.

RESEARCH OF THE CUTTING PROCESS OF ROLLED SECTION STEEL ON RAIL-BEAM AND LARGE-SIZE ROLLING MILLS

Zinchenko M. D., Potap O. Y., Burchak A. A., Mykhailovsky M. V.

Abstract. *The aim of the work is to study the conditions of cutting the last bar of the measured length and the remaining rolled product under conditions of unstable rolling length, which are realized as a result of fluctuations in the sizes of the blanks and the temperature regime of rolling.*

The work shows that the amount of the remainder, starting from which it is necessary to cut into two bars of normal length, is determined by economic feasibility, which is more expensive – a bar of measured length and a remainder or two bars of normal length.

An expression is given for obtaining the residual value depending on the size of the bar of the measured length, the cost coefficients of the bars of the normal length and waste. For the conditions of rolling the channel 24 on the mill 800, the remainder value is 0.86 m.

It is shown that to ensure maximum profit depending on the remainder value, the last bar of the measured length can be cut in the following ways: into a bar of the measured length and the remainder, into two bars of the normal length or into a bar of the measured length and a bar of the normal length.

Keywords: *rolling length, cutting, bar of measured length, bar of normal length, remainder.*

REFERENCE

1. Tekhnolohichna instruktsiia z vyrobnytstva sortovoho prokatu na stani 550-2 prokatnoho tsekha № 2 TI 233-PS-02-96.DMZ. Dnipro, 1997. 447 s.

IMPROVEMENT OF COOLING REGIMES FOR THE FORMATION OF MECHANICAL PROPERTIES OF HOT-ROLLED SHEETS

Likhosha M.L.¹, Boiarkin V.V.²

¹*Ukrainian State University of Science and Technology, PhD student Ukraine*

²*Ukrainian State University of Science and Technology, candidate of technical sciences,
associate professor, Ukraine*

Abstract. *The global demand for hot-rolled sheets made of steel and non-ferrous alloys continues to grow steadily due to their versatility and wide range of applications. Hot-rolled products serve as a basis for further processing into cold-rolled materials used in the automotive industry and other sectors. At the same time, a significant portion of hot-rolled sheets is used directly in construction industry and mechanical engineering, as well as being in demand in the energy and shipbuilding industries. High requirements for strength, plasticity, durability and corrosion resistance of hot-rolled sheets dictate the need for precise control over temperature regimes throughout the entire technological process. Optimization of the pre-rolling heating and controlled cooling regimes of hot-rolled products allows the modification of the metal's microstructure and mechanical properties. The use of mathematical modeling will allow for the study of thermal regimes and the development of recommendations for their improvement.*

Keywords: *hot-rolled sheet, mechanical properties, heating regimes, cooling regimes, mathematical modeling*

The analysis of modern technological schemes for the production of hot-rolled steel products, such as the Danieli QSP-DUE caster-rolling complex [1], under various rolling conditions, particularly using endless rolling mode, reflects current trends in thermomechanical processing.

A typical production scheme of the hot-rolled sheets (Figure 1) involves slab formation via continuous casting, followed by soft reduction and feeding into a tunnel furnace where temperature homogenization of the slabs occurs. Next, the material is rolled through roughing and finishing stands, with subsequent controlled multi-zone laminar cooling. A unique feature of endless rolling is the additional high-speed reheating of the sheets using induction heaters, installed between the roughing and finishing groups of stands. This allows for uniform temperature

distribution across the sheet thickness, which is critical for ensuring the required mechanical properties of steel.

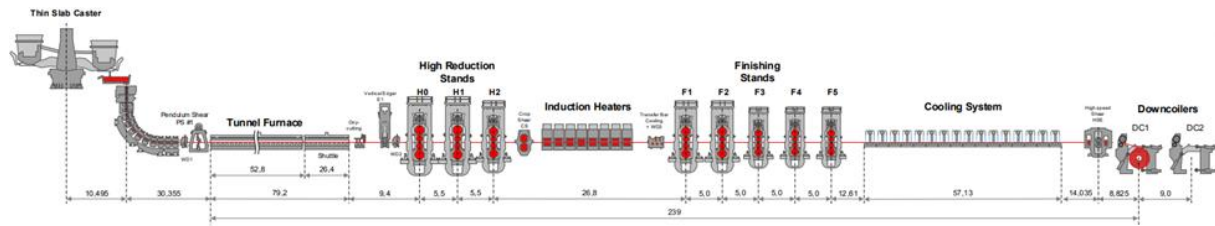


Figure 1 – Technological layout of the Danieli QSP-DUE caster-rolling complex [2]

A precise analysis and control of heating, rolling, and cooling temperature regimes is essential for forming the final characteristics of hot-rolled sheets. One of the most important stages is controlled cooling after rolling, as it directly affects phase transformations, grain size, residual stresses, texture, and the final mechanical properties of the material. Available research confirms that cooling rate significantly influences the mechanical properties of hot-rolled sheets.

Excessive cooling rates may lead to the formation of martensitic or bainitic structures, which increase hardness but reduce plasticity. Conversely, slower cooling promotes the formation of ferrite-pearlite structures, improving machinability but potentially reducing strength [3, 4]:

- slow cooling (0,5 – 1 K/s) contributes to the formation of polygonal ferrite and pearlite, improving plasticity but reducing strength;
- accelerated cooling (5 – 30 K/s) results in bainitic structures with fine-grained elements, providing balanced mechanical properties;
- extremely fast cooling (up to 90 K/s) facilitates martensitic formation, increasing hardness but reducing plasticity and impact strength.

Conclusions. The use of traditional cooling schemes does not always ensure full control over the required properties of the metal, which requires the development of new approaches and the improvement of existing cooling strategies. Considering the complex relationship between temperature regimes and the final properties of hot-rolled sheets, numerical modeling is essential for analyzing cooling processes.

The development of a mathematical model will allow for the determination of optimal temperature intervals and cooling regimes, as well as the analysis of phase

transformations required to achieve the desired mechanical characteristics of hot-rolled products.

REFERENCE

1. Danieli QSP DUE. https://www.danieli.com/en/products/processes-technologies/product-lines/duel_26_192.htm
2. Danieli DUE from SGJT to green steel and ready for automotive exposed. <https://2023.aisusteel.org/wp-content/uploads/F-3-1-DANIELI-DUE-From-SGJT-to-green-steel-and-ready-for-automotive-exposed.pdf>
3. Wang, H., Cao, L., Li, Y. et al. Effect of cooling rate on the microstructure and mechanical properties of a low-carbon low-alloyed steel. J Mater Sci 56, 11098–11113 (2021). <https://doi.org/10.1007/s10853-021-05974-3>
4. Schöttler J, Maiwald T, Linke G. Production of Directly Quenched High-Strength Hot-Rolled Strip Steels - Influence of Rolling and Cooling Conditions on Mechanical Properties and Flatness. MSF 2016;854:29–34. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.854.29>

ВДОСКОНАЛЕННЯ РЕЖИМІВ ОХОЛОДЖЕННЯ ДЛЯ ФОРМУВАННЯ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ГАРЯЧЕКАТАНИХ ЛИСТІВ

Ліхоша М.Л., Бояркін В.В.

Анотація. Споживання гарячекатаного листового прокату зі сталей та кольорових сплавів у світі стабільно зростає через його універсальність та широке застосування. Гарячекатаний листовий прокат є основою для подальшої переробки в холоднокатаний прокат для автомобілебудування та ін. Значна частина гарячекатаного листового прокату безпосередньо використовується у будівельній галузі та машинобудуванні, прокат затребуваний в енергетиці та суднобудуванні. Високі вимоги до міцності, пластичності, зносостійкості та корозійної стійкості гарячекатаного листового прокату вимагають ретельного контролю температурних режимів під час усього технологічного процесу. Оптимізація температурних режимів передпрокатного нагріву і контрольованого охолодження гарячекатаних листів дозволяє керовано змінювати мікроструктуру та механічні властивості металу. Використання математичного моделювання дозволить дослідити температурні режими та розробити рекомендації щодо їх вдосконалення.

Ключові слова: гарячекатаний листовий прокат, механічні властивості, режими нагріву, режими охолодження, математичне моделювання

ЛІТЕРАТУРА

1. Danieli QSP DUE. https://www.danieli.com/en/products/processes-technologies/product-lines/duel_26_192.htm

2. Danieli DUE from SGJT to green steel and ready for automotive exposed. <https://2023.aisusteel.org/wp-content/uploads/F-3-1-DANIELI-DUE-From-SGJT-to-green-steel-and-ready-for-automotive-exposed.pdf>
3. Wang, H., Cao, L., Li, Y. et al. Effect of cooling rate on the microstructure and mechanical properties of a low-carbon low-alloyed steel. J Mater Sci 56, 11098–11113 (2021). <https://doi.org/10.1007/s10853-021-05974-3>
4. Schöttler J, Maiwald T, Linke G. Production of Directly Quenched High-Strength Hot-Rolled Strip Steels - Influence of Rolling and Cooling Conditions on Mechanical Properties and Flatness. MSF 2016;854:29–34. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.854.29>

**PHYSICO-MECHANICAL PROPERTIES OF CERAMIC MATERIALS AND
COATINGS OBTAINED BY PLASMA SPRAYING:
QUALITY MANAGEMENT ASPECTS**

V.I. Liubushkin¹, O.B. Zagorodny², V.Yu. Bozhanova³, A.V. Liubushkina⁴,
O.Ye. Kononova⁵.

³Doct. of Econ. Sc., ³Prof., ⁵Doct. of Econ., Assoc.prof.

^{1,2,3,4}*Ukrainian State University of Science and Technologies Educational and Scientific
Institute «Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture», Ukraine*

⁵ *Chief Economist, LLC "BC "MEGA-BUD"*

Abstract. *The study aimed to develop high-quality ceramic material powders based on $Al_2O_3 \cdot Cr_2O_3$ and to determine their physico-mechanical properties, as well as the properties of coatings obtained from these powders through plasma spraying. The physico-mechanical properties of the powders were assessed using standard methodologies, including particle shape and size, granulometric distribution, density, flexural strength, elastic modulus, and the coefficient of linear thermal expansion. The study led to the development of high-quality, high-temperature protective materials of the $Al_2O_3 \cdot Cr_2O_3$ and CAS (cobalt alloy + spinel) types, and samples of coatings from these materials were manufactured. New high-quality thermal protection composite materials were developed for the coating of combustion chambers in gas turbine engines, and their physico-mechanical properties were determined. The newly developed high-quality thermal protection composite materials have been used to form shell components through plasma spraying to produce combustion liners for gas turbine engines. These components are undergoing industrial testing at Motor Sich JSC as part of implementing a quality management system.*

Keywords: *Ceramic composite material, plasma spraying, thermal protection coating, combustion chamber, gas turbine engine, quality management.*

The combustion liners of gas turbine engines operate under extreme conditions, including high temperatures ranging from 800 to 1800 °C and high gas flow velocities of up to 50 m/s. These conditions necessitate the development of new materials capable of maintaining operational integrity at elevated temperatures and gas flow speeds while also possessing enhanced physico-mechanical properties. Currently, ceramic composite materials are utilized for this purpose [1-3].

The physical properties of the composite powders included particle shape, size, granulometric distribution, density, and flowability. The particle shape was determined using optical and electron beam microscopy by analyzing projection images. The shape factor is defined as the ratio of the maximum ($\ell_{\max}$) to the minimum ($\ell_{\min}$) observed particle dimensions ($\ell_{\max}/\ell_{\min}$) – was used as a key characteristic. The granulometric composition of the powders was assessed using sieve and microscopic analysis.

In the sieve method, powder granularity was determined through the mechanical separation of a 100 g sample using a set of sieves arranged in a cascading manner. Fractions smaller than 125 μm were analyzed via microscopic examination using transmitted and reflected light with an eyepiece micrometer scale.

Bulk density was measured according to an established standard using a calibrated container, where the powder was poured through a funnel with a 5 mm outlet diameter. The mechanical properties of the ceramic material coatings—including flexural strength σ_{bend} , elastic modulus «E», and coefficient of linear thermal expansion « α ») were determined in accordance with DSTU 3716-98 “Ceramics. Method for Determining Flexural Strength.” The standard specifies a three-point bending test, where the specimen is freely placed on two supports and subjected to a centrally applied force. The tests were conducted using a Ynstron-TTDM-L type testing machine (Figure 1).

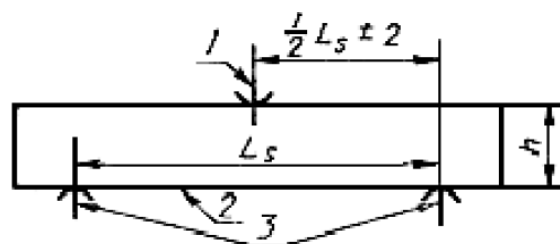


Figure 1 - Three-point bending pattern of sample (B)

1-load bearing support (pressure); 2-surface of the sample, which is working on stretching;
3-pillar that supports the sample.

The parameters of the sample loading pattern when bending are presented in Table 1.

Table 1

Parameters of the sample loading pattern when bending

Loading Scheme	Distance Between Support Rollers, L (mm)	Distance Between Loading Rollers, L/2 (mm)
B	40	20

The sample sizes are presented in Table 2. The elastic modulus was determined according to the standard.

Table 2

Sample sizes for test

Sample Type	Width (mm)	Thickness (mm)	Length (mm)
Bending Strength (σ)	4,0	3,0	50
Type I (for Elastic Modulus Determination)	10	10	30

The bending tests of the samples were conducted using a fixture designed to ensure minimal load eccentricity and experimental safety. The mechanical characteristics E^c , σ_{mu}^c , σ_T^c , were determined based on the autodiagram recorded by the testing machine in force–absolute deformation ($P-\Delta h$) coordinates, taking into account the recording scale. The determination of the thermal expansion coefficients for coatings made from experimental $Al_2O_3 \cdot Cr_2O_3$ spinel compositions was carried out in the temperature range of 100°C to 1000°C, with 100°C increments. The tests were performed using an MD-83 dilatometer according to the methodology of the Institute for Problems of Materials Science (IPMS) of the National Academy of Sciences of Ukraine. The sample length changes were recorded using a two-coordinate PDP4-002 potentiometer, while the sample temperature was measured with a KSP4 potentiometer. The calculation of the coefficient of thermal expansion was performed based on the dilatogram, taking into account the thermal expansion coefficient of the quartz system. The powders for plasma spraying were obtained using the sol-gel process.

Results

1. Particle Shape. Measurements showed that the irregularity factor for $Al_2O_3 \cdot Cr_2O_3$ powder ranges from 1.0 to 1.2, indicating a spherical particle shape. In contrast, the composite CAS powder (cobalt alloy + spinel) exhibits an irregularity factor of 2 to 5, with a characteristic fragmented particle shape (Figure 2).

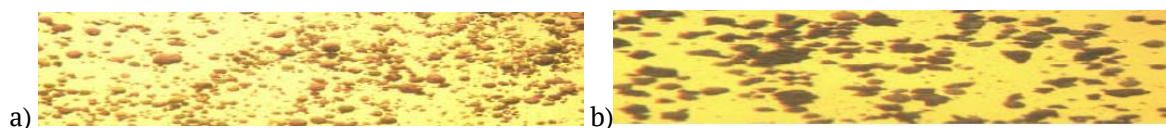


Figure 2 - General appearance of particles of:
a) spinel powder $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Cr}_2\text{O}_3$ x100; b) of CAS (cobalt alloy+spinel) x100.

The particle shape of the powders has a decisive impact on their technological properties (powder feeding into the plasma torch), as well as their density, permeability, and strength.

2. Particle Size. Composite powders are polydisperse systems consisting of particles of varying sizes. Depending on the range of particle sizes, the powder is characterized by its granulometric (fractional) composition. Thus, the conducted studies on composite powders of $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Cr}_2\text{O}_3$ and CAS (cobalt alloy + spinel) revealed that the powders have different geometric shapes: spherical shape is characteristic of the $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Cr}_2\text{O}_3$ composite, while a fragmented shape is typical for the CAS composite. The results of particle size measurements for the spinel powders and CAS, as well as their size distribution, are presented in Figure 3.

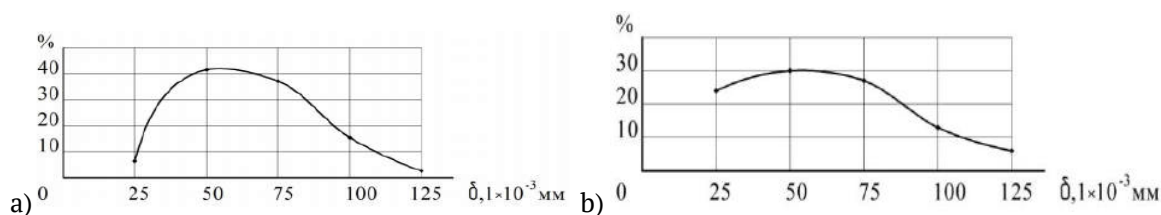


Figure 3 - Graph of particle size distribution for spinel powders, δ – partical size in mkm:
a) $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Cr}_2\text{O}_3$, δ – partical size in mkm; b) spinel powders CAS (cobalt alloy+spinel)

The particle size of the powders primarily ranges from 25 to 75 μm . This size range ensures the proper feeding of these powders into the plasma jet and the formation of coatings. The conducted studies on the bulk density and flowability of $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Cr}_2\text{O}_3$ spinel powders, as well as the composite ПЛПМК 63-H10, show a broad range of possibilities for transporting them from the dispenser to the plasma torch. The physico-mechanical properties of the coatings made from the investigated materials are presented in Table 3.

Table 3

Physical and mechanical properties of sprayed materials

№	Properties	Material Name		
		Spinel powders Al ₂ O ₃ ·Cr ₂ O ₃ ,	CAS (cobalt alloy+spinel)	Composite ПЦПК 63-H10
1	Flexural Strength, σ _{изг} , МПа	50/185*1	62,1/195*1	41/110*1
2	Elastic Modulus, E, МПа	150/344*1	161/360*1	60/81,4*1
3	Coefficient of Linear Thermal Expansion «α»·10 ⁻⁶ , 1/°C	8,2*2	9,8*3	10,1*4

Notes to Table 3:

*1- after annealing at 1000°C for 5 hours (denominator), before annealing (numerator);

*2- initial composition: 80% Al₂O₃·Cr₂O₃, measurement in the range of 20°C → 1000°C;

*3- in the temperature range 20°C → 1000°C, plasma spraying;

*4- in the temperature range 20°C → 1000°C; after annealing at 1000°C for 5 hours.

Composite CAS shows superior mechanical characteristics compared to other compositions. The coefficient of linear thermal expansion “α” of the ПЦПК 63-H10 composition is the highest. According to the data in Table 3, it is evident that annealing the materials enhances the strength properties of the composites by 2-3 times, with the ПЦПК63-H10 composition showing an increase of only 1.3 times.

Conclusions

1. The studies of the physico-mechanical properties of the developed Al₂O₃·Cr₂O₃ and CAS powders have demonstrated their high quality, owing to their potential application in the formation of plasma coatings. The particle shape and size meet technical requirements, which confirms their compliance with quality standards.

2. Plasma coatings made from Al₂O₃·Cr₂O₃ and CAS powders exhibit high flexural strength, and the coefficient of linear thermal expansion, which approaches that of the base material, allows for improved performance under alternating loads, indicating their high quality.

3. The ceramic material based on spinel and CAS can be recommended for the components of combustion chamber heat shields in gas turbine engines when integrated into the quality management systems of relevant specialized enterprises.

REFERENCES

1. Libert C.H. Tests of NASA ceramic thermal barrier coating for gas turbine engines// Thin Solid Films.- 1979. – 64, №2-P. 329-333.
2. Liubushkin V.I., Zagorodny O.B., Bozhanova V.Yu., Kononova O.Ye., Liubushkina A.V. Relevant issues in production management for manufacturing gas turbine engine burner segments using removable models // Proceedings. The eleventh world congress «Aviation in the XXI-st century». - «Safety in Aviation and Space Technologies». September 25-27, 2024. Kyiv, Ukraine. C. 182-185. URL.: <https://congress.nau.edu.ua/2024/info/Congress-2024.pdf>
3. Mc Kee D.W., Siemers P.A. Resistance of thermal barrier ceramic coating to hot salt corrosion. Thin Solid Films. - 1980. -73, №2-P.439-445.

ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ КЕРАМІЧНИХ МАТЕРІАЛІВ І ПОКРИТТІВ ОТРИМАНИХ ПЛАЗМЕННИМ НАПИЛЕННЯМ: АСПЕКТИ МЕНЕДЖМЕНТУ ЯКОСТІ

Любушкін Валерій, Загородній Олексій, Божанова Вікторія,
Любушкіна Анастасія, Кононова Олександра

Анотація. Метою досліджень було розробка високоякісних порошків керамічних матеріалів на основі $Al_2O_3 \cdot Cr_2O_3$ з визначенням їх фізико-механічних властивостей, а також властивостей покриттів із цих порошків отриманих плазмовим напиленням. Фізико-механічні властивості порошків визначали по загальновідомим методикам: форма та розміри часток, розподілення по крупності, щільність, границя міцності при згині, модуль пружності, коефіцієнт лінійного теплового розширення. Результати: на основі проведених досліджень отримано якісні високотемпературні захисні матеріали типу $Al_2O_3 \cdot Cr_2O_3$ та КСШ (кобальтовий сплав+шпінель), виготовлені зразки покриттів із цих матеріалів. Наукова новизна: розроблено нові високоякісні термозахисні композиційний матеріали для отримання покриттів камер згоряння газотурбінних двигунів та визначені їх фізико-механічні властивості. Практична цінність: розроблені нові високоякісні термозахисні композиційні матеріали використані для формування коркових деталей плазмовим напиленням при виготовленні жарових труб ГТД, деталі проходять промислові випробовування в умовах ВАТ «Мотор Січ» при впровадженні системи менеджменту якості.

Ключові слова: керамічний композитний матеріал, плазмове напилення, теплозахисне покриття, камера згоряння, газотурбінний двигун, менеджмент якості.

**ОСОБЛИВОСТІ ВПЛИВУ ХІМІЧНОГО СКЛАДУ НА ФОРМУВАННЯ
МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ НИЗЬКОВУГЛЕЦЕВИХ CR-MO-V СТАЛЕЙ
ЗВАРЮВАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ**

Олійник Е.В.¹, Парусов Е.В.², Чуйко І.М.³, Кукса О.В.⁴

¹Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України, аспірант, Україна,

²Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України, д.т.н., с.н.с., Україна,

³Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України, к.т.н., ст. досл., Україна

⁴К.т.н., Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України, Україна,

Анотація. Проведено аналіз впливу хімічного складу низьковуглецевих сталей зварювального призначення із системою легування Cr-Mn-Si-Mo-V та додатковим мікролегуванням бором на механічні властивості бунтового прокату за стаціонарного режиму термомеханічної обробки. На засадах регресійного аналізу 28 плавов побудовано прогнозні моделі зміни границь міцності та плинності й відносного звуження прокату. У якості незалежних змінних для моделей було обрано фізико-хімічний еквівалент зарядового стану металевої системи та вміст бору, які найбільш тісно пов'язані з комплексом механічних властивостей сталей для обраного масиву даних. Встановлено, що додатковим резервом для зниження міцності та підвищення пластичних характеристик прокату є зменшення у межах марочного складу вмісту легувальних елементів, насамперед С і Mn. Збільшення концентрації бору призводить до додаткового зміцнення та зниження пластичності металу імовірно за рахунок зменшення середнього розміру феритних зерен. Однак мікролегування бором відіграє позитивну роль у підвищенні деформованості прокату під час подальшого волочіння дроту, зв'язуючи атомарний азот у нітриди й перешкоджаючи розвитку деформаційного старіння металу в процесі холодного пластичного деформування.

Ключові слова: хімічний склад, механічні властивості, бунтовий прокат, математична модель, мікролегування

Вступ. Споживачі бунтового прокату, який призначено для виготовлення сталевих дроту, прагнуть отримати від виробника метал з максимальною технологічною пластичністю, у зв'язку з чим наполягають на нормуванні механічних характеристик на рівні, що забезпечується після пом'якшувального відпалу для низько- і середньовуглецевих сталей або патентування високовуглецевих сталей. Оскільки металургійні підприємства у більшості випадків не мають у своєму арсеналі печей для відпалу готового прокату або

патентувальних агрегатів, то для зниження міцності та підвищення пластичних показників металу доцільно застосовувати схеми знеміцнювальної термомеханічної обробки [1]. За такої умови хімічний склад сталі, поряд з умовами її охолодження та зеренною структурою аустеніту, чинить вирішальний вплив на структуроутворення та властивості прокату, а концентрація хімічних елементів визначає термодинаміку фазових перетворень, що відбуваються у процесі регульованого охолодження металу.

Зварювальний дріт суцільного перерізу найчастіше виготовляють шляхом холодного пластичного деформування (волочіння) бунтового прокату малого діаметру (5,5–6,5 мм). Таку металопродукцію зазвичай виготовляють із низьковуглецевих сталей (0,03–0,12 % ваг. С) з різноманітними системами легування, до яких можуть входити як часто використовувані у металургійній практиці легувальні елементи (Mn, Si, Cr, Ni, Mo, V, W, Al), так і в деяких випадках спеціальні добавки (Nb, Zr, Ti, Cu, В та ін.). Для бунтового прокату, призначеного для виготовлення зварювального дроту, критично важливим є формування у процесі виробництва мікроструктури, що складається з м'якої феритної матриці та мінімальної кількості твердих продуктів проміжного й зсувного перетворень переохолодженого аустеніту. Такий структурний стан вважається сприятливим з точки зору здатності металу сприймати без руйнування холодну пластичну деформацію з високими сумарними ступенями у процесі волочіння дроту [2]. Враховуючи це, зміна концентрації тих чи інших хімічних елементів у межах марочного складу сталі може істотно впливати на кінетику дифузійного $\gamma \rightarrow \alpha$ перетворення і, відповідно, на комплекс механічних властивостей прокату після регламентованого охолодження.

Хімічні елементи можуть впливати на дифузійне фазове перетворення в сталі через два основних механізми. Перший передбачає зміну відносної стійкості аустеніту (γ) і фериту (α) завдяки термодинамічному ефекту, що може бути виражений у різниці вільних енергій Гіббса ($G^\alpha - G^\gamma$), яка називається рушійною силою перетворення. Вплив цієї величини може бути продемонстровано у вигляді діаграм фазового стану сплаву. Другий механізм є більш тонким, оскільки залежить від швидкості перетворень. Рівноважна

розчинність легувального елементу не є однаковою в аустеніті та фериті. Якщо дозволяють умови, то розчинена речовина матиме тенденцію до перерозподілу між фазовими складовими. Необхідна дифузія у такому разі здатна обмежити кінетику процесу [3]. Насамперед такий ефект можна віднести до вуглецю в сталі. Інший кінетичний вплив рівноцінної важливості обумовлюється миттєвими концентраціями розчиненої речовини, атоми якої мають можливість сегрегувати на поверхні розділу. За цих обставин вони можуть зменшувати поверхневу міжфазну енергію на одиниці площі. Це механізм, за яким бор впливає на місця гетерогенного зародження фериту. Відносно невеликі концентрації бору можуть суттєво змінювати стійкість переохолодженого аустеніту, далеко від очікуваного впливу різниці вільних енергій Гіббса α - і γ -фази [3].

Мета роботи – визначення особливостей впливу хімічного складу низьковуглецевих сталей зварювального призначення із системою легування Cr-Mn-Si-Mo-V та додатковим мікролегуванням бором на механічні властивості бунтового прокату за стаціонарного режиму термомеханічної обробки.

Матеріал і методика дослідження. Для проведення статистичного аналізу були відібрані 28 плавок сталі марок Св-08ХГ2СМФ, Св-08ХГСМФА і Св-10ХГ2СМФ з додатковим мікролегуванням бором, виплавленої в електродуговій печі, розлитої на машині безперервного лиття заготовок з наступним гарячим пластичним деформуванням до діаметру 5,5 мм на високошвидкісному дрібносортно-дротяному прокатному стані та регламентованим водо-повітряним охолодженням на лінії Стелмор. При цьому параметри режиму термомеханічної обробки були незмінними. Статистична характеристика досліджуваних плавок наведена у табл.

Для встановлення зв'язку між механічними властивостями прокату та хімічним складом сталі використано металохімічну модель міжатомної взаємодії елементів, розроблену в Інституті чорної металургії НАН України проф. Приходько Е. В. [4]. Відповідно до цієї методики у якості «згортки» хімічного складу сталі вводяться інтегральні параметри: середньостатистична

між'ядерна відстань d і фізико-хімічний еквівалент Z^Y , що характеризує середній розподіл електронної щільності між елементами ближнього порядку і внесок основної матриці (насамперед, вмісту C, Mn, Si). Комплекс параметрів міжатомної взаємодії розраховується на засадах аналізу всіх можливих пар взаємодіючих елементів з урахуванням їх індивідуальних характеристик, встановлених квантовою фізикою, а також вмісту елементів у металевій системі.

Прогнозні моделі зміни механічних властивостей прокату побудовано з використанням стандартних методів математичної статистики (регресійним аналізом).

Таблиця 1

Статистична характеристика масиву досліджуваних даних (n = 28 плавів)

Показник*	Одиниця вимірювання	Значення		
		min	max	середнє
C	% ваг.	0,04	0,10	0,07
Mn	% ваг.	0,87	1,30	1,11
Si	% ваг.	0,22	0,57	0,36
Cr	% ваг.	0,65	0,78	0,73
Ni	% ваг.	0,06	0,10	0,08
Cu	% ваг.	0,10	0,15	0,13
Mo	% ваг.	0,22	0,54	0,41
V	% ваг.	0,15	0,19	0,17
N	% ваг.	0,006	0,015	0,008
B	% ваг.	0,005	0,009	0,007
S	% ваг.	0,002	0,013	0,006
P	% ваг.	0,010	0,016	0,012
Fe	% ваг.	96,68	97,32	96,92
R _m	МПа	455	764	614
R _e	МПа	226	549	363
Z	%	57	89	64
Примітка*: R _m – границя міцності під час розтягування; R _e – границя плинності; Z – відносне звуження.				

Результати. Статистична обробка експериментальних даних показала, що збільшення концентрації всіх легувальних елементів (C, Si, Mn, Cr, Ni, V, B) підвищує характеристики міцності та зменшує пластичність досліджуваних сталей. Фізико-хімічний еквівалент Z^Y був пов'язаний з комплексом механічних властивостей сталей аналогічним чином, а структурний параметр d має від'ємний парний зв'язок з характеристиками міцності та прямий парний

зв'язок з показником пластичності. Таким чином, чим меншою є середня між'ядерна відстань d і більшим хімічний еквівалент Z^Y , тим вищою буде міцність досліджуваних сталей.

Враховуючи кількість досліджуваних плавок у вихідному масиві даних ($n = 28$), для коректної статистичної моделі можливе використання не більше двох аргументів. Аналіз достовірності даних для кожної із плавок дозволив обрати у якості незалежних змінних моделей механічних властивостей прокату фізико-хімічний еквівалент зарядового стану (Z^Y) і вміст бору (B), які найбільш тісно пов'язані з комплексом механічних властивостей сталей для обраного масиву даних. На основі регресійного аналізу для сталей Св-08ХГ2СМФ, Св-08ХГСМФА, Св-10ХГ2СМФ були отримані наступні прогнозні моделі, що адекватно узгоджуються з експериментальними даними:

$$R_m(\text{МПа}) = -11735 + 9953,333 \cdot Z^Y + 23269,05 \cdot B, (R = 0,95) \quad (1)$$

$$R_e(\text{МПа}) = -7097,61 + 6018,757 \cdot Z^Y + 9948,73 \cdot B, (R = 0,87) \quad (2)$$

$$Z(\%) = 1150,546 - 880,766 \cdot Z^Y - 1343,17 \cdot B, (R = 0,93) \quad (3)$$

Висновки. Аналіз отриманих прогнозних моделей показав, що додаткове зниження міцності та підвищення пластичних характеристик прокату з досліджуваних сталей можливе у разі зниження у межах марочного складу вмісту легувальних елементів, насамперед С і Мп.

Мікролегування бором досліджуваних сталей призводить до різноспрямованих наслідків. З одного боку, введення бору в низьковуглецеві сталі суттєво підвищує стійкість переохолодженого аустеніту в області дифузійного розпаду, знижує температуру $\gamma \rightarrow \alpha$ перетворення та сприяє формуванню феритної матриці з дрібнішим зерном у порівнянні зі сталями без бору. Дрібнозернистий стан, згідно із законом Холла-Петча, обумовлює підвищення міцності сталі, а зниження пластичності металу є наслідком такої еволюції характеристик міцності, що підтверджується отриманими математичними моделями (1)–(3). З іншого боку, бор, зв'язуючи атомарний азот у нітриди типу BN, перешкоджає розвитку процесів деформаційного старіння металу під час холодного пластичного деформування та сприяє підвищенню загальної деформованості прокату при переробленні його у дріт методом волочіння. Також мікродобавки бору до сталей зварювального

призначення вважаються доцільними з точки зору його впливу на структуроутворення зварних з'єднань, зменшуючи кількість видманштеттового фериту і збільшуючи кількість голчастого фериту в мікроструктурі швів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Олійник Е. В., Парусов Е. В., Чуйко І. М. Теоретичні та технологічні засади знеміцнюючого термомеханічного оброблення сталевого прокату зварювального призначення. Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні – ITMM'2024 : матер. міжнар. наук.-техн. конф., м. Дніпро, 10-11 квітня 2024 р. Дніпро : УДУНТ, – 2024. С. 57–64. <https://doi.org/10.34185/1991-7848.itmm.2024.01.010>
2. Парусов Е. В., Чуйко І. М., Олійник Е. В., Парусов О. В. Аналіз тенденцій та проблем виробництва прокату і дроту з низьковуглецевих Cr-Mo-V сталей зварювального призначення. Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії : сб. наук. пр. – 2024. Вип. 38. С. 431 – 454. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2024-38-431-454>
3. Bhadeshia H. K. D. H. Reliability of weld microstructure and property calculations. Welding Journal. – 2004. Vol. 83. P. 237s – 243s.
4. Togobitska D., Belkova A. New approach to evaluating the thermodynamic consistency of melts in the "Metal-Slag" system based on interatomic interaction parameters. Lithuanian Journal of Physics. – 2024. Vol. 64. No. 1. P. 58 – 71. <https://doi.org/10.3952/physics.2024.64.1.6>

FEATURES OF THE INFLUENCE OF CHEMICAL COMPOSITION ON THE FORMATION OF MECHANICAL PROPERTIES IN LOW-CARBON Cr-Mo-V WELDING STEELS

Eduard Oliinyk, Eduard Parusov, Ihor Chuiko, Oleh Kuksa

Abstract. *The influence of the chemical composition of low-carbon welding steels with a Cr-Mn-Si-Mo-V alloying system and additional boron microalloying on the mechanical properties of steel wire rod was analyzed under constant parameters of the thermomechanical treatment mode. Based on a regression analysis of 28 melts, predictive models were developed to estimate changes in tensile strength, yield strength, and reduction of area in the steel wire rod. The physicochemical equivalent of the metal system's charge state and the boron content both most closely correlated with the mechanical property set of the steels were selected as independent variables in the models. It was established that a potential method to further reduce strength and increase the plastic properties of steel wire rod is to decrease the content of alloying elements, primarily carbon and manganese, within the compositional range of the steel grade. An increase in boron concentration leads to higher strength and reduced plasticity of the metal, presumably due to a reduction in the average ferrite grain size. However,*

boron microalloying has a beneficial effect on the deformability of the wire rod during subsequent wire drawing, as it binds atomic nitrogen into nitrides and prevents deformation aging of the metal during cold plastic deformation.

Keywords: *chemical composition, mechanical properties, wire rod, mathematical model, microalloying*

REFERENCE

1. Oliinyk E. V., Parusov E. V., Chuiko I. M. Teoretychni ta tekhnolohichni zasady znemitsniuiuchoho termomekhanichnoho obroblennia stalevoho prokatu zvariuvalnogo pryznachennia. Informatsiini tekhnolihii v metalurhii ta mashynobuduvanni – ITMM'2024 : mater. intern. sci. tech. conf., Dnipro, April 10-11, 2024. Dnipro : USUST, – 2024. P. 57–64. [In Ukrainian]. <https://doi.org/10.34185/1991-7848.itmm.2024.01.010>
2. Parusov E. V., Chuiko I. M., Oliinyk E. V., Parusov O. V. Analiz tendentsii ta problem vyrobnytstva prokatu i drotu z nyzkovuhletsevykh Cr-Mo-V stalei zvariuvalnogo pryznachennia. Fundamentalni ta prykladni problemy chornoj metalurhii. – 2024. Vol. 38. P. 431 – 454. [In Ukrainian]. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2024-38-431-454>
3. Bhadeshia H. K. D. H. Reliability of weld microstructure and property calculations. Welding Journal. – 2004. Vol. 83. P. 237s – 243s.
4. Togobitska D., Belkova A. New approach to evaluating the thermodynamic consistency of melts in the "Metal-Slag" system based on interatomic interaction parameters. Lithuanian Journal of Physics. – 2024. Vol. 64. No. 1. P. 58 – 71. <https://doi.org/10.3952/physics.2024.64.1.6>

БАЗИ ДАНИХ ТА БАЗИ МОДЕЛЕЙ – ФУНДАМЕНТАЛЬНЕ ПІДҐРУНТЯ ДЛЯ РОЗРОБКИ НОВИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ РІШЕНЬ ПРИ ВИРОБНИЦТВІ ЯКІСНИХ СТАЛЕЙ

Тогобицька Д.М.¹, Поворотня І.Р.², Ліхачов Ю.М.³, Ходотова Н.Є.⁴

¹ д.т.н., проф., ² н.с., к.т.н., ³ н.с., ⁴ м.н.с.,

^{1,2,3,4} Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, м. Дніпро, Україна

Анотація. Інформаційною основою для теоретичної та прикладної металургії при розробці рішень спрямованих на удосконалення існуючих та освоєння принципово нових технологічних схем виготовлення високоякісної металопродукції є проблемно-орієнтовані програми в основі яких повинна бути закладена достовірна База Даних та База Моделей. Аналіз сучасних спеціалізованих комп'ютерних програм свідчить про суттєву нестачу таких моделей для багатокомпонентних розплавів (метал, шлак, добавки). Значимість бази моделей головним чином забезпечує правильний вибір наукового підґрунтя, що закладено в основу створених моделей та є вагомим внеском у точність створеного алгоритмічного і програмного забезпечення. Беззаперечно питання їх ведення та підтримки на належному рівні слід розглядати, як задачу галузевого значення з активною участю і сприянню по наповненню даними провідними вітчизняними виробничниками, експериментально-лабораторними дослідженнями науковців-металургів та адміністративною підтримкою по їх комерціалізації для користування іноземними країнами. Показана ефективність використання фізико-хімічного апарату концепції спрямованого хімічного зв'язку для прогнозування властивостей металевих розплавів ($R^2 \geq 0,9$), що забезпечить в подальшому одержання сталі з затребуваними металоспоживачами показниками.

Ключові слова: Бази Даних, База Знань, параметри міжатомної взаємодії, якість металу, прогнозування, моделі

Наразі сучасний світ набирає швидкий темп нарощення залученості комп'ютерних технологій не тільки у повсякденному житті людини, а й у виробничо-промислових процесах. Це стосується, як розробок штучного інтелекту, вдосконалення конструкцій протезування з елементами чіпового контролю так і управління процесами на підприємствах, впровадження елементів роботизації на складних виробничих ділянках, і це далеко ще не всі ніші в які проникли новітні комп'ютерні напрацювання. Разом з тим усі

комп'ютерні ноу-хау, незалежно від сфери в якій будуть застосовані, потребують надійної науково-обґрунтованої основи, яка забезпечить адекватну математичну стійкість, швидкість одержання результату та відповідну якість після прийняття відповідних технологічних рішень. Зазвичай відсутність зібраних та правильно систематизованих надійних даних викликає труднощі у науковців на етапах створення комп'ютерних доповнень, зокрема у сталеплавильному виробництві для інтеграції в системи АСУТП. Алгоритми розрахунків, що закладені у програмні комплекси зазвичай складні, зі значною кількістю змінних, а їх багатопараметричність не завжди є обґрунтованою та виправданою, тому виникає необхідність проведення якісної «згортки» кількості параметрів з збереженням їх фізико-хімічної, фізичної чи технологічної сутності і правильного визначення факторного навантаження у конкретних умовах виробництва та ділянки для якої розробляється етап цифровізації.

З огляду на ці обставини особливість баз даних акумулювати різнотипну інформацію без втрати її смислового та наукового навантаження завдяки розробленим строгим правилам формалізації у вигляді машинного паспорту експериментальних даних (ПЕД), який включає всю повноту викладеного без попередньої обробки та «згладжувань», є важливим внеском у точність одержаних прогнозних значень. В Інституті чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України (ІЧМ НАНУ), як одному з передових галузевих закладів країни, створений Банк даних «Металургія», до якого входять репрезентативні бази «Метал», «Шлак», «Феросплави», «ШУС» (шлакоутворюючі суміші), що знаходяться в стадії постійної експлуатації і активного поповнення власними експериментальними, сучасними промисловими та літературними (статті, патенти, винаходи, наукові розробки, монографії) даними [1, 2].

В свою чергу База Знань – це синергетичне поєднання баз даних та комплексу моделей, які дозволяють прогнозувати першочергові фізико-хімічні, теплофізичні властивості металургійних розплавів та на основі критичного аналізу одержаних результатів, в конкретній промисловій проблемі, спрямувати виробничників до прийняття найбільш раціонального і

доцільного рішення задля одержання якісного металу. В останній час значна частина ресурсів спрямована саме на наповнення бази «Метал», як основоположної складової алгоритмічного і програмного забезпечення наскрізної схеми направленого формування якісної сталі. Розроблення моделей здійснюється на основі концепції спрямованого хімічного зв'язку [3]. Головна ідеологія, що робить її унікальним інформаційно-алгоритмічним апаратом оформленим у програмні комплекси «Metal» та «Slag», полягає у розгляді металургійних розплавів, як хімічно єдиних систем, а не просто механічної суміші складових та вираженню їх зв'язків в інтегральних параметрах міжатомної взаємодії: Z^Y – параметр зарядового стану системи, e ; d – середньостатистична між'ядерна відстань, 10^{-1}нм ; $\text{tg}\alpha$ – константа для кожного елемента, яка характеризує градієнт зміни радіусу іона при зміні його заряду; ρ_1 – спрямована зарядова щільність, $e/\text{нм}$.

Важливим результатом одержаним завдяки розробленим моделям [властивість = $f(Z^Y, d, \text{tg}\alpha, \rho_1)$], наприклад, для жароміцних нікелевих сплавів, які входять у блок бази моделей є порівняльний аналіз прогнозних значень по запропонованій нами моделі (похибка прогнозу - $\xi, \% = 0,66\%$) для жароміцних нікелевих сплавів з розрахунками проведеними з використанням програмного спеціалізованого комплексу JMatPro (похибка прогнозу $\xi, \% = 10,30\%$). Це свідчить про адекватність та математичну стійкість розроблених нами аналітичних виразів. Працездатність розробленого комплексу моделей та адекватність одержаних результатів відпрацьована на промислових даних сталі 40X та сталей класу SAE. У результаті проведеного статистичного аналізу на репрезентативних вибірках даних за визначенням t-критерію Стюдента для сталі SAE вдалось встановити значимість вмісту алюмінію на зміну температури плавлення сталі, що призвело до утворення двох областей (рис.1). При температурі плавлення більше 1535°C (область 2) для сталей характерний підвищений вміст алюмінію 0,23-0,76%, на противагу області 1 з вмістом алюмінію 0,003-0,002.

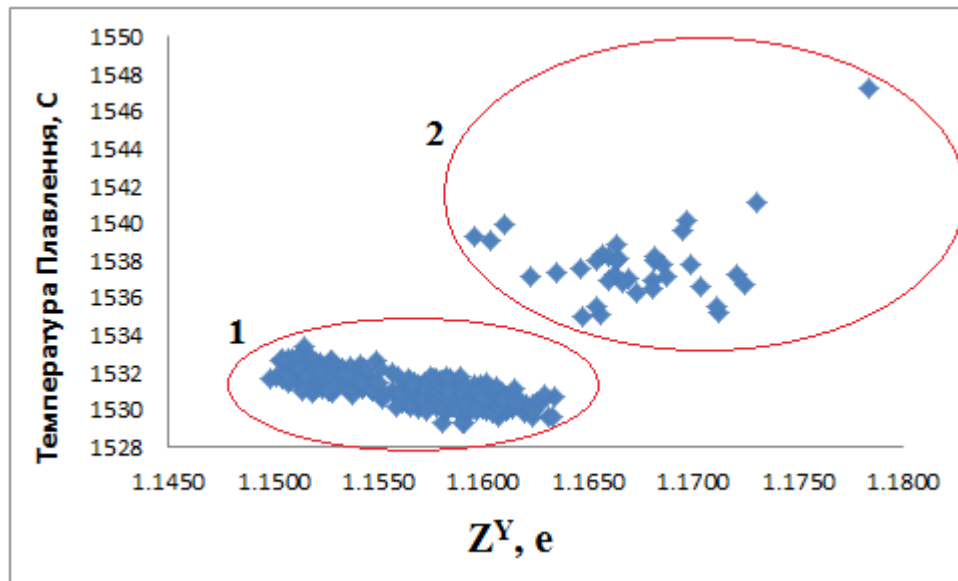


Рисунок 1 - Залежність температури плавлення від зарядового стану системи (Z^Y) сталі класу SAE

Використання баз даних та баз моделей дає не лише теоретичні й наукові результати, а й має практичне значення. Про це свідчать результати дослідження вітчизняних феросплавів марок ФМн78 та МнС17 з відхиленнями по хімічному складу, які дозволили нам констатувати на основі експертної оцінки властивостей можливість їх використання при виробництві сталі за їх призначенням з дотриманням певних умов [4].

Висновок. Використання розроблених баз даних та баз моделей дозволяє створити засади одержання високоякісного конкурентоздатного металу на основі високоточних й стійких прогнозних моделей комплексу фізико-хімічних властивостей металургійних розплавів, які описують іонообмінні процеси у багатофазному середовищі, здатні оцінити повноту протікання реакцій, а отже і ступінь засвоєння компонентів. Саме оперативний промислово-технологічний контроль цих процесів являється важливою резервною ланкою для виробництва якісної сталі у нестабільних виробничих умовах країни.

ЛІТЕРАТУРА

1. Тогобицька Д.М. Базы даних і моделі для експертної оцінки ефективності використання феросплавів при виробництві сталі / Тогобицька Д.М., Піптюк В.П., Петров О.П., Греков С.В., Снігура І.Р., Ліхачов Ю.М. Головка Л.А.// Фундаментальні і прикладні проблеми чорної металургії. 2017. – № 31. – С. 150 – 165.

2. Степаненко Д.О., Цюпа Н.О., Андрієвський Г.А. База даних і моделі для прогнозування властивостей шлакоутворюючих сумішей – Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції «Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні». – Дніпро. – 2018 р. – С. 34.
3. Togobitska D. and Belkova A. New approach to evaluating the thermodynamic consistency of melts in the «Metal-Slag» system based on interatomic interaction parameters // Lithuanian Journal of Physics. Vol.64, No.1, pp.58-71 (2024). <https://doi.org/10.3952/physics.2024.64.1.6>
4. Тогобицька Д.М., Поворотня І.Р., Піптюк В.П., Греков С.В., Кукса О.В. Експертна система оцінки фізико-хімічних та теплофізичних властивостей марганецьвмісних феросплавів. – Сучасні проблеми металургії. – № 27. – 2024. – С. 102 – 119. DOI: 10.34185/1991-7848.2024.01.08

DATABASES AND MODEL BASES – THE FUNDAMENTAL BASIS FOR THE DEVELOPMENT OF NEW TECHNOLOGICAL SOLUTIONS IN THE PRODUCTION OF QUALITY STEELS

Togobitska Daria, Povorotnia Iryna, Likhachev Yuriy, Nadiya Khodotova

Abstract. *The information basis for theoretical and applied metallurgy in developing solutions aimed at improving existing ones and developing fundamentally new technological schemes for manufacturing high-quality metal products are problem-oriented programs, which should be based on a reliable Database and Model Database. Analysis of modern specialized computer programs indicates a significant lack of such models for multicomponent melts. Undoubtedly, the issue of their maintenance and support at the proper level should be considered as a task of industry significance with the active participation and assistance in filling in the data by leading domestic manufacturers, experimental and laboratory research by metallurgical scientists, and administrative support for their commercialization for use by foreign countries. The effectiveness of using the physicochemical apparatus of the directional chemical bond concept for predicting the properties of metal melts ($R^2 \geq 0,9$) is shown, which will ensure the further production of steel with the indicators demanded by metal consumers.*

Keywords: *Databases, Knowledge Base, interatomic interaction parameters, metal quality, prediction, models*

REFERENCE

1. Togobitska D.M. Databases and models for expert evaluation of the efficiency of ferroalloys in steel production / Togobitska D.M., Piptyuk V.P., Petrov A.F., Grekov S.V., Snigura I.R., Likhachev Yu.M., Golovko L.A. // Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy. 2017. - № 31. - P. 150 – 165.
2. Stepanenko D.A., Tsyupa N.A., Andrievskiy G.A. Database and models for predicting the properties of slag-forming mixtures – Materials of Scientific and Technical International

Conference «Information Technology in Metallurgy and Machine Building». – Dnepr. – 2018 – P. 34.

3. Togobitska D. and Belkova A. New approach to evaluating the thermodynamic consistency of melts in the «Metal-Slag» system based on interatomic interaction parameters // Lithuanian Journal of Physics. Vol.64, No.1, pp.58-71 (2024). <https://doi.org/10.3952/physics.2024.64.1.6>

4. Togobytska D.M., Povorotnya I.R., Piptyuk V.P., Grekov S.V., Kuksa O.V.. Expert system for evaluating the physicochemical and thermophysical properties of manganese-containing ferroalloys. – Modern problems of metallurgy. – No. 27. – 2024. – P. 102 – 119. DOI: 10.34185/1991-7848.2024.01.08

KIRIGAMI INSPIRED SOLID-STATE ALLOYING (KISA) METHOD OF CREATION OF FUNCTIONALLY GRADED MATERIALS

Frolov Y.V.¹, Bobukh O.S.², Boiarkin V.V.³, Konovodov D.V.⁴

¹ doctor of technical sciences, professor, ² candidate of technical sciences, associate professor, ³ candidate of technical sciences, associate professor, ⁴ candidate of technical sciences, associate professor

^{1,2,3,4}Ukrainian State University of Science and Technology, Ukraine

Abstract. *Kirigami-inspired solid-state alloying (KISA) is an innovative technique that applies kirigami principles to control the distribution of alloying elements within a matrix during pressure bonding. By employing precise cuts and patterns, KISA manipulates diffusion and precipitate formation at micro- and nanoscale levels, leading to tailored material properties. This method eliminates challenges associated with conventional liquid alloying, such as oxidation and element loss, while enabling controlled microstructure evolution through roll bonding and heat treatment. Key advantages include improved phase distribution, enhanced interfacial properties, and adaptability for various material types, including powders and amorphous substances. KISA presents new opportunities for designing functionally graded materials with customized mechanical, electrical, and thermal characteristics.*

Keywords: *kirigami, matrix, deformation, bonding, functionally graded material*

Kirigami-inspired solid state alloying is an innovative technique that uses the principles of kirigami, the Far Eastern art of cutting, to distribute the alloying element within the matrix during pressure bonding. This approach uses precise cuts and patterns to manipulate and control diffusion and precipitate formation at the micro- or nanoscale, potentially leading to novel material properties and functionalities. This means that the final content and distribution of the alloying element within the matrix is determined by the shape and size of the solid inlay. These properties, in turn, are influenced by the initial shape of the cuts and the subsequent transformation of the cut inlay during the pressure bonding of the matrix parts. Figure 1 shows an example of the transformation of the initial kirigami structure (rhombic mesh) into the inlay with square cell shape during roll bonding and illustrates diffusion of the inlay during subsequent heat treatment. In such a process, the kirigami structure is placed between sheet matrices and rolled under certain thermal-deformation conditions until the two halves of the matrices are

completely bonded, surrounding the deformed inlay. The resulting composite is then subjected to a thermal treatment to obtain the required phase content and distribution.

It is clearly visible from Figure 1 that all geometric parameters of the input components are subject to change in the deformation zone in parallel with the bonding of the matrix material. This method of roll bonding was initially invented as a way of obtaining composite materials [1, 2] with improved mechanical and fire resistance properties. The nature of these improvements depends on the strain-stress state in the deformation zone, which also has a hardening effect on the inlay material.

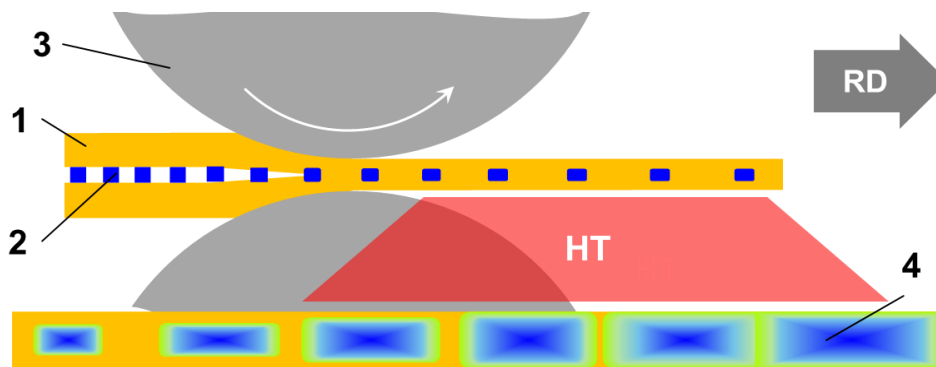


Figure 1 – Schema of the inlay transformation during roll bonding: 1- matrix material;
2 – deformable inlay; 3 – upper roll;
4 – visualization of diffusion of the inlay material into the matrix material;
RD – rolling direction; HT – heat treatment

Thus, the solid state alloying of such a structure can be represented as the evolution of the composite material into a sequence of intermetallic phases as well as solid solutions, the distribution and stoichiometry of which depend on the location of the inlay within the matrix, as well as the density and character of microstructural defects inspired by plastic deformation. This evolution provided with a heat treatment, the time-temperature line of which must navigate to required phase content.

With regard to such features of roll bonding, it is appropriate to highlight the key advantages of solid state alloying as compared to conventional alloying:

- Solid-state alloying avoid the problems associated with high-temperature processing, such as vaporization or decomposition of lower-melting elements, when the components have significantly different melting points.
- The risk of oxidation and contamination that can occur in molten metal at high temperatures can be eliminated with this method.
- In the case of high entropy alloys, where maintaining uniformity in a liquid state can be a challenge, the solid state technique can provide a controlled architecture of alloying elements both in planes and in volume.

- KISA, due to controlled strain-stress conditions during the roll-bonding as well as due flexible timing during the heat treatment, provides precise control over the microstructure, including the stoichiometry and distribution of intermetallic phases.
- Continuous juvenilization of the surface layers of the components in a low-oxidation atmosphere during roll bonding forms the complex interface, which has an effect on the kinetics of intermetallic phase formation.

This method can be used to develop materials with tailored mechanical, electrical and thermal properties. Potential applications include adaptive materials, especially biodegradable materials, and novel structural components that require specific performance characteristics that cannot be achieved by traditional alloying methods. The alloying inlay can be a polycrystalline body, or a powder, or an amorphous substation dispersed in a prepatterned matrix. The use of the powder inlay requires prior patterning of the matrix and careful filling of the pattern before the roll bonding [3]. In this way, a controlled and precise distribution of the alloying powder in the interfacial plane can be achieved. Another promising aspect is the dynamical contact interaction between the alloy particles and the juvenile layers of the matrix material during the subsequent roll bonding [4]. Overall, the kirigami-inspired solid-state alloying represents a fusion of traditional art techniques with materials engineering, opening up new opportunities for synergistic effects in the design and fabrication of functionally graded materials.

Key tools of the KISA

As we can see, the KISA can be imagined as the sequence of the technological elements of roll bonding and heat treatment, namely the rolling reduction, the rate of deformation, the friction, the roll diameter and, last but not least, the temperature during the whole process. The content of these elements controlled via following tools:

1. **Material Combination.** This tool is used to define the combination of matrix and inlay materials to achieve the required set of properties. These properties are divided into three groups:

- a. Electrical and magnetic;
- b. Mechanical and structural;
- c. Corrosion and degradation.

This tool is characterised by two limiting factors:

- the rheological behaviour of the material pair during common plastic deformation. Here it is necessary that these materials have sufficient ductility in the selected temperature range;

- kinematics of mutual diffusion in the solid state with formation of intermetallic phases. The important parameters are the diffusion rates and directions.
- 2. **Character of surface interaction.** This tool is useful for understanding which interfacial effects are expected, for example, joinability, sensibility to the interaction with atmosphere, roughness, etc.
- 3. **Geometrical parameters of the components.** The shape of the kirigami pattern and the thickness of the layers determine the interaction of the components during roll bonding and subsequent heat treatment. This forms the basis for the further content and distribution of phases within the new material. Optimal geometric parameters of the components must be designed iteratively, taking into account the geometry of the deformation zone, including its elastic part.
- 4. **Evolution of the components geometry and properties during roll bonding.** The roll bonding of KIC is characterized by extreme inhomogeneity. Flow curves and thermokinetic diagrams are not always sufficient to predict the technological ductility of materials used as components of KISA.
- 5. **Evolution of the deformed components during heat treatment.** This tool is a continuation of tool 1 as follows: the kinetics of diffusion and formation of intermetallic phases is the objective of the KISA procedures. The characteristic of KISA in this sense is the enhanced role of microstructural defects generated by inhomogeneous plastic deformation as a driving force of the thermodynamic process.

Conclusions

1. Kirigami inspired solid-state alloying (KISA) is an innovative method for creating functionally graded materials based on an art-meets-science approach.
2. KISA brings new features to the solid state alloying process: controlled volumetric distribution of alloying components and deformation-inspired microstructural defects that affect the distribution and stoichiometry of intermetallic phases and solid solutions.
3. KISA allows the use of not only solid inlays, but also powder and amorphous substations as alloying elements.
4. Five key tools that determine the content of the technological elements during KISA are the subject of further study.

Acknowledgements. *The research was conducted during the implementation of project No 2023.04/0156 “Development of technology for the use of kirigami structures in the deformation-thermal processing of composite materials”, which received a grant from the National Research Foundation of Ukraine within the competition “Science for strengthening the defense capability of Ukraine”.*

REFERENCE

1. Yaroslav Frolov, Yurii Haranich, Olexandr Bobukh, Oleg Remez, Dietrich Voswinkel, Olexandr Grydin, Deformation of expanded steel mesh inlay inside aluminum matrix during the roll bonding, Journal of Manufacturing Processes, Volume 58, 2020, Pages 857-867, ISSN 1526-6125, <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.08.049>
2. Frolov, Y.; Nosko, M.; Samsonenko, A.; Bobukh, O.; Remez, O. Roll Bonding of Al-Based Composite Reinforced with C10 Steel Expanded Mesh Inlay. Metals 2021, 11, 1044. <https://doi.org/10.3390/met11071044>

3. Frolov, Y.; Bobukh, O.; Samsonenko, A.; Nürnberger, F. Patterning of Surfaces for Subsequent Roll Bonding in a Low-Oxygen Environment Using Deformable Mesh Inlays. J. Manuf. Mater. Process. 2023, 7, 158. <https://doi.org/10.3390/jmmp7050158>
4. Y. Frolov, D. Konovodov, O. Bobukh, V. Boiarkin. Transformation of the kirigami-type deformable inlay during roll bonding. Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu, 2025. № 1. P. 34 – 39. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2025-1/034>

ТВЕРДОТІЛЬНЕ ЛЕГУВАННЯ НА ОСНОВІ КІРІГАМІ-СТРУКТУР (ТЛКС) ДЛЯ СТВОРЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ

Фролов Я.В., Бобух О.С., Бояркін В.В., Коноводов Д.В.

Анотація. Твердотільне легування матеріалів на основі кірігами-структур (ТЛКС) – це інноваційна технологія, яка застосовує принципи кірігами для контролю розподілу легуючих елементів у матриці під час з'єднання тиском. Використовуючи точні розрізи та шаблони, ТЛКС керує дифузією та утворенням інтерметалідних фаз на мікро- та нанорівнях, що призводить до формування функціональних властивостей матеріалу. Цей метод усуває проблеми, пов'язані зі звичайним рідинним легуванням, такі як окислення і втрата елементів, одночасно забезпечуючи контрольовану еволюцію мікроструктури під час прокатки-з'єднання і подальшої термічної обробки. Основні переваги включають покращені розподіл фаз заданої стехіометрії, міжфазні властивості та адаптивність до різних типів матеріалів, включаючи порошки та аморфні речовини. ТЛКС відкриває нові можливості для розробки функціональних матеріалів з програмованими механічними, електричними та тепловими характеристиками.

Ключові слова: кірігами, матриця, деформація, з'єднання, функціональний матеріал

СЕКЦІЯ 3

**МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ПРОЕКТУВАННЯ
СКЛАДНИХ СИСТЕМ**

SECTION 3

MATHEMATICAL MODELING AND DESIGN OF COMPLEX SYSTEMS

**ADVANCED DAMAGE-PLASTICITY MODELLING AND CALIBRATION
STRATEGIES FOR ACCURATE FINITE-ELEMENT ANALYSIS OF
UNREINFORCED CONCRETE IN THIN-WALLED STRUCTURES**

Oleksandr Movchan¹

*Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI “Prydniprovsk State
Academy of Civil Engineering and Architecture”, Dnipro, Postgraduate student,
Ukraine*

Abstract. *Accurate finite-element representation of unconventional concretes – slag-blended, recycled-aggregate, fiber-reinforced, or ultra-thin formwork mixes requires more than the legacy smeared-crack tools that still dominate industrial workflows. This theses reviews research on 3D material modelling of plain, fiber- and aggregate-modified concretes in the ANSYS environment, with emphasis on constitutive law selection, experimental calibration, and numerical tactics that preserve convergence once cracking and crushing initiate. Damage-plasticity formulations such as Concrete Damaged Plasticity (CDP) consistently outperform simpler Drucker–Prager or Willam–Warnke approaches, provided their numerous parameters are tuned to targeted laboratory data. Special issues arising in thin-walled elements and permanent formwork stability, mesh objectivity, staged casting pressure are examined, and five recent case studies are dissected to illustrate best practice. The review concludes with recommendations for practitioners and identifies emerging trends, notably machine-learning-assisted calibration and phase-field fracture, that are poised to reshape concrete simulation in commercial FEA.*

Keywords: *ANSYS modelling, finite elements, concrete, mesh, 3D-modelling*

Introduction. Concrete is a heterogeneous, quasi-brittle composite whose tensile capacity is an order of magnitude lower than its compressive strength. When reinforcement is absent, predictive modelling must capture crack initiation, post-peak softening and stiffness degradation. Over the last few years, the research community has advanced several numerical strategies to meet this requirement inside the ANSYS ecosystem. The present paper converts those scattered findings into a coherent scientific narrative and provides actionable guidance for analysts tasked with modelling non-standard, reinforcement-free concrete structures.

Constitutive Modelling Strategies in ANSYS. *Legacy smeared-crack element (SOLID65). SOLID65 embeds a five-parameter Willam–Warnke surface with separate*

checks for tensile cracking and compressive crushing. Although setup is straightforward, the element is notorious for non-convergence when stiffness drops abruptly at Gauss points. Barghlame Hadi [1] showed that tuning the crushing stiffness factor ($CSTIF \approx 0.3$) restored solver stability during cyclic loading of concrete-filled tubes, without compromising physical realism.

Generic Drucker–Prager plasticity. Workbench users typically assign a pressure-dependent yield surface (Drucker–Prager) to SOLID185/186 elements and super-impose a tensile cut-off via failure strain or element birth–death. This configuration reproduces confined compression well but lacks an intrinsic damage mechanism; therefore, it underestimates crack-induced stiffness loss unless supplemented by a user material subroutine [2].

Damage-plasticity (Concrete Damaged Plasticity). The CDP model, native to Abaqus and available in LS-DYNA/Autodyn, couples multi-surface plasticity with scalar damage variables d_t and d_c that degrade elastic stiffness after cracking or crushing. Guan Q et al. [3] achieved 10–15 % agreement with eight fiber-reinforced RAC beam tests once CDP parameters—dilation angle, shape factor K_c , biaxial-to-uniaxial strength ratio f_{bo}/f_{co} , viscosity were calibrated. In ANSYS Mechanical, equivalent behavior can be realized through USERMAT coding or by exporting the mesh to LS-DYNA.

Mesoscale and explicit-inclusion models. Li et al. [4] scripted APDL routines that randomly inserted thousands of discrete steel fibers inside a mortar matrix; Yu et al. [5] modelled recycled aggregates and the old-mortar interfacial transition zone (ITZ) with cohesive elements. These mesoscale approaches capture localized crack paths and fiber pullout at the cost of extreme mesh densities.

Rate-dependent concrete laws. When blast or impact governs design, Autodyn RHT and LS-DYNA's HJC material cards incorporate strain-rate hardening and pressure dependence. Although peripheral to most structural applications, they remain essential for thin GFRC facades or protective panels subject to accidental loads [6].

Modelling Thin-Walled and Formwork Concrete. Thin concrete walls demand special numerical care: once cracks form, their slender geometry can trigger

second-order instability, so analyses should enable large-deflection (NLGEOM) settings and, where necessary, use arc-length solution schemes to follow the post-peak path. To keep crack width's objective, the mesh must contain at least three solid elements through the thickness, with non-local regularization or slight mesh randomization added to prevent artificial alignment. Because permanent formwork panels are loaded by the hydrostatic pressure of fresh concrete, simulations need a time-dependent lateral load that fades as the core cures and, for early stripping, should also model temperature-driven strength gain. Finally, ultra-high-performance or fiber-rich mixes often exhibit tensile strain hardening before localization, so the material card must include a multi-linear tension curve; omitting this feature leads to unconservative predictions of service stiffness and crack width.

Review results. Concrete modelling follows a clear hierarchy: damage-plasticity formulations such as Concrete Damaged Plasticity (CDP) now offer the best compromise between accuracy and ease of use, although simpler Drucker–Prager plasticity still serves well for preliminary sizing or for parts where tensile cracking is not critical. Whatever the model, calibration is essential; default material cards are often unconservative, so laboratory data particularly fracture energy and residual tensile capacity in fiber-reinforced concretes must be fed into every analysis of unconventional mixes. Errors become more pronounced in thin elements, where buckling–crack interaction, mesh sensitivity and staged loading can amplify any shortcut assumptions, making careful attention to boundary conditions, element density and solver settings indispensable when wall thickness drops below about 75 mm. Looking ahead, machine-learning routines are starting to automate parameter identification, and phase-field fracture methods promise mesh-independent crack tracking; both are expected to enter mainstream ANSYS workflows in the next research cycle.

Conclusions. Damage-plasticity models, whether built into LS-DYNA or Autodyn or coded as USERMAT routines, consistently outperform smeared-crack or purely plastic formulations when simulating unreinforced concrete. Achieving this accuracy depends on a multi-stage calibration cycle that draws on compression,

tension, fracture, and full-scale structural tests to fix every key parameter. The task becomes even more demanding for thin-walled or permanent-formwork elements because geometric nonlinearity, staged casting pressure, and mesh objectivity all require explicit treatment. Case studies show that, when these practices are followed, ANSYS can predict load capacity, stiffness loss, and crack patterns to within about ± 15 percent of experimental results. Looking ahead, data-driven calibration tools and phase-field fracture techniques offer promising routes to narrow the remaining gap between numerical predictions and real-world behavior.

REFERENCES

1. Barghlame Hadi, CONVERGENCE PROBLEMS WITH ANSYS'S SOLID 65 FINITE ELEMENT IN CONCRETE-FILLED TUBULAR (CFT) COLUMNS AS A CASE STUDY, Archives for Technical Sciences 2023, 28(1), 29-38, <http://dx.doi.org/10.59456/afts.2023.1528.029B>
2. Bilal, K.A.; Mahamid, M.; Hariri-Ardebili, M.A.; Tort, C.; Ford, T. Parameter Selection for Concrete Constitutive Models in Finite Element Analysis of Composite Columns. Buildings 2023, 13, 1759. <https://doi.org/10.3390/buildings13071759>
3. Guan, Q.; Yang, M.; Shi, K.; Zhang, T. Experimental Study and Finite Element Analysis on the Flexural Behavior of Steel Fiber Reinforced Recycled Aggregate Concrete Beams. Materials 2022, 15, 8210. <https://doi.org/10.3390/ma15228210>
4. Zhengwei Li, Meizhong Wu, Jiawei Wu, Yujun Cui, Xingwei Xue Steel Fibre Reinforced Concrete Meso-Scale Numerical Analysis, Advances in civil engineering, 2020, <https://doi.org/10.1155/2020/2084646>
5. Yong Yu, Yu Zheng, Yongchang Guo, Shouwang Hu, Kaihui Hua, Mesoscale finite element modeling of recycled aggregate concrete under axial tension, Construction and Building Materials, Volume 266, Part A, 2021, 121002, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121002>.
6. Murthy, A.R., Prasanna, P.K., Nipun, G. et al. Analysing the influence of ground granulated blast furnace slag and steel fibre on RC beams flexural behaviour. Sci Rep 14, 4914 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-51164-x>

УДОСКОНАЛЕНІ МОДЕЛІ ПЛАСТИЧНОСТІ З УРАХУВАННЯМ РУЙНУВАННЯ ТА СТРАТЕГІЇ КАЛІБРУВАННЯ ДЛЯ ТОЧНОГО СКІНЧЕННО-ЕЛЕМЕНТНОГО АНАЛІЗУ БЕТОНУ БЕЗ АРМУВАННЯ У ТОНКОСТІННИХ КОНСТРУКЦІЯХ

Мовчан О.Ю.

Анотація. Точне скінченно-елементне відтворення нетрадиційних бетонів: шлакопортландцементних, із переробленим заповнювачем, фіброармованих або ультратонких опалубкових сумішей – потребує більшого, ніж застарілий підхід «steared-crack», що й досі домінує у промислових робочих розрахунках. У даних тезах узагальнено дослідження з тривимірного матеріального моделювання

звичайних, фібро- бетонів та бетонів із модифікованим заповнювачем у середовищі ANSYS з акцентом на вибір моделей, експериментальне калібрування та числові тактики, які забезпечують збіжність після зародження тріщин і руйнування. Формулювання типу «пластичність із пошкодженням» (CDP) стабільно перевершують простіші підходи Друкера–Прагера чи Віллама–Варнке, за умови, що їхні численні параметри налаштовані за цільовими лабораторними даними. Розглянуто особливі питання, що виникають у тонкостінних елементах і незнімній опалубці, а саме стійкість, об'єктивність сітки та поетапний тиск укладання, і проаналізовано п'ять сучасних прикладів, які демонструють найкращі практики. Огляд завершується рекомендаціями для практичних розрахунків і визначає нові тенденції, зокрема калібрування з використанням машинного навчання та фазово-польове моделювання тріщин, що здатні докорінно змінити симуляцію бетону в комерційних системах розрахунку KE.

Ключові слова: ANSYS моделювання, метод скінченних елементів, бетон, сітка, 3D-моделювання

SUPERIOR CLASSIFICATION OF EEG STATES USING RECURRENCE QUANTIFICATION ANALYSIS

Panasenko Y. S.¹, Belozyorov V.²

¹ PhD student, Department of Computer Technologies

² Doctor of Physical and Mathematical Sciences, ² Professor

^{1,2} Oles Honchar Dnipro National University, Ukraine

Abstract. *This study investigates the classification of brain states using electroencephalography (EEG) data, comparing recurrence quantification analysis (RQA) with traditional spectral analysis. The goal is to distinguish between eyes-open and eyes-closed states using EEG data. Experimental results demonstrate that RQA provides superior classification accuracy, particularly at the O1 electrode, where accuracy improved from 86% to 95%. The study also identifies optimal phase space reconstruction parameters and the most informative recurrence features for classification. RQA captures nonlinear dynamics of brain activity more effectively than frequency-based spectral methods. The findings support the use of RQA for improving classification in portable EEG systems. This enables more accurate analysis in real-time applications such as cognitive training and brain-computer interfaces.*

Keywords: *EEG classification, recurrence quantification analysis, spectral analysis, brain states, phase space reconstruction.*

Introduction. The increasing use of portable EEG devices necessitates efficient algorithms for brain activity analysis with limited technical resources. This study investigates the classification of brain states based on EEG data, focusing on distinguishing between relaxation and concentration through the classification of open and closed eyes. The research applies recurrence quantification analysis (RQA) [1], a method derived from chaos theory, and compares its performance to spectral analysis. Experimental results indicate that RQA provides superior classification accuracy, particularly at the O1 electrode, where classification accuracy improved from 86% to 95%. Additionally, key parameters influencing classification were identified, optimizing phase space reconstruction and enhancing classification reliability.

Problem Statement. Classifying brain states using EEG data is crucial for applications in self-monitoring, cognitive training, and brain-computer interfaces. The ability to determine whether eyes are open or closed provides insight into

relaxation mechanisms and cognitive processes. The growing market of low-cost portable EEG devices has created demand for effective algorithms that function with limited electrodes and lower-quality signals. Traditional spectral analysis methods rely on detecting characteristic brain rhythms, but alternative approaches like RQA may provide higher accuracy by capturing nonlinear dynamical properties of the brain's activity.

Research Methods. The study used the EEG Motor Movement/Imagery Dataset [2], which includes over 1,500 EEG recordings from 109 participants. EEG signals were recorded using a 64-channel system while subjects performed various motor and imagery tasks. The preprocessing stage involved filtering low-frequency noise (<2 Hz) related to movements and blinking, eliminating 50/60 Hz interference, and removing high-frequency noise (>50 Hz) from muscle activity. Z-score normalization was applied with 1-second segments, ensuring signal continuity through Hann window merging.

Recurrence plots were generated using the PyRQA module [3], leveraging OpenCL technology to accelerate calculations through GPU parallelization. RQA parameters were extracted to quantify the recurrence structure of EEG signals, enabling classification of brain states. Spectral analysis was used as a baseline, focusing on traditional power spectral density estimation of EEG rhythms.

Experimental Results. Analysis of recurrence plots revealed distinct patterns between eyes-open and eyes-closed states. The eyes-open state exhibited chaotic and dispersed recurrence structures, whereas the eyes-closed state showed long diagonal lines, indicating periodicity (fig. 1). Spectral analysis confirmed a dominant frequency of 10 Hz in the eyes-closed state, consistent with the well-known alpha rhythm.

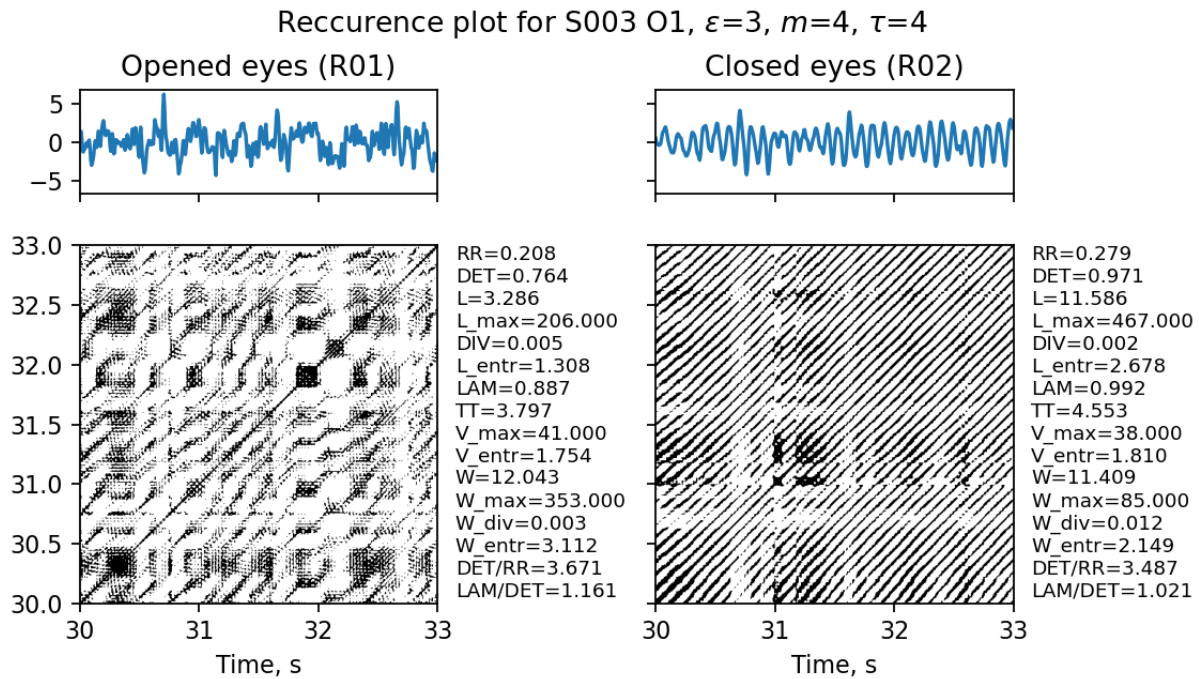


Figure 1 - Recurrence plot

Simple classification using single RQA parameters identified determinism (DET), entropy of vertical lines (V_entr), the average length of white vertical lines (W), and longest white vertical line divergence (W_div) as the most informative features for distinguishing eye states. Further feature importance analysis using the SHAP module for SVM classification demonstrated that the inverse of the longest white vertical line (W_div), entropy of white vertical lines (W_entr), average diagonal line length (L), longest white vertical line (W_max), longest vertical line in the plot (V_max), and laminarity (LAM) were the most significant parameters.

Comparison with Spectral Analysis. RQA-based classification consistently outperformed spectral analysis, particularly at the O1 electrode. The accuracy of spectral analysis in classifying eye states reached 86%, while RQA-based classification improved accuracy to 95%. This demonstrates the advantage of chaos theory-based methods in capturing the complexity of quasi-periodic brain signals. The improved accuracy is attributed to RQA's ability to quantify recurrence patterns that reflect the underlying dynamical structure of EEG signals, whereas spectral analysis is limited to frequency-based representations.

Optimal Parameters for Phase Space Reconstruction. Determining optimal parameters for phase space reconstruction is crucial for accurate classification. The

study identified a delay of 25 ms and an embedding space dimension of 4 as the most effective settings. These values align with the spectral characteristics of the EEG signal, ensuring that the recurrence plot captures meaningful temporal dynamics.

Key Features for Classification. Two approaches were used to identify the most significant RQA features for classification. In a simple classifier using optimal threshold search, determinism (DET), entropy of vertical lines (V_entr), average length of white vertical lines (W), and longest white vertical line divergence (W_div) were found to be the most influential. Feature importance analysis using SVM classification further confirmed that the inverse of the longest white vertical line (W_div), entropy of white vertical lines (W_entr), average diagonal line length (L), longest white vertical line (W_max), longest vertical line in the plot (V_max), and laminarity (LAM) were crucial for accurate classification. These parameters highlight the importance of structural patterns in recurrence plots for differentiating between brain states.

Conclusion. The study demonstrates that RQA provides superior classification accuracy compared to spectral analysis in distinguishing eye states based on EEG data. The classification accuracy for the O1 electrode improved from 86% with spectral analysis to 95% with RQA. This confirms that recurrence-based methods offer a more effective approach for analyzing quasi-periodic brain signals. Additionally, the study identified key RQA parameters that significantly influence classification, optimizing phase space reconstruction for improved accuracy. These findings contribute to the development of efficient EEG analysis algorithms for portable devices, enhancing applications in cognitive training and brain-computer interfaces.

REFERENCE

1. Chelidze T., Matcharashvili T. Dynamical Patterns in Seismology. Recurrence Quantification Analysis: Theory and Best Practices. ред. Jr. Webber Charles L., Norbert Marwan. Cham : Springer International Publishing, 2015. C. 291–334. DOI:10.1007/978-3-319-07155-8_10.
2. EEG Motor Movement/Imagery Dataset. URL: <https://archive.physionet.org/pn4/eegmmidb/> (accessed 02/21/2024).
3. Rawald T., Sips M., Marwan N. PyRQA—Conducting recurrence quantification analysis on very long time series efficiently. Computers & Geosciences. Vol. 104, 01.07.2017. P. 101–108. DOI:10.1016/j.cageo.2016.11.016.

ПОКРАЩЕНА КЛАСИФІКАЦІЯ СТАНІВ ЕЕГ ЗА ДОПОМОГОЮ РЕКУРРЕНТНОГО КІЛЬКІСНОГО АНАЛІЗУ

Панасенко Єгор, Білозьоров Василь

Анотація. У цьому дослідженні розглядається класифікація станів мозку за даними електроенцефалографії (ЕЕГ) шляхом порівняння кількісного аналізу рекурентних діаграм (RQA) із традиційним спектральним аналізом. Метою є розпізнавання станів із відкритими та закритими очима за допомогою ЕЕГ-даних. Експериментальні результати показують, що метод RQA забезпечує вищу точність класифікації, зокрема для електрода О1, де точність зросла з 86% до 95%. У дослідженні також визначені оптимальні параметри реконструкції фазового простору та найбільш інформативні рекурентні характеристики для класифікації. RQA ефективніше захоплює нелінійну динаміку мозкової активності порівняно зі спектральними методами, що базуються на частотному аналізі. Отримані результати підтверджують доцільність використання RQA для підвищення точності класифікації в портативних ЕЕГ-системах. Це дозволяє проводити більш точний аналіз у реальному часі для застосувань у когнітивному тренуванні та інтерфейсах «мозок-комп'ютер».

Ключові слова: класифікація ЕЕГ, кількісний аналіз рекурентних діаграм, спектральний аналіз, стани мозку, реконструкція фазового простору.

**ВПЛИВ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ ВИСОКОЇ НАПРУЖЕНОСТІ НА СТАРІННЯ
ЦЕЛЮЛОЗНОЇ ІЗОЛЯЦІЇ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА В ПАКЕТІ
ПРОГРАМ FEMM**

¹Барабан Олег Дмитрович, ²Поляков Михайло Олексійович, ³Василевський В.В.

¹аспірант, ²професор, доктор технічних наук, ³доцент, кандидат технічних наук

^{1,2,3}НУ "Запорізька політехніка"

Анотація. Прогнозування старіння целюлозної ізоляції силових трансформаторів є важливою умовою підвищення надійності енергосистем. У роботі проаналізовано чинники деградації ізоляції з акцентом на вплив електричного поля. Для дослідження його розподілу створено математичну модель трансформатора в середовищі FEMM. Це дозволило візуалізувати просторові характеристики поля та оцінити його взаємодію з ізоляційними матеріалами. Моделювання підтвердило ключову роль електричного поля у процесах старіння целюлози. Також підкреслено значення механічних навантажень, як додаткового фактору деградації. Подальший розвиток мультифізичних моделей сприятиме підвищенню точності прогнозування, оптимізації експлуатації та подовженню ресурсу трансформаторів.

Інструменти на кшталт FEMM відкривають нові можливості для комплексного аналізу старіння в енергетичному обладнанні.

Ключові слова: трансформатор, математична модель, старіння ізоляції, пакет програм FEMM.

Предмет дослідження: Розробка методів точного прогнозування деградації целюлозної ізоляції силових трансформаторів на основі математичного моделювання, що дозволить оптимізувати їх експлуатацію та запобігти критичним відмовам.

Мета роботи: Підвищення точності оцінки старіння ізоляції за рахунок комп'ютерного моделювання електричних і фізико-хімічних процесів у середовищі Finite Element Method Magnetics (FEMM). Для цього розроблено модель силового трансформатора, що враховує вплив електричних полів на зміни параметрів ізоляції. Швидкість деградації визначається за рівнянням Ареніуса та аналізом тангенсу кута діелектричних втрат.

Ключові завдання:

1. Створення моделі трансформатора в FEMM для аналізу розподілу електричних полів та їх впливу на старіння ізоляції.
2. Дослідження закономірностей деградації матеріалу під дією електричних навантажень.
3. Уточнення моделі шляхом інтеграції додаткових факторів: температурних коливань, вологості та механічних напружень.
4. Оцінка можливості побудови мультипольової моделі для комплексного аналізу взаємодії різних фізичних полів.

Наукова новизна: Розширено існуючі підходи, які зосереджені переважно на теплових процесах, шляхом включення механічних навантажень. Останні, викликані електромагнітними силами та вібраціями, призводять до мікротріщин у целюлозі, прискорюючи її старіння. Інтеграція цих факторів у FEMM-модель дозволяє отримати точніші прогнози ресурсу ізоляції.

Експериментальна частина: Моделювання проведено для автотрансформатора типу АТДТН (виробництва ВАТ «Запоріжтрансформатор»), з аналізом нерівномірності електричних полів у його активній частині. Результати демонструють кореляцію між локальними напруженостями поля та зонами прискореної деградації ізоляції.

Практична значимість: Отримані дані є основою для розробки стратегій технічного обслуговування, оптимізації експлуатаційних режимів та створення мультифізичних моделей, що враховують мультипараметричний вплив на стан трансформаторів.

Методика моделювання

У дослідженні застосовано пакет FEMM (Finite Element Method Magnetism), який довів свою ефективність у розрахунках розподілу електромагнітних полів в електротехнічних пристроях [1,3]. Програмний комплекс використано для двовимірного (2D) моделювання поперечного перерізу трифазного автотрансформатора АТДТН.

Аналіз підтвердив, що метод скінченних елементів у FEMM забезпечує високу точність прогнозування експлуатаційних характеристик трансформатора. Отримані дані можуть стати основою для розроблення математичних моделей, що описують старіння ізоляції під впливом електричних полів.

Етапи моделювання

Геометричне моделювання - побудова контурів активної частини (обмотки, магнітопровід, ізоляційні елементи).

Визначення матеріальних властивостей - завдання електричних параметрів матеріалів (провідники, магнітна сталь, діелектрики).

Розрахунок електричних полів - аналіз розподілу потенціалу, напруженості та градієнтів поля в критичних зонах конструкції.

Реалізація етапів дала змогу візуалізувати зони підвищеного електричного навантаження, що важливо для оптимізації ізоляційних систем трансформатора.

Результати та аналіз

Моделювання в середовищі FEMM дозволило визначити розподіл електричних полів у активній зоні трансформатора, зокрема в обмотках та паперовій ізоляції. Виявлено, що напруженість поля є нерівномірною, особливо в целюлозній ізоляції, з локальними зонами підвищених значень. Такі ділянки є критичними з точки зору прискореного старіння матеріалів через електромеханічний вплив. Найбільша інтенсивність поля спостерігається у приосередкових зонах, де його розподіл залежить від геометрії вертикальної осі магнітопроводу.

Отримані дані можуть стати основою для:

Оптимізації конструкції трансформатора з метою зменшення нерівномірності електричних полів.

Розробки моделей старіння ізоляції, що враховують просторову динаміку електромагнітних параметрів.

Створення діагностичних методик для прогнозування залишкового ресурсу ізоляції на базі чисельного аналізу.

Використання FEMM дозволяє не лише візуалізувати поля, але й інтегрувати їхні характеристики в мультифізичні моделі. Це сприяє розробці нових підходів до оцінки довговічності трансформаторів, підвищуючи їхню надійність та ефективність експлуатації.

Оцінка старіння целюлозної ізоляції трансформатора: тепловий та електричний аналіз. Для прогнозування терміну служби целюлозної ізоляції

силових трансформаторів використано комбінацію моделювання в програмному пакеті FEMM та аналітичних методів на основі рівняння Арреніуса та тангенсу кута діелектричних втрат.

Тепловий вплив: рівняння Арреніуса

Кінетика деградації ізоляції описується рівнянням Арреніуса, яке кількісно пов'язує температуру зі швидкістю старіння:

$$k = A \times e^{\frac{-E}{R \times T}} \quad (1)$$

де k – константа швидкості реакції; A – показник швидкості старіння, обумовленого впливом вологи, кислот та кисню, год⁻¹; E – енергія активації для процесу теплового старіння паперу у трансформаторному маслі, кДж/моль; R – молярна газова стала Дж/моль/К; T – температура, °К. [1]



Рисунок 1. Графік залежності швидкості реакції старіння від температури

Результати моделювання в FEMM та розрахунків за рівнянням (рис. 1) показали:

При температурі 115°C термін служби ізоляції скорочується вдвічі порівняно з паспортними даними виробника.

Зниження температури до 80°C зменшує швидкість деградації на 50%, що підтверджує критичний вплив теплового режиму на ресурс матеріалу.

Електричний вплив: тангенс кута діелектричних втрат

Тангенс кута діелектричних втрат ($\tan \delta$) характеризує енерговтрати в ізоляції через провідність:

$$\tan \delta(\omega) = \frac{\varepsilon''(\omega)}{\varepsilon'(\omega)} \quad (2)$$

де $\varepsilon''(\omega)$ - комплексной относительной проницаемости,

$\varepsilon'(\omega)$ - действительная часть постоянная проводимости.

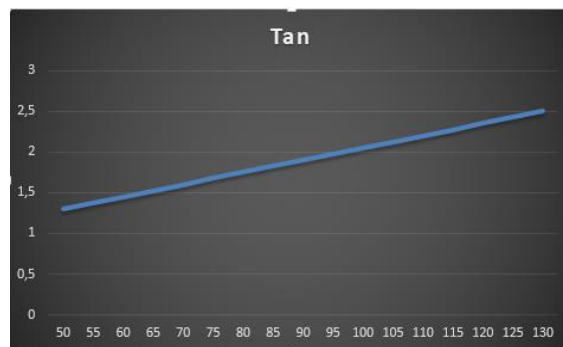


Рисунок 2. Графік залежності тангенса кута діелектричних втрат від температури

Зростання температури призводить до:

Зменшення проникності (від 4.0 при 20°C до 3.0 при 100°C) через втрату вологи.

Збільшення проводимості (10-15 до 10-12 См/м) через активізацію іонів.

За температури 100°C термін служби додатково скорочується на 50% через посилення теплової деградації (рис. 2). Взаємодія електричних та теплових факторів

Аналіз розподілу електричного поля в FEMM виявив зони з підвищеною напруженістю (>30 кВ/мм) мають удвічі вищу швидкість старіння через локальний перегрів та окиснення. Локальні концентрації поля сприяють формуванню мікродефектів, що призводить до втрати механічної міцності ізоляції. Найкритичнішими є області близько активних частин трансформатора, де комбінується високий електричний стрес і теплове навантаження.

Висновки. Нерівномірність електричного поля значно прискорює деградацію ізоляційних матеріалів, знижуючи експлуатаційний ресурс трансформаторів. Ідентифікація зон із підвищеним навантаженням дозволяє впроваджувати цільові заходи, такі як локальне зміцнення ізоляції або використання матеріалів із підвищеною діелектричною стійкістю.

Моделювання в FEMM (Finite Element Method Magnetics) є ефективним інструментом для аналізу надійності ізоляційних систем та оптимізації конструкцій трансформаторів. Метод забезпечує точне відображення температурних полів, що дає змогу інтегрувати рівняння Арреніуса (оцінка

впливу температури на старіння) і тангенса кута діелектричних втрат (врахування електричного поля та стану діелектрика). Їх комбінація із FEMM дозволяє прогнозувати термін служби целюлозної ізоляції, враховуючи температурні градієнти, локальні перевантаження та електричні фактори.

Однак запропонована модель не включає вплив кисню, продуктів деградації трансформаторного масла, механічних та вібраційних навантажень. Перспективним напрямом є розробка мультифізичних моделей, що інтегрують теплові, вологісні, хімічні (окиснення, старіння масла) та механічні фактори. Такий підхід забезпечить комплексну оцінку деградації ізоляції, підвищуючи точність прогнозування її ресурсу в реальних умовах експлуатації.

Поєднання аналітичних методів із сучасними інструментами моделювання відкриває нові можливості для проектування енергоефективного та довговічного трансформаторного обладнання.

ЛІТЕРАТУРА

1. Барабан , О. ., Поляков , М. ., & Василевський , В. . (2024). Постановка задачі мультипольового моделювання процесів зносу целюлозної ізоляції силового трансформатора. Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Проблеми удосконалювання електричних машин і апаратів. Теорія і практика, (2 (12)), 24–28. <https://doi.org/10.20998/2079-3944.2024.2.05>
2. Available at <https://ztr.ua/products/uploads/2015/05/Pasport-Transformator.pdf>. Pasport Transformator ATDTNH150 Огляд accessed 11 January 2025)
3. Available at <https://www.femm.info/Archives/doc/manual.pdf>. (accessed 01 March 2025). D. Meeker, Finite Element Method Magnetics, Version 4.2, (01 March 2022 release).
4. Vasil Spasov; Enhancing the capabilities of the FEMM software by a novel torque computation method. AIP Conf. Proc. 24 January 2024; 2980 (1): 030001. <https://doi.org/10.1063/5.0184368>
5. K. B. Baltzis, The FEMM Package: A Simple, Fast, and Accurate Open Source Electromagnetic Tool in Science and Engineering, Journal volume & issue, JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCE AND TECHNOLOGY REVIEW (JAN 2008), Vol. 1, no. 1, pp. 83 – 89
6. CIGRE D1.01.02. "Thermal Modelling and Life Management of Power Transformers." — Technical Brochure, 2013.
7. Arrhenius, S. "Über die Dissociationswärme und den Einfluss der Temperatur auf den

Dissociationsgrad der Elektrolyte." — Z. Phys. Chem., 1889.

8. Moser, H. "Aging and Failure Mechanisms of Paper Insulation in Power Transformers." — Electrical Engineering Journal, 2008.

9. Kulkarni, S.V., Khaparde, S.A. "Transformer Engineering: Design, Technology, and Diagnostics." — Marcel Dekker Inc., 2004.

10. IEEE Guide for Loading Mineral-Oil-Immersed Transformers, IEEE Std C57.91-2011.

11. Поляков, М. О. и Василевський, В. В. (2022). Метод оцінки нерівномірності старіння шарів целюлозної ізоляції обмоток силових трансформаторів. Електротехніка і електромеханіка, (5), 47-54. <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2022.5.08>

12 Jusner, P., Schwaiger, E., Potthast, A., & Rosenau, T. (2021). Thermal stability of cellulose insulation in electrical power transformers – A review. Carbohydrate Polymers, 252, 117196.

13 Boss, P., Csepes, G., Der Houhanessian, V., Filippini, J., Guuinic, P., Gafvert, U., Karius, V., Lapworth, J., Urbani, G., Werelius, P. and Zaeng, W., 2003. Dielectric response methods for diagnostics of power transformers. IEEE Electrical Insulation Magazine, 19(3), pp.12-18.

14 L. M. Dumitran, A. Manea and T. Gorjanu, "Effect of Accelerated Aging Under High Electric Field and Partial Discharges on Electric Conduction in Mineral Oil," in IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 30, no. 4, pp. 1623-1631, Aug. 2023, <https://doi.org/10.1109/TDEI.2023.3292804>.

THE EFFECT OF A HIGH-INTENSITY ELECTRIC FIELD ON THE AGING OF CELLULOSE INSULATION OF A POWER TRANSFORMER IN THE FEMM SOFTWARE PACKAGE

Baraban Oleh Dmytrovych, Polyakov Mykhailo Oleksiiovych, Vasilevskyi V.V.

Abstract. *Predicting the aging of cellulose insulation of power transformers is an important condition for improving the reliability of power systems. The paper analyses the factors of insulation degradation with a focus on the influence of the electric field. To study its distribution, a mathematical model of the transformer was created in the FEMM environment. This made it possible to visualise the spatial characteristics of the field and assess its interaction with insulating materials. The modelling confirmed the key role of the electric field in the aging process of cellulose. The importance of mechanical loads as an additional degradation factor was also emphasised. Further development of multiphysics models will help to improve the accuracy of predictions, optimise operation and extend the life of transformers.*

Tools such as FEMM open up new opportunities for comprehensive ageing analysis in power equipment.

Keywords: *transformer, mathematical model, insulation aging, FEMM software package*

REFERENCES

1. Baraban, O., Polyakov, M., & Vasilevsky, V. (2024). Setting the problem of multipole modeling of the processes of wear of cellulose insulation of a power transformer.

Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Problems of improvement of electrical machines and devices. Theory and Practice, (2 (12)), 24-28. <https://doi.org/10.20998/2079-3944.2024.2.05>

2. Available at <https://ztr.ua/products/uploads/2015/05/Pasport-Transformator.pdf>. Passport Transformator ATDTNH150 Overview accessed January 11, 2025)

3. Available at <https://www.femm.info/Archives/doc/manual.pdf>. (accessed March 01, 2025). D. Meeker, Finite Element Method Magnetics, Version 4.2, (March 01, 2022 release).

4. Vasil Spasov; Enhancing the capabilities of the FEMM software by a novel torque computation method. AIP Conf. Proc. January 24, 2024; 2980 (1): 030001. <https://doi.org/10.1063/5.0184368>

5. K. B. Baltzis, The FEMM Package: A Simple, Fast, and Accurate Open Source Electromagnetic Tool in Science and Engineering, Journal volume & issue, JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCE AND TECHNOLOGY REVIEW (JAN 2008), Vol. 1, no. 1, pp. 83 – 89

6. CIGRE D1.01.02. “Thermal Modelling and Life Management of Power Transformers.” -

Technical Brochure, 2013.

7. Arrhenius, S. “Über die Dissociationswärme und den Einfluss der Temperatur auf den
Dissociationsgrad der Elektrolyte.” - Z. Phys. Chem., 1889.

8. Moser, H. “Aging and Failure Mechanisms of Paper Insulation in Power Transformers.” - Electrical Engineering Journal, 2008.

9. Kulkarni, S.V., Khaparde, S.A. “Transformer Engineering: Design, Technology, and Diagnostics.” - Marcel Dekker Inc., 2004.

10. IEEE Guide for Loading Mineral-Oil-Immersed Transformers, IEEE Std C57.91-2011.

11. Polyakov, M. O. and Vasilevsky, V. B. (2022). Method for assessing the unevenness of aging of cellulose insulation layers of power transformer windings. Electrical Engineering and Electromechanics, (5), 47-54. <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2022.5.08>

12 Jusner, P., Schwaiger, E., Potthast, A., & Rosenau, T. (2021). Thermal stability of cellulose insulation in electrical power transformers - A review. Carbohydrate Polymers, 252, 117196.

13 Boss, P., Csepes, G., Der Houhanessian, V., Filippini, J., Guuinic, P., Gafvert, U., Karius, V., Lapworth, J., Urbani, G., Werelius, P. and Zaeng, W., 2003. Dielectric response methods for diagnostics of power transformers. IEEE Electrical Insulation Magazine, 19(3), pp.12-18.

14 L. M. Dumitran, A. Manea and T. Gorjanu, «Вплив прискореного старіння в умовах високого електричного поля та часткових розрядів на електропровідність мінеральної оливи», в IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 30, no. 4, pp. 1623-1631, Aug. 2023, <https://doi.org/10.1109/TDEI.2023.3292804>.

ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПОШИРЕННЯ ЗАБРУДНЮЮЧИХ РЕЧОВИН В ПОВІТРІ

Берлов О.В.¹, Мигур С.О.², Біляєва О.М.³

¹ К.т.н., ¹ доцент, ² студентка, ³ студентка

^{1,2} Український державний університет науки і технологій, ННІ ПДАБА, Україна

³ Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, Україна

Анотація. Розглядаються чисельні моделі поширення хімічно небезпечних речовин в повітрі при їх емісії на промислових підприємствах. Моделюються сценарії неорганізованих викидів на промислових майданчиках або всередині промислових приміщень та організованих викидів з низьких джерел на промисловому майданчику. Відомо, що наслідком неорганізованих викидів токсичних речовин є забруднення повітря в робочих зонах на промислових майданчиках, забруднення атмосферного повітря в селітебних зонах, забруднення підстильної поверхні. При організованих викидах на промислових майданчиках можуть утворюватися також області з підвищеною концентрацією небезпечних речовин. Дуже часто такі ситуації виникають на підприємствах коли є організовані викиди з низьких джерел (викид на даху промислових будівель) та при несприятливих метеоумовах – штиль, інверсія. Запропоновані 2D та 3D CFD моделі, що базуються на чисельному інтегруванні фундаментальних рівнянь механіки суцільного середовища.

Ключові слова: забруднення повітря, небезпечні речовини, аварійні викиди, чисельне моделювання, робоча зона

Для прогнозування впливу забруднення довкілля під час екстремальних ситуацій часто застосовуються модель Гауса, а також аналітичні та емпіричні методи [5, 6]. Проте відомо, що такі моделі мають серйозні обмеження: вони не дозволяють адекватно аналізувати утворення зон забруднення повітря в умовах щільної забудови або наявності виробничого обладнання всередині приміщень. Альтернативою є CFD-моделі, зокрема реалізовані у програмному середовищі ANSYS. Однак їх використання вимагає високопродуктивних комп'ютерів та значного часу на обчислення.

У практичній діяльності особливо важливо мати у розпорядженні спеціалізовані чисельні моделі, які дають змогу виконувати десятки розрахунків протягом одного робочого дня. Водночас такі математичні моделі

повинні враховувати ключові фізичні чинники, що визначають процес формування зон забруднення.

У роботі досліджуються задачі чисельного моделювання забруднення атмосферного повітря хімічними речовинами, пилом та радіоактивними агентами за різних метеорологічних умов – зокрема під час конвекції, штилю та температурної інверсії.

У доповіді представлені розроблені CFD-моделі [1, 2, 4], які призначені для оцінки рівня забруднення повітря в робочих зонах на промислових об'єктах, на територіях атомних електростанцій та хімічно небезпечних підприємств.

Для моделювання конвективно-дифузійного перенесення газоподібних та пилових домішок використовується рівняння масопереносу [3]. Це рівняння враховує низку ключових чинників: геометричні характеристики джерела забруднення, процес гравітаційного осідання часток, стратифікацію атмосфери, координати місця викиду, інтенсивність емісії забруднювачів, а також профіль і напрям повітряного потоку. Для математичного опису розміщення джерела викиду використовується дельта-функція Дірака.

Розрахунок поля швидкостей повітряного потоку на території промислового майданчика виконується на основі моделі потенційного руху. Для моделювання атмосферних умов штилю та інверсії застосовується модель М. Берлянда, яка дозволяє визначити вертикальний коефіцієнт дифузії. Чисельне розв'язання рівняння конвективно-дифузійного переносу забруднюючих речовин здійснюється із використанням кінцево-різницевої схем. Розроблені моделі використовувалися для обчислення зон хімічного та пилового забруднення як на відкритих промислових майданчиках, так і всередині приміщень Придніпровської ТЕС за різних метеоумов – під час штилю, інверсії та конвекції, а також для аналізу наслідків викидів радіоактивних речовин на території Запорізької АЕС.

Висновки

1. Розроблено комплекс дво- та тривимірних CFD-моделей, який забезпечує оперативне визначення динаміки формування зон забруднення

атмосфери та підстильної поверхні у разі викидів небезпечних речовин на підприємствах, тепло- та атомних електростанціях. Для роботи моделей використовується стандартна метеорологічна інформація, що дає змогу здійснювати розрахунки в режимі, наближеному до реального часу.

2. Створені чисельні моделі можуть застосовуватись як для оцінки інтенсивності та просторових меж зон забруднення, так і для аналізу ефективності впровадження бар'єрних засобів, спрямованих на зниження рівня забруднення у робочих зонах промислових об'єктів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Біляєв М. М., Берлов О. В., Кіріченко П. С. Математичне моделювання в задачах промислової безпеки та охорони праці. Кривий Ріг: Вид. Р.А. Козлов, 2017. – 130 с.
2. Біляєв М. М., Біляєва В. В., Берлов О. В., Козачина В. А. CFD моделювання в аналізі ефективності систем захисту довкілля та працівників на робочих місцях. Дніпро : Журфонд, 2022. – 268 с.
3. Згуровский М. З., Скопецкий В. В., Хрущ В. К., Беляев Н. Н. Численное моделирование распространения загрязнения в окружающей среде. Київ: Наукова думка, 1997. – 368 с.
4. Пшинько А. Н., Беляев Н. Н., Машихина П. Б. Моделирование загрязнения атмосферы при техногенных авариях. Днепропетровск : Нова ідеологія, 2011. – 166 с.
5. Anthony Michael Barret. "Mathematical Modeling and Decision Analysis for Terrorism Defense: Assessing Chlorine Truck Attack Consequence and Countermeasure Cost Effectiveness. Dissertation" (Pittsburg, Pennsylvania, USA), 2009. – 123 p.
6. Ilic P., Ilic S., Stojanovic Bjelic L. Hazard modelling of accidental release chlorine gas using modern tool – ALOHA Software, Quality of Life, 9, 2018. – pp. 38-45.

NUMERICAL MODELING OF THE DISTRIBUTION OF POLLUTANTS IN THE AIR

Oleksandr Berlov, Sofiia Myhur, Olena Biliaieva

Abstract. *Numerical models of the distribution of chemically hazardous substances in the air during their emission at industrial enterprises are considered. Scenarios of unorganized emissions at industrial sites or inside industrial premises and organized emissions from low-level sources at an industrial site are modeled. It is known that the consequence of unorganized emissions of toxic substances is air pollution in working areas at industrial sites, atmospheric air pollution in residential areas, and contamination of the underlying surface. With organized emissions at industrial sites, areas with an increased concentration of hazardous substances can also be formed. Very often such situations arise at enterprises when there are organized emissions from low-level sources (emissions on the roof of industrial buildings) and under adverse weather*

conditions - calm, inversion. 2D and 3D CFD models based on the numerical integration of the fundamental equations of continuum mechanics are proposed.

Keywords: *air pollution, hazardous substances, emergency emissions, numerical modeling, work area*

REFERENCE

1. Biliaiev M. M., Berlov O. V. and Kirichenko P. S. (2017). Matematychnye modelyuvannya v zadachax promyslovoyi bezpeky ta oxorony praci [Mathematical modeling in industrial safety and occupational health problems]. Monografiya [Monograph]. Kryvyj Rig: Vydavetz R.A. Kozlov. [in Ukrainian].
2. Biliaiev M.M., Biliaieva V.V., Berlov O.V. and Kozachyna V.A. (2022). CFD modelyuvannya v analizi efektyvnosti system zaxystu dovkillya ta pracivnykiv na robochyx miscyax : monografiya [CFD modeling in the analysis of the effectiveness of the environmental protection system and workers at workplaces : monograph]. Dnipro : Zhurfond. [in Ukrainian].
3. Zgurovskii M.Z., Skopetskii V.V., Khrutch V.K. and Biliaiev M.M. (1997). Chislennoe modelirovanie rasprostraneniya zagryazneniya v okruzhayuschey srede [Numerical simulation of the spread of pollution in the environment]. Kyiv : Naukova Dumka Publ., 368 p. [in Russian].
4. Pshinko A.N., Belyayev N.N. and Mashihina P.B. (2011). Modelirovanie zagryazneniya atmosfery pri tekhnogennyh avariayah : monografiya [Modeling of atmospheric pollution during technogenic accidents]. Dnipropetrovsk : Nova ideologiya Publ., 166 p. [in Russian].
5. Anthony Michael Barret. (2009). Mathematical Modeling and Decision Analysis for Terrorism Defense: Assessing Chlorine Truck Attack Consequence and Countermeasure Cost Effectivness. Dissertation, (Pittsburg, Pennsylvania, USA), 2009. – 123 p. [in English].
6. Ilic P., Ilic S., and Stojanovic Bjelic L. (2018). Hazard modelling of accidental release chlorine gas using modern tool – ALOHA Software, Quality of Life, 9, 2018. – S. 38-45. [in English].

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЗАБРУДНЕННЯ ПОВІТРЯ НА ОБ'ЄКТАХ ГІРНИЧО-ПРОМИСЛОВОГО КОМПЛЕКСУ

Біляєв М.М.¹, Кіріченко П.С.², Татарко Л.Г.³

¹ *Український державний університет науки і технологій, ННІ ДІІТ, Д.т.н.,
професор, Україна*

² *Криворізький національний університет, к.т.н.,² доцент, Україна*

³ *Український державний університет науки і технологій, ННІ УДХТУ, к.т.н.,
доцент, Україна*

Анотація. У доповіді розглянуто чисельні моделі, які були побудовані для прогнозування забруднення робочих зон на різних об'єктах гірничопромислового комплексу. Розробка математичних моделей здійснена для різних ділянок та промислових майданчиків видобування та переробки залізної руди в Криворізькому районі. Розглянуті питання математичного моделювання поширення пилогазової хмари при вибухах в кар'єрах, виносу пилу від хвостосховищ та при перевантаженні гірничої маси на промислових майданчиках. Для математичного моделювання поширення домішки в повітрі робочих зон використовується конвективно-дифузійне рівняння переносу домішки. Дане рівняння враховує перенос домішки за рахунок руху повітряного потоку, атмосферної дифузії, гравітаційного осадження домішки. Для визначення поля швидкості повітряного потоку використовуються дві моделі аеродинаміки – модель потенціального руху та рівняння Ейлера. Для чисельного рішення моделюючих рівнянь використовуються кінцево-різницеві схеми та метод розщеплення. На основі розроблених чисельних моделей розроблено комплекс комп'ютерних програм.

Ключові слова: чисельне моделювання, забруднення повітря, робоча зона, охорона праці, екологічна безпека

Функціонування гірничопромислового комплексу пов'язано з інтенсивним забрудненням навколишнього середовища, та, в першу чергу, повітря. Дуже інтенсивне забруднення має місце при вибухах в кар'єрах та виносу пилу від хвостосховищ. Пилове забруднення від вибуху в кар'єрі носить раптовий та потужний характер. Пилова хмара поширюється в атмосфері та має місце значне забруднення атмосферного повітря та підстильної поверхні як в робочих зонах так і в селітебних зонах. Винос пилу з хвостосховищ – це довгострокове, теж інтенсивне забруднення повітря та підстильної поверхні. Слід підкреслити, що для оцінювання впливу виносу пилу від хвостосховищ та

при вибуху в кар'єрі використовуються спрощені математичні моделі, емпіричні або аналітичні. Для отримання більш науково-обґрунтованої інформації слід використовувати чисельні моделі, що дають можливість врахувати основні фізичні фактори, що впливають на формування областей забруднення.

Для рішення складних задач аеродинаміки та масопереносу домішки при викидах в кар'єрах, виносу пилу з хвостосховищ та при перевантаженні гірничої маси на промислових майданчиках розроблений комплекс чисельних моделей. Для визначення поля швидкості повітряного потоку в умовах складного рельєфу та при наявності на промисловому майданчику різного роду перешкод використовуються:

1. рівняння для потенціалу швидкості;
2. рівняння Ейлера.

Для формування складної геометричної форми розрахункової області використовується метод маркування.

Процес розповсюдження домішки в повітрі моделюється рівнянням масопереносу. Дане рівняння враховує перенос домішки за рахунок швидкості повітряного потоку та атмосферної дифузії. Для визначення швидкості осадження домішки в повітрі використовується формула Стокса. Для чисельного інтегрування 2D та 3D моделюючих рівнянь аеродинаміки та масопереносу використовуються явні різницеві схеми.

Розроблені математичні моделі відносяться до класу «operational models», тобто, орієнтовані на проведення серійних розрахунків на етапі «фор – ескіз». Особливістю розроблених чисельних моделей є оперативність розрахунків – час на проведення обчислювального експерименту дорівнює 5-10 сек.

Слід підкреслити, що розроблені чисельні моделі можуть бути використані для оцінювання параметрів мікроклімату всередині робочих приміщень.

Наведені результати обчислювальних експериментів на базі побудованих чисельних моделей.

Висновки

1. Побудовані чисельні моделі для аналізу динаміки забруднення атмосферного повітря та підстильної поверхні при поширенні в атмосфері пилогазової хмари, що утворилася після вибуху в кар'єрі. Для практичної реалізації розроблених чисельних моделей використовується стандартна метеорологічна інформація. Побудовані моделі дають можливість визначити найбільш забрудненні області підстильної поверхні.

2. Запропановані чисельні моделі для розрахунку процесу виносу пилу від хвостосховищ. Моделі дають можливість визначити ефективність подачі води на поверхню хвостосховища з метою зменшення пилоутворення.

3. Розроблені чисельні моделі для аналізу пилового забруднення повітря на ділянках перевантаження гірничої маси. Моделі дають можливість визначити рівень небезпеки для працівників в робочих зонах при різних метеоумовах.

ЛІТЕРАТУРА

1. Medvedieva O., Biliaiev M., Kozachyna V., Mormul T., Buketov V. Experimental Study of Dust Emission Intensity from the Surface of the Alluvium Beach. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2024. Vol. 1348 : Essays of Mining Science and Practice : Proceedings of the V International Conference. Article 012072. DOI: 10.1088/1755-1315/1348/1/012072.
2. Lapshyn Ye., Biliaiev M., Biliaieva V., Halchenko Z., Medanyk V., Buketov V. Numerical Modeling of the Wind Regime on the Beaches of the Wash of the Artificial Storage Facilities for Mineral Processing Waste. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2024. Vol. 1348 : Essays of Mining Science and Practice : Proceedings of the V International Conference. Article 012080. DOI: 10.1088/1755-1315/1348/1/012080.
3. Semenenko Ye., Medvedieva O., Biliaiev M., Rusakova T., Blyuss K. Numerical Analysis of Aerodynamic Regime Near Tailings Storage Facility. IOP Conference. Series: Earth and Environmental Science. 2023. Vol. 1156, Iss. 1 : 4th International Conference on Essays of Mining Science and Practice (Dnipro 9–11 November 2022, Ukraine). DOI: 10.1088/1755-1315/1156/1/012006.
4. Чисельне моделювання забруднення повітря на промисловому майданчику під час штилю / М. М. Біляєв, В. В. Біляєва, О.В. Берлов, А.В. Краснюк, В.В. Цуркан // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. «Український журнал будівництва та архітектури». – Дніпро : ДВНЗ ПДАБА, 2022. – № 4 (010). – С. 7–13. DOI:10.30838/J.BPSACEA.2312.250822.7.871

MATHEMATICAL MODELING OF AIR POLLUTION AT MINING AND INDUSTRIAL COMPLEX FACILITIES

Mykola Biliaiev, Pavlo Kirichenko, Larysa Tatarko

Abstract. *The report considers numerical models that were built to predict contamination of working areas at various facilities of the mining complex. Mathematical models were developed for various areas and industrial sites for the extraction and processing of iron ore in the Kryvyi Rih district. The issues of mathematical modeling of the spread of dust and gas clouds during explosions in quarries, dust removal from tailings dumps and during overloading of rock mass at industrial sites are considered. For mathematical modeling of the spread of impurities in the air of working areas, the convective-diffusion equation of impurity transport is used. This equation takes into account the transfer of impurities due to the movement of the air flow, atmospheric diffusion, and gravitational deposition of impurities. To determine the air flow velocity field, two aerodynamic models are used - the potential motion model and the Euler equation. Finite-difference schemes and the splitting method are used to numerically solve the modeling equations. Based on the developed numerical models, a set of computer programs has been developed.*

Keywords: *numerical modeling, air pollution, work area, occupational safety, environmental safety*

REFERENCE

1. Medvedieva O., Biliaiev M., Kozachyna V., Mormul T. and Buketov V. (2024). Experimental Study of Dust Emission Intensity from the Surface of the Alluvium Beach. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2024. Vol. 1348 : Essays of Mining Science and Practice : Proceedings of the V International Conference. Article 012072. DOI: 10.1088/1755-1315/1348/1/012072.
2. Lapshyn Ye., Biliaiev M., Biliaieva V., Halchenko Z., Medianyuk V., Buketov V. (2024). Numerical Modeling of the Wind Regime on the Beaches of the Wash of the Artificial Storage Facilities for Mineral Processing Waste. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2024. Vol. 1348 : Essays of Mining Science and Practice : Proceedings of the V International Conference. Article 012080. DOI: 10.1088/1755-1315/1348/1/012080.
3. Semenenko Ye., Medvedieva O., Biliaiev M., Rusakova T., Blyuss K. (2023). Numerical Analysis of Aerodynamic Regime Near Tailings Storage Facility. IOP Conference. Series: Earth and Environmental Science. 2023. Vol. 1156, Iss. 1 : 4th International Conference on Essays of Mining Science and Practice (Dnipro 9–11 November 2022, Ukraine). DOI: 10.1088/1755-1315/1156/1/012006.
4. Biliaiev M. M., Biliaieva V. V., Berlov O. V., Krasniuk A. V. and Tsurkan V. V. (2022). Chyselne modelyuvannya zabrudnennya povitrya na promyslovomu majdanchyku pid chas shtylyu. [Numerical modeling of air pollution at an industrial site during calm weather]. Ukrayinskyj zhurnal budivnytstva ta arhitektury [Ukrainian Journal of Construction and Architecture]. Vol. 4(010), 2022. – S. 7-13. DOI:10.30838/J.BPSACEA.2312.250822.7.871

АДАПТИВНЕ ПРОРІДЖУВАННЯ ПОТОКУ ДАНИХ У СИСТЕМАХ ДИСТАНЦІЙНОГО МОНІТОРИНГУ ОБ'ЄКТІВ ТРАНСПОРТНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ.

Гасанов Р.З.¹, Іванов О.П.²

¹ Український державний університет науки і технологій, аспірант Україна

² Український державний університет науки і технологій, к.т.н. доцент, Україна

Анотація. У цій роботі розглядається метод адаптивного прорідження потоку даних у системах дистанційного моніторингу об'єктів транспортної інфраструктури. Запропонована модель регулює частоту передачі повідомлень, враховуючи інтенсивність вхідного потоку та пропускну здатність каналу зв'язку. Основний механізм базується на зміні інтервалу прорідження, який адаптується залежно від поточного завантаження системи. У разі перевантаження інтервал збільшується, зменшуючи обсяг переданих даних, а при покращенні умов передачі – зменшується, підвищуючи ефективність використання каналу. Розроблена модель забезпечує баланс між мінімізацією втрат критичної інформації та зниженням навантаження на мережу, що дозволяє підвищити стабільність і надійність моніторингу транспортної інфраструктури.

Ключові слова: адаптивне управління, адаптивні моделі, прорідження потоку даних, інфраструктура передачі даних, програмне забезпечення, інтенсивність потоку повідомлень, моніторинг об'єктів

Дистанційний моніторинг об'єктів транспортної інфраструктури стає дедалі більш затребуваним рішенням у сучасних умовах розвитку транспортної мережі та зростання інтенсивності перевезень. Такий підхід дає змогу безперервно спостерігати за станом мостів, доріг, тунелів, залізничних колій та інших ключових елементів інфраструктури, забезпечуючи безпеку та надійність транспортної системи.

У подібних системах моніторингу важливу роль відіграє оперативна доставка інформації про стан об'єкта на сервер. Канали передачі даних, які з'єднують вузли зняття параметрів і серверне програмне забезпечення, схильні до завад і збоїв, зокрема можливі падіння пропускну здатності каналу з різних причин. Подібні проблеми можуть призвести до ситуації, коли інформація про

стан об'єкта почне надходити із затримкою, причому кожен наступний збір збільшуватиме цей часовий лаг.

Щоб запобігти такій проблемі, пропонується прорідження потоку вхідних даних, яке полягає в тому, що при виникненні затримок частина даних відкидається, а на сервер надходять лише найактуальніші дані. У [1] розглядалася нечітка модель управління прорідженням, яка динамічно регулювала прорідження вхідного потоку повідомлень на основі правил нечіткої моделі, що застосовувалися з урахуванням таких параметрів, як інтенсивність вхідного потоку повідомлень і пропускна здатність каналу передачі даних.

Запропонована адаптивна модель також приймає на вхід ті ж самі параметри, однак керує прорідженням на основі коефіцієнта завантаження, змінюючи інтервал прорідження таким чином, щоб система залишалася стабільною.

Ключовий механізм моделі – керування інтервалом проріджування, який визначається як часовий проміжок між останнім надісланим повідомленням і заданим пороговим значенням. Протягом цього інтервалу всі отримані дані відкидаються, запобігаючи накопиченню черги та знижуючи навантаження на канал передавання даних.

Під час погіршення пропускної здатності система автоматично збільшує інтервал проріджування, забезпечуючи передавання лише актуальної інформації про поточний стан об'єкта. Такий підхід дає змогу уникнути перевантажень, мінімізувати втрати інформації та ефективно використовувати доступні ресурси каналу передавання даних.

Основні параметри системи:

- Інтервал проріджування τ . Це мінімальний час між повідомленнями, який повинен пройти, щоб наступне повідомлення було поставлене в чергу для відправки на сервер.

- Іntenсивність надходження повідомлень λ . Це кількість повідомлень, що надходять у чергу на відправку за одиницю часу. При проріджуванні фактична

інтенсивність надходження повідомлень зменшиться, оскільки частина з них буде відкинута, якщо вони приходять надто швидко.

– Пропускна здатність каналу μ . Це кількість повідомлень, яке система здатна передати на сервер за одиницю часу. Вона визначається як:

$$\mu = \frac{2}{\tau_p}, \quad (1)$$

де τ_p – це час, що проходить від моменту відправлення спеціального повідомлення від джерела на сервер до отримання зворотного повідомлення від сервера.

– Адаптована інтенсивність потоку. Це кількість повідомлень, які поміщаються в чергу на відправку після процедури проріджування. Адаптовану інтенсивність потоку можна виразити як:

$$\lambda_{th} = \begin{cases} \min\left(\lambda, \frac{1}{\tau_0}\right), & \tau > 0 \\ \lambda, & \tau = 0 \end{cases}. \quad (2)$$

Це означає, що якщо середній інтервал між повідомленнями менший за величину інтервалу проріджування, то інтенсивність потоку обмежується цим інтервалом. Якщо інтервал проріджування не встановлено, то повідомлення попадуть в чергу на відправку без обмежень.

– Коефіцієнт завантаження каналу ρ . Це відношення інтенсивності надходження повідомлень до пропускної здатності μ :

$$\rho = \frac{\lambda_{th}}{\mu}. \quad (3)$$

При $\rho < 1$ система залишається стабільною, тобто вона здатна передати весь обсяг отриманих даних на сервер. Якщо цей коефіцієнт наближається до 1, система близька до перевантаження. У цьому стані можливі затримки повідомлень у черзі на передавання та надходження даних на сервер із запізненням, проте канал зв'язку все ще справляється з передаванням усього обсягу інформації.

При $\rho > 1$ система переходить у стан перевантаження, що означає, що вона не здатна передавати весь обсяг даних, який надходить на її вхід. Це призводить до накопичення черги повідомлень і відмови у передаванні.

Запропонована адаптивна модель спрямована на зміну інтервалу проріджування τ залежно від поточного стану системи. Якщо система близька до перевантаження, інтервал проріджування збільшується, що зменшує інтенсивність потоку даних λ_{th} . Якщо пропускна здатність каналу μ дозволяє передавати більше повідомлень, інтервал проріджування зменшується, що збільшує потік повідомлень і підвищує ефективність використання каналу.

Модель динамічно змінює інтервал проріджування τ в залежності від поточної інтенсивності повідомлень, що надходять на вхід, та поточної пропускної здатності каналу так, щоб коефіцієнт завантаження ρ залишався меншим за 1, тобто щоб система була стабільною, не накопичуючи надмірну чергу повідомлень. Інтервал проріджування змінюється в межах заданого діапазону $[0, \tau_{max}]$ з певним кроком τ_{st} , що дозволяє плавно регулювати потік повідомлень, які надсилаються на сервер, уникаючи різких змін інтенсивності потоку.

На рис. 1 показані результати експерименту імітаційного моделювання збою, який полягає в зменшенні пропускної здатності каналу передачі даних за умови збереження інтенсивності вхідного потоку повідомлень.

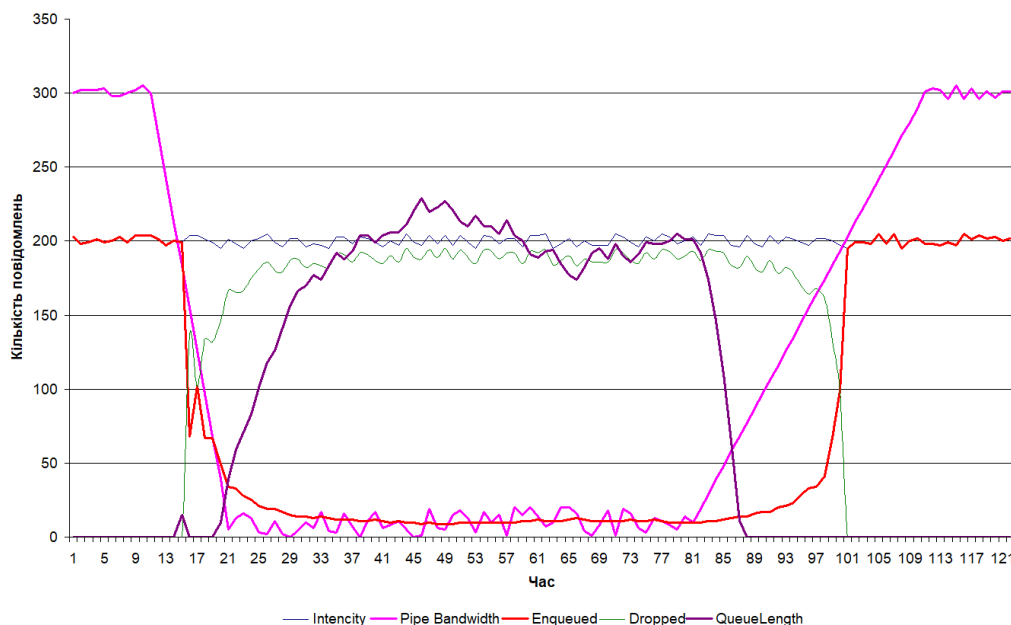


Рисунок 1 – Обробка зниження пропускної здатності каналу передачі даних

Вісь часу представлена в секундах від початку експерименту, а вісь абсцис – кількістю повідомлень за секунду.

На графіку показані зміни таких параметрів:

- Intensity – інтенсивність вхідного потоку повідомлень (повідомлень за секунду);
- Pipe Bandwidth – пропускна здатність каналу передачі повідомлень (повідомлень за секунду);
- Enqueued – кількість повідомлень, поставлених у чергу на відправку;
- Dropped – кількість відкинутих повідомлень;
- Queue Length – довжина черги.

Помітна запізнiла реакція системи на зменшення пропускної здатності каналу, а також після її відновлення. При цьому система продовжує надсилати дані на сервер, а черга повідомлень на відправлення досягає певного значення і більше не збільшується, тобто система перейшла в стабільний стан і справляється з навантаженням. Середня довжина черги співмірна з інтенсивністю вхідного потоку. Таким чином, затримка повідомлення в черзі становить приблизно одну секунду і при цьому не збільшується.

Після відновлення пропускної здатності каналу помітне зменшення довжини черги, тобто дані починають передаватися на сервер без затримки в черзі. Повний обсяг переданих даних відновлюється трохи пізніше, коли пропускна здатність каналу стає співмірною з інтенсивністю вхідного потоку. Іншими словами, модель поступово зменшує інтервал прорідження і остаточно його скасовує, щойно пропускна здатність каналу починає перевищувати інтенсивність вхідного потоку.

Таким чином, модель управління прорідженням зберегла працездатність системи передавання даних і запобігла відмові, пов'язаній із переповненням черги повідомлень, при цьому сервер продовжував отримувати актуальну інформацію про стан об'єкта.

Змінюючи величину кроку адаптації τ_{st} , можна налаштовувати швидкість реакції системи на збої - при невеликому кроці реакція системи буде більш плавною. Велике значення τ_{st} забезпечує швидку реакцію на зміну ситуації, проте у випадку короткочасних збоїв це може призвести до надмірного проріджування потоку повідомлень.

ЛІТЕРАТУРА

1. Скалозуб В.В., Гасанов Р.З. Застосування нечітких моделей для керування потоками повідомлень в інфраструктурах передачі даних. International scientific and technical

conference. Information Technologies in Metallurgy and Machine building–ITMM 2024, C. 445–447.

2. Sally Floyd, Van Jacobson Random Early Detection Gateways for Congestion Avoidance. IEEE/ACM Transactions on Networking – 1993.

ADAPTIVE DATA STREAM THINNING IN REMOTE MONITORING SYSTEMS FOR TRANSPORT INFRASTRUCTURE

Rovshan Gasanov, Oleksandr Ivanov

Abstract. *This work examines the method of adaptive data stream thinning in remote monitoring systems for transport infrastructure. The proposed model dynamically regulates the frequency of message transmission by considering the intensity of the incoming stream and the bandwidth of the communication channel. The primary mechanism is based on adjusting the thinning interval, which is adapted according to the current system load. In cases of overload, the interval is increased, reducing the volume of transmitted data, whereas under improved transmission conditions, it is decreased, enhancing the efficiency of channel usage. The developed model ensures a balance between minimizing the loss of critical information and reducing network load, thereby improving the stability and reliability of transportation infrastructure monitoring.*

Keywords: *adaptive control, adaptive models, data stream thinning, data transmission infrastructure, software, message flow intensity, monitoring*

REFERENCE

1. Vladislav Skalozub, Rovshan Gasanov. Application of fuzzy models to control the stream of messages in data transmission infrastructures. International scientific and technical conference. Information Technologies in Metallurgy and Machine building–ITMM 2024, C. 445–447. [in Ukrainian].
2. Sally Floyd, Van Jacobson Random Early Detection Gateways for Congestion Avoidance. IEEE/ACM Transactions on Networking – 1993.

MODEL OF THE INFLUENCE OF THE STRESS STATE ON THE STRAIN RATE CURVE DURING HIGH-TEMPERATURE DEFORMATION OF SILICON NITRIDE-BASED CERAMICS

Hnylytsia I. D.¹, Hrushetskyi M. V.²

¹*Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ph.D., associate professor, Ukraine*

²*Vasyl Stefanyk Prykarpathian National University, Postgraduate student, Ukraine*

Abstract. *The deformation rate curves of ceramic materials of known compositions based on silicon nitride with high (Si_3N_4 -5wt.% Y_2O_3 -5wt.% Al_2O_3), medium (Si_3N_4 -5wt.% Y_2O_3 -2wt.% Al_2O_3) and low (Si_3N_4 -2wt.% Y_2O_3 -1wt.% Al_2O_3) content of sintering activators during high-temperature deformation according to the direct extrusion scheme were analyzed. The nature of the influence of the rotation of elongated grains on the processes of mass transfer and the rate of deformation is described. The stress state in the deformation zone is considered. The influence of moment stresses on the rotation of elongated grains is shown. The influence of the stress state and the rotation of elongated grains on the curve of the rate of deformation is considered. A mathematical model of non-uniform rotation of elongated β - Si_3N_4 grains in an inhomogeneous stress field in the transition cone of the matrix is considered. The presence of a constant velocity section on a typical strain rate curve during high-temperature deformation according to the direct extrusion scheme is explained.*

Keywords: *silicon nitride, deformation, deformation mechanism, rotation of elongated grains, model of deformation process.*

The change in normal longitudinal stresses from the outer edge of the punch to the central axis for each individual elongated grain of the β -phase in the structure of the silicon nitride material, the position of which is not coaxial with the axis of symmetry of the matrix, means the presence of a moment of forces that tries to orient the grain along the lines of normal longitudinal stresses. Grain rotation can occur when the shear stress acting on the boundaries is unbalanced, resulting in a moment that rotates the grain. This is observed when, in a two-phase material, the resistance to grain boundary sliding is different from the resistance to interphase sliding.

There are generalized models of material deformation in which the vectors of movement and rotation of particles of the medium play a significant role, and the

tensors of deformations and stresses are asymmetric, that is, models that are sensitive to moment stresses. Media that allow moment stresses are called Cosser continua, and the theory that describes moment stresses has become known in the literature as the moment or asymmetric theory of elasticity.

Thus, during high-temperature deformation of silicon nitride materials according to the direct extrusion scheme, there are conditions that determine the rotation of elongated grains of the β -phase in a gradient stress field. The rotation of grains in the stress field occurs with the assistance of grain boundary sliding and viscous flow of the liquid intergranular phase, and after its crystallization, such rotation occurs due to grain boundary sliding with the participation of grain boundary layers of the uncrystallized intergranular phase. Grain rotation due to the Cosser effect is one of the reasons for the formation of a texture of the extruded material directed along the direction of deformation.

In the general case, it can be assumed that the distribution of elongated grains of the β -phase, which are present in the structure of the material before extrusion, along the angle of inclination to the axis of symmetry of the matrix is approximately uniform. In other words, we assume that in the structure of the initial sintered sample before deformation, the number of elongated grains is the same for each value of the angle of inclination of the latter to the longitudinal (or transverse) axis of symmetry of the extrusion die.

The magnitude of the moment of forces arising due to the gradient of normal longitudinal stresses will depend on the magnitude of the projection of the grain size onto the plane perpendicular to the line of normal longitudinal stresses (Figure 1).

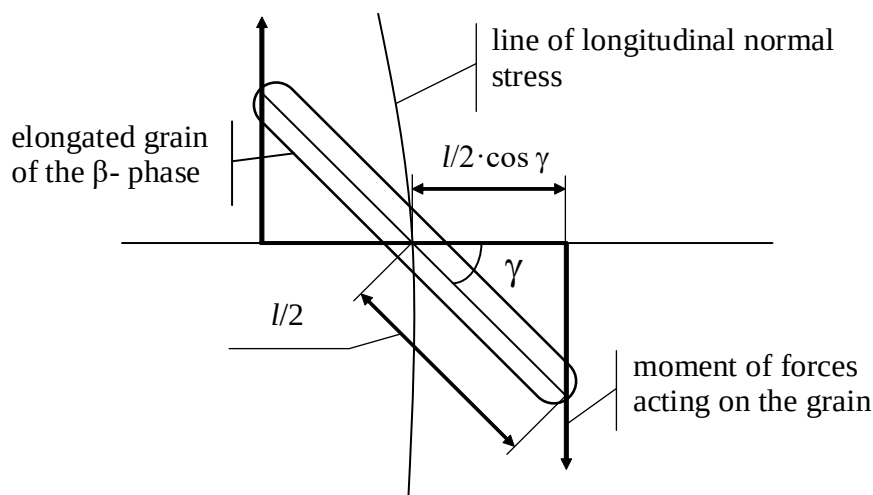


Figure 1 – Dependence of the moment of force causing grain rotation
on the grain inclination angle

Thus, the magnitude of the moment of force acting on an elongated grain of the β -phase depends on the angle of inclination, or more precisely on the $\cos$ of this angle, of each specific grain to the plane perpendicular to the line of normal longitudinal stress passing through the center of the grain:

$$M \gg P \times \frac{l}{2} \times \cos \gamma \quad (1)$$

where M is the moment of force acting on an elongated grain of the β -phase; l is the length of the grain of the β -phase; P is the specific pressure on the punch; γ is the angle of inclination of the grain to the plane perpendicular to the line of normal longitudinal stress.

The magnitude of the moment of force will decrease as this angle increases, and the angle itself during extrusion for each grain will gradually increase. An increase in the angle will mean a decrease in the moment of force acting on the grain. Since the $\cos$ function is nonlinear, the intensity of the reduction in the moment of force acting on the grain will increase as the grain reorients along the line of normal longitudinal stress. If we assume a directly proportional relationship between the speed of rotation of the grain and the magnitude of the moment of force that this rotation causes:

$$V \gg P \times \frac{l}{2} \times \cos \gamma \quad (2)$$

where V is the rotation speed of an elongated grain of the β -phase; then the above means that the rotation speed of differently oriented grains is different.

The closer the grain approaches a position oriented along the line of normal longitudinal stress, the slower its rotation. Considering the nature of the trajectories of normal longitudinal stresses, and specifically the fact that the angle of misorientation of the longitudinal stress lines with the axis of symmetry of the matrix gradually decreases as it approaches the transitional conical part and is minimal when passing through this cone, it can be assumed that the speed of rotation of the grains increases as it approaches the conical part of the matrix and is maximal when passing through the latter.

From this we can conclude that the main rotation of the grains occurs precisely when passing through the transition cone of the matrix.

Based on the assumption that the moment of force acting on the grain, and therefore the speed of rotation of the grain, depends on the angle of inclination of the grain to the longitudinal axis of symmetry of the matrix according to the cosine law and taking into account the nature of possible trajectories of normal longitudinal stresses, an analysis of the speed of rotation of differently oriented grains and changes in their position (angle of inclination to the longitudinal axis) in time was carried out in a first approximation:

$$\frac{d\gamma}{dt} \approx P \cdot \frac{1}{2} \cdot \cos \gamma \quad (3)$$

$$d\gamma \approx P \cdot \frac{1}{2} \cdot \cos \gamma \cdot dt \quad (4)$$

$$\gamma = \gamma_0 + d\gamma \quad (5)$$

where γ_0 is the initial angle of inclination of the elongated grain to the matrix axis.

The analysis shows that with the above-described uneven rotation of elongated grains, there is a certain time interval during which a part of such grains will sequentially pass through a position in which their angle of inclination to the longitudinal axis of symmetry of the matrix will be close to or equal to 45° .

Therefore, during this time interval, some of the elongated grains will pass through a position in which the values of tangential stresses are maximum and grain boundary sliding is most facilitated.

The hypothesis presented allows us to explain the presence of horizontal sections on the kinetic curves of the deformation rate, that is, to explain the fact of stabilization of the deformation rate at a constant level.

Conclusions. Moment stresses in the deformation zone affect the rotation of elongated grains of $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$. The passage of elongated grains through a position at an angle of 45° to the matrix axis leads to the appearance of a horizontal section on the deformation rate curve.

REFERENCES

1. Cannon W. Roger, Langron Terence G. Review. Creep of ceramics. Part 2: An examination of flow mechanisms // J. Mater. Sci., 1988.-23, № 1.-P.1-20.

2. Belchuk Mark, Watt Dan, Dryden John. Modeling creep in materials with soft boundary phases // Proc. Int. Symp. Adv. Struct. Mater., Montreal, Aug. 28-31, 1988.-New-York etc., 1989.-P.123-129.
3. Gogotsi Yuri, Ostrovoj Dmitry, Traskovsky Vladimir. Deformation and creep of silicon nitride-matrix composites // Mech. Creep Brittle Mater. 2: Proc. Int. Colloq., Leicester, 2-4 Sept., 1991.- London; New-York, 1991.- P.230-241.
4. Eiichi Sato, Naoki Kondo and Fumihiro Wakai. Superplasticity in Si_3N_4 Associated with Rod-like Grain Alignment // Material Science Forum Vols. - 1997.- 243-245.- P. 115-124.

МОДЕЛЬ ВПЛИВУ НАПРУЖЕНОГО СТАНУ НА КРИВУ ШВИДКОСТІ ДЕФОРМАЦІЇ ПРИ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНІЙ ДЕФОРМАЦІЇ КЕРАМІКИ НА ОСНОВІ НІТРИДУ КРЕМНІЮ

Гнилиця І.Д., Грушецький М.В.

Анотація. Проаналізовано криві швидкості деформації керамічних матеріалів відомих складів на основі нітриду кремнію з високим (Si_3N_4 -5мас.% Y_2O_3 -5мас.% Al_2O_3), середнім (Si_3N_4 -5мас.% Y_2O_3 -2мас.% Al_2O_3) і низьким (Si_3N_4 -2мас.% Y_2O_3 -1мас.% Al_2O_3) вмістом активаторів спікання при високотемпературному деформуванні по схемі прямої екструзії. Описано характер впливу обертання видовжених зерен на процеси масообміну та швидкість деформації. Розглянуто напружений стан в зоні деформації. Показано вплив моментних напружень на поворот видовжених зерен. Розглянуто вплив напруженого стану та повороту видовжених зерен на криву швидкості деформації. Розглянуто математичну модель нерівномірного обертання видовжених зерен β - Si_3N_4 в неоднорідному полі напружень у перехідному конусі матриці. Пояснено наявність ділянки постійної швидкості на типовій кривій швидкості деформації при високотемпературному деформуванні по схемі прямої екструзії.

Ключові слова: нітрид кремнію, деформація, механізм деформації, обертання видовжених зерен, модель процесу деформації.

ВЕРИФІКАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ЧИСЕЛЬНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ВИТІКАННЯ ГАЗОВИХ СТРУМЕНІВ З ЦИЛІНДРИЧНОГО СОПЛА ЗА ДОПОМОГОЮ МЕТОДІВ ТІНЬОВОЇ ЗЙОМКИ

Голуб Т.С.¹, Молчанов Л.С.², Мінай О.М.³

¹ Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАНУ, к.т.н., Україна

² Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАНУ, к.т.н., Україна

³ Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАНУ, PhD, Україна

Анотація. Протягом усього періоду існування киснево-конвертерного способу виробництва сталі створено багато різновидів конструкцій продувних сопел для верхньої продувки у кисневих конвертерах, і цей творчий процес вдосконалення й до сьогодні має значний потенціал. Кожне ново створене сопло потребує випробування та вивчення щодо технологічних та фізичних можливостей впливу на газовий потік, яке у промислових умовах зробити майже неможливо. Відповідно активно розвиваються високотемпературні, низькотемпературні й математичні методи моделювання щодо дослідження газо-гідродинамічних особливостей газових струменів, що витікають з сопел різної конструкції. Математичне моделювання вже давно зайняло важливе місце серед інших методів завдяки можливості одночасного оцінювання декількох факторів впливу та можливості прогнозування параметрів роботи сопел. Однак такий тип моделювання на початкових стадіях потребує верифікації, яку найчастіше, за наявності обладнання, роблять прямими методами вимірювання швидкостей. В роботі проведено дослідження можливості верифікації результатів математичного моделювання витікання газового струменя з циліндричного сопла шляхом застосування методів тіньової зйомки. Відзначено значний рівень відповідності результатів обох типів моделювання та переваги математичного моделювання.

Ключові слова: сопло для продувки, фізичне моделювання, математичне моделювання, тіньова зйомка, верифікація результатів

Кисневий струмінь у процесах отримання рідкої сталі відіграє головну роль як з точки зору газо-динамічного впливу на ванну для здійснення масообмінних процесів між рідкими шлаковою та металевою фазами, так і з точки зору забезпечення окислювально-відновних перетворень [1]. Для забезпечення раціональних умов взаємодії кисневого струменя з рідкою ванною та поліпшення технологічних та екологічних показників виплавки у кисневих конвертерах постійно вдосконалюються наявні конструкції

продувних фурм та створюються нові конструкції пристроїв та удосконалюються конструкції продувних сопел [2]. Будь-яке нововведення потребує випробування на практиці для відпрацювання сталих раціональних режимів роботи. У зв'язку із цим широкого загалу набуло різнопланове моделювання процесів продувки у кисневих конвертерах: фізичне високотемпературне, низькотемпературне або математичне моделювання [3-5]. Останнє займає особливе місце серед інших способів, бо надає можливість отримати не тільки кількісну оцінку технологічних показників продувного пристрою, але й спрогнозувати характеристики газового струменя, що витікає з досліджуемого продувного пристрою, при зміні одного чи декількох параметрів одночасно й більш точно оцінити раціональні робочі параметри та можливі недоліки роботи пристрою, такі як розгар кромки, тощо [5].

Однак точність математичного моделювання залежить від граничних умов, які використовуються й від точності складених рівнянь, за якими проводяться розрахунки. Відповідно на початкових стадіях моделювання роботи продувного пристрою необхідно проводити верифікацію результатів моделювання. Найчастіше верифікацію проводять за допомогою прямого вимірювання швидкостей у потоці за конкретних умов продувки, як у [5]. Однак, для цього потрібно спеціальне обладнання (трубка Піто з отворами відповідного діаметру). А якщо моделювання проводиться на соплах малих розмірів, то внесення стороннього тіла в потік газу спричиняє значний вплив на показники струменя, у тому числі й на швидкість. Іншим варіантом проведення верифікації результатів моделювання може бути тіньова зйомка газового струменя, що витікає за умов, які обрані для моделювання [6].

Метою роботи була оцінка можливості верифікації результатів математичного моделювання витікання газового струменя з продувного сопла за допомогою результатів тіньової зйомки для умов циліндричного сопла.

Для дослідження було обрано одне циліндричне сопло із діаметром $3,2 \cdot 10^{-3}$ м (у масштабі 1:13 до еквівалентного перетину промислового сопла верхньої кисневої фурми для продувки у 250-т конвертері), продувку через яке здійснювали повітрям за умов тиску 100 – 300 кПа надлишкові. Математичне

моделювання проведено за допомогою програми ANSYS Fluent, призначеної для вирішення задач обчислювальної гідродинаміки (CFD) та газодинаміки. Для моделювання у програмі був обраний алгоритм рішення, що базується на густині та який застосовується для розрахунків високошвидкісних транс- та надзвукових потоків та запускає заснований на щільності алгоритм розв'язання рівняння Нав'є-Стокса. При цьому дискретизація основних рівнянь має вигляд неусталеного рівняння збереження енергії для перенесення скалярних величин [7]. Також були враховані рівняння зміни енергії та турбулентності за рахунок оцінювання суми коефіцієнтів ламінарної та турбулентної в'язкості та теплопровідності [7]. Властивості модельного тіла – повітря, задавалися рівнянням стану ідеального газу Клапейрона-Менделєєва. Для отримання точних рішень необхідно було використовувати дискретизацію рівнянь (потoku; кінетичної енергії в турбулентному потоці; рівня розсіювання турбулентного потоку) другого та вище порядків точності [7]. Результати моделювання були отримані у вигляді як кольорових полів швидкостей за довжиною струменя, так і графічних залежностей швидкості струменя від координати вздовж горизонтальної вісі.

Для оцінки отриманих результатів математичного моделювання було проведено натурне дослідження продувки крізь циліндричне модельне сопло методом тіньової зйомки. Ключовими моментами тіньової зйомки були: забезпечення лінійності світового потоку від джерела світла, забезпечення перпендикулярності джерела світла та газового струменя й екрану. Експериментальні фотознімки були перш за все порівняні з кольоровими полями швидкостей, розрахованих за однакових умов. На рис. 1 наведено приклад порівняння для умов тиску перед соплом 300 кПа надлишкових. На результаті моделювання та фотозйомки вихідний переріз сопла у наведеному форматі рисунку є однаковим для забезпечення адекватної можливості порівняння. Відповідно до рисунків видно, що отримані за результатами математичного моделювання особливості зміни швидкості газового потоку за довжиною струменя з утворенням «бочкоподібних» структур мають відповідні відображення на фото, отриманих тіньовою зйомкою, з наявними ділянками

ущільнень й розріджень середовища, які відбиваються в згущенні або висвітленні інтенсивності кольору на фотознімку. При цьому слід відзначити, що результати математичного моделювання мають більш наочний характер та дають змогу більш повно оцінити характер розповсюдження газового струменя з моменту витікання з сопла і далі за осьовим направленням. Видно, що саме в центрі кожного «бочкоподібного» утворення швидкість струменя набуває максимального значення. Також видно, що надалі, за областю утворення «бочкоподібних» структур, струмінь дещо розширюється у порівнянні з вихідним перетином (приблизно на 15 – 20 %), зберігаючи достатньо високі значення швидкості (вище звукової швидкості 330 м/с для повітря).

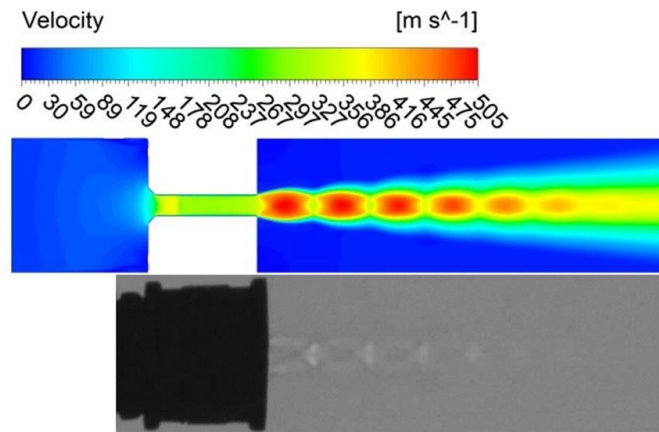


Рисунок 1 – Порівняння результатів математичного моделювання та тіньової зйомки витікання газового струменя крізь циліндричне сопло за тиску продувного газу 300 кПа

Також слід відзначити, що на рисунках співпадають довжини утворених відповідних за довжиною струменя «бочок»: для першої – 0,012 м, другої – 0,014 м, третьої 0,013 м, четвертої – 0,012 м (далі за наявних умов зйомки на фото «бочкоподібні» утворення немає можливості точно оцінити). Дещо відрізняється висота «бочкоподібних» утворень за фото від математично отриманих приблизно на 1 мм, що, ймовірно, пов'язано з точністю фотозйомки.

Відповідно до методики оцінювання швидкості газового потоку за тіньовими фото, за якої швидкість газового потоку перед ударною хвилею визначається за кутом нахилу прямої стрибка ущільнення [6], були обчислені швидкості за першими трьома «бочкоподібними» утвореннями й результати співставлені з результатами обчислення швидкості методом математичного

моделювання. На рис. 2 наведено у якості прикладу співставлення для умов продувки з надлишковим тиском 300 кПа. Було відзначено, що результати математичного моделювання та ті, що були отримані за тіншовими фото, відрізняються на величину порядку 1,6 – 5,5 %. Це дає змогу зробити висновок про адекватність отриманих результатів шляхом математичного моделювання. Слід відзначити, що точність методу визначення швидкості за тіншовою зйомкою, як і будь-який метод, у якому бере участь людина, залежить від точності побудови прямих та визначення їх координат перетину осей для встановлення кутів нахилу. Однак, для даного випадку пряме вимірювання не надасть точніших результатів, бо діаметр модельного сопла менше чи співпадає з діаметром отворів стандартних трубок Піто. Крім того наявною є перевага математичного моделювання, яке дозволяє отримати не тільки у окремих точках дані швидкостей газового струменя, але й дізнатися як і з яким характером швидкості змінюється за довжиною струменя. Ці данні дають додаткову корисну інформацію для розуміння поведінки як окремо газових потоків, так і на наступному етапі – у взаємодії із рідкою ванною.

Проведене дослідження дало змогу зробити висновок, що верифікацію результатів математичного моделювання можливо проводити шляхом тіншової зйомки витікання газових потоків з сопел, які моделюються, за однакових з математичним моделюванням технологічних умов. Відзначено високий рівень візуального співпадіння отриманих результатів та значний рівень співпадіння фактично обчислених результатів за показником швидкості витікання газового струменя на різних ділянках за довжиною. Відмічено, що математичне моделювання має значні переваги як щодо візуалізації загальної картини особливостей розподілу швидкостей у струмені при витіканні з сопла, так і щодо визначення зміни величини швидкості у різних точках за осьовим направленням.

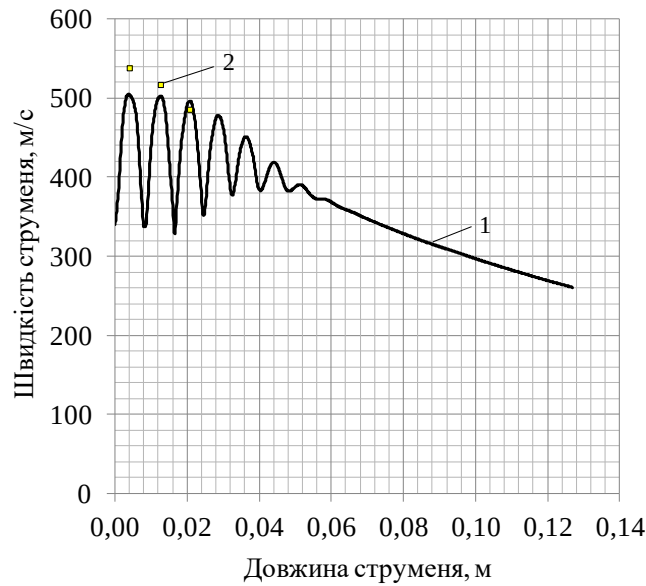


Рисунок 2 – Співставлення результатів математичного обчислення (1) швидкості за горизонтальною віссю струменя та швидкостей, оцінених за тінювими фото (2)

ЛІТЕРАТУРА

1. Visuri V.-V., Holappa L. Converter Steelmaking. Treatise on Process Metallurgy (Second Edition), 2024. Vol.3 Industrial Processes. P. 183–241
2. Чернятевич А.Г., Сигарев Е.Н., Чернятевич И.В. Новые разработки конструкций кислородных фурм и способов продувки ванны 160-т конвертеров ОАО «АрселорМиттал Кривой Рог». Теория и практика металлургии, 2010. т. 2. С. 31–38
3. Gonçalves F., Ribeiro M., Correa R., Silva R., Braga B., Maia B., Tavares R., Carvalho D., Schenk J. Measurements methodologies for basic oxygen furnace cold modeling. Journal of Materials Research and Technology, 2021. Vol. 13. P. 834–856.
4. Чернятевич А.Г., Молчанов Л.С., Юшкевич П.О. Высокотемпературное моделирование продувки конвертерной ванны с применением трехъярусной фурмы. Металл и литье Украины, 2017. № 6-7. С. 17–21
5. Liu F., Lu S., Zeng S., Zhu R., Wei G., Dong K. Flow field of supersonic oxygen jet generated by various wear lengths at the Laval nozzle exit. Coatings, 2024. Vol. 14(11). P. 1444.
6. Ya. B. Zel'dovich, Yu. P. Raizer physics of shock waves and high-temperature hydrodynamic phenomena. Dover Publications. 944 p.
7. Isaev S.A., Lysenko D.A. Testing of the fluent package in calculation of supersonic flow in a step channel. Journal of Engineering Physics and Thermophysics, 2004. Vol. 77. P. 857–860.

VERIFICATION OF THE RESULTS OF NUMERICAL MODELING OF GAS JETS OUTFLOW FROM A CYLINDRICAL NOZZLE USING SHADOW PHOTOGRAPHY METHODS

Golub T.S., Molchanov L.S., Minai O.M.

Abstract. *Many varieties of designs of top blowing nozzles in oxygen converters were created. Every new nozzle requires testing and studying the technological and physical possibilities, which is almost impossible to do in industrial conditions. High-temperature, low-temperature and mathematical modeling methods are actively developing for studying the gas-hydrodynamic features of gas jets flowing from nozzles of various designs. Mathematical modeling gives the possibility of simultaneously evaluating several factors and predicts the operating parameters of nozzles. However, this type of modeling at the initial stages requires verification. It is most often done with direct methods of measuring rates, depending on the availability of equipment. The paper studies the possibility of verifying the results of mathematical modeling of the outflow of a gas jet from a cylindrical nozzle by using shadow photography. A significant level of correspondence between the results of both types of modeling and the advantages of mathematical modeling were noted.*

Keywords: *blowing nozzle, physical modeling, mathematical modeling, shadowing photography, verification of results*

REFERENCE

1. Visuri V.-V., Holappa L. Converter Steelmaking. Treatise on Process Metallurgy (Second Edition), 2024. Vol.3 Industrial Processes. P. 183–241.
2. Cherniatevych A.H., Sigarev Ye.N., Cherniatevych I.V. New developments of oxygen lances designs and methods of blowing the bath of 160-ton converters of OJSC “ArcelorMittal Kryvyi Rih”. Theory and practice of metallurgy, 2010. Vol. 2. P. 31–38 [in Ukrainian]
3. Gonçalves F., Ribeiro M., Correa R., Silva R., Braga B., Maia B., Tavares R., Carvalho D., Schenk J. Measurements methodologies for basic oxygen furnace cold modeling. Journal of Materials Research and Technology, 2021. Vol. 13. P. 834–856.
4. Cherniatevych A.H., Molchanov L.S., Yushkevich P.O. High-temperature modeling of converter bath blowing using a three-tier lance. Metal and Casting of Ukraine, 2017. No 6-7. P. 17–21 [In Ukrainian]
5. Liu F., Lu S., Zeng S., Zhu R., Wei G., Dong K. Flow field of supersonic oxygen jet generated by various wear lengths at the Laval nozzle exit. Coatings, 2024. Vol. 14(11). P. 1444.
6. Ya. B. Zel’dovich, Yu. P. Raizer physics of shock waves and high-temperature hydrodynamic phenomena. Dover Publications. 944 p.
7. Isaev S.A., Lysenko D.A. Testing of the fluent package in calculation of supersonic flow in a step channel. Journal of Engineering Physics and Thermophysics, 2004. Vol. 77. P. 857–860.

DETECTING FLAT ROOF DEFECTS WITH MACHINE LEARNING AND DEEP LEARNING TECHNIQUES

Hryhorovych Mykyta

*Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI "Prydniprovsk State
Academy of Civil Engineering and Architecture", Dnipro, Applicant, Ukraine*

Abstract. *In the context of the ongoing war in Ukraine, ensuring the safety and longevity of buildings and infrastructure is paramount. Traditional inspection methods for detecting structural damages—such as cracks, spalling, or corrosion—are labor-intensive, time-consuming, and prone to human error. This study addresses these challenges by leveraging deep learning techniques, particularly for flat roofs. Models including CNNs, U-Net, YOLO, and autoencoders enable efficient defect detection from both visual and thermal data, even in hazardous or hard-to-reach areas. UAVs facilitate rapid image collection, thereby reducing costs and risks associated with manual inspections. Our findings indicate that AI-driven methods can significantly improve inspection accuracy, accelerate maintenance, and ensure early detection of critical damage, crucial for infrastructure safety in conflict-affected zones. Ultimately, integrating deep learning into structural health monitoring offers a robust and automated approach to safeguarding buildings and optimizing maintenance efforts.*

Keywords: *Deep learning, structural monitoring, neural networks, YOLO, CNN, flat roofs*

Introduction. The integrity of a structure is fundamental for its longevity and safety, particularly in critical components like roofs, which are exposed to harsh weather conditions. Detecting defects such as cracks, deformations, or corrosion in flat roofs is vital, as failure to identify these issues early can result in serious consequences. Traditional manual inspection methods, while effective, are time-consuming, costly, and susceptible to human error. Recent advancements in technology, particularly the application of machine learning (ML) and deep learning (DL) techniques, have opened new avenues for automated and efficient damage detection. These techniques, especially convolutional neural networks (CNNs), object detection methods (YOLO), and autoencoders, can analyze large datasets, such as images or sensor data, much faster and more accurately than traditional methods. The objective of this study is to assess the effectiveness of these methods

in detecting flat roof defects, focusing on image analysis and sensor data interpretation for early damage detection.

Research Objective. This research aims to explore how deep learning techniques can be applied to detect structural deformation and damage in construction, with a focus on flat roofs. Specifically, we aim to:

1. Review deep learning models (CNN-based classifiers, U-Net, YOLO, autoencoders) for structural damage detection.
2. Analyze the effectiveness of these methods based on recent studies, focusing on roofs and other structural components.
3. Investigate the data sources and tools involved, such as UAVs, high-resolution cameras, and thermal sensors.
4. Compare the performance of deep learning models across different structural elements and damage types.
5. Examine the real-world applications and challenges of integrating deep learning into maintenance workflows for continuous monitoring and efficient decision-making.

Deep Learning Methods for Structural Damage Detection. *Convolutional Neural Networks (CNNs):* CNNs are widely used for detecting surface defects like cracks in concrete. They can not only classify images but also localize damage areas. For example, ResNet-18 was employed to analyze structural damage in camera footage, improving detection accuracy over traditional methods. *Semantic Segmentation (U-Net):* U-Net is effective for pixel-level crack detection. It can delineate even thin and irregular cracks in concrete. Advanced versions, like VM-UNet++, further improve accuracy by incorporating multi-scale context, making them ideal for complex crack patterns. *Object Detection (YOLO, Faster R-CNN):* YOLO models excel in real-time detection, identifying defects such as exposed rebars and spalling with high precision. These models are fast and suitable for dynamic, on-the-fly inspections, particularly when using UAVs. *Autoencoders and Anomaly Detection:* Autoencoders, a type of unsupervised model, detect anomalies in vibration and thermal data. Trained on healthy structure data, these models can flag deviations that indicate potential damage, even without labeled examples.

Data Sources and Inspection Tools. Effective deep learning-based damage detection relies on high-quality data, often collected via UAVs equipped with RGB cameras, thermal imaging, and other sensors. These technologies enable

comprehensive inspections, especially in hard-to-reach areas like roofs. The fusion of data from different sensors—such as visual images and thermal scans—enhances detection capabilities. For example, UAVs can quickly cover large surfaces, and thermal imaging can reveal hidden subsurface defects, providing a fuller picture of structural health.

Conclusion. Deep learning has proven to be a powerful tool for automating the detection of structural damage in flat roofs, offering high accuracy and efficiency compared to traditional inspection methods. Convolutional neural networks (CNNs), semantic segmentation networks like U-Net, and object detection models such as YOLO have demonstrated effectiveness in detecting various types of damage, including cracks, spalling, and exposed rebars. Additionally, autoencoders offer a promising solution for detecting structural anomalies through vibration or sensor data analysis.

The integration of UAVs, high-resolution cameras, and thermal sensors has made data collection more efficient and accessible. Real-time monitoring systems can now autonomously detect damage, reducing the need for manual inspections and enhancing safety by enabling timely maintenance. While challenges remain in ensuring models generalize across different structures and conditions, the advances in deep learning and data collection tools suggest a future where automated damage detection becomes a standard practice in structural health monitoring.

REFERENCES

1. Jia, J., & Li, Y. (2023). Deep Learning for Structural Health Monitoring: Data, Algorithms, Applications, Challenges, and Trends. *Sensors*, 23(21), 8824.
2. Bai, Y., Sezen, H., & Yilmaz, A. (2021). Detecting Cracks and Spalling Automatically in Extreme Events by End-to-End Deep Learning Frameworks. *ISPRS Annals V-2-2021*, 161–168.
3. Montoya, G. A., et al. (2023). Toward Reliable Post-Disaster Assessment: Advancing Building Damage Detection Using YOLO and Satellite Imagery. *Mathematics*, 13(7), 1041.
- Neto, M. S., et al. (2024). Structural Damage Identification Using Autoencoders: A Comparative Study. *Buildings*, 14(7), 2014.
4. Xu, Y., et al. (2022). Mechanics-Informed Autoencoder Enables Automated Detection and Localization of Damage in Structures. *Nature Communications*.
5. Jin, T., et al. (2023). Deep-Learning- and UAV-Based Structural Crack Detection in Concrete. *Buildings*, 13(12), 3114.

6. Wu, Z., et al. (2025). VM-UNet++ Research on Crack Image Segmentation Based on Improved U-Net. Scientific Reports, 15, 8938.

ВИЯВЛЕННЯ ДЕФЕКТІВ ПЛОСКИХ ПОКРІВЕЛЬ ЗА ДОПОМОГОЮ МЕТОДІВ МАШИННОГО НАВЧАННЯ ТА ГЛИБОКОГО НАВЧАННЯ

Григорович М.С.

Анотація. У контексті поточної війни в Україні забезпечення безпеки та довговічності будівель і інфраструктури є надзвичайно важливим. Традиційні методи інспектування для виявлення структурних пошкоджень—таких як тріщини, відшарування або корозія—вимагають значних людських ресурсів, багато часу та схильні до помилок. У цьому дослідженні розглядається можливість застосування технологій глибокого навчання, особливо для плоских покрівель. Моделі, зокрема CNN, U-Net, YOLO та автоенкодері, дають змогу ефективно виявляти дефекти на основі візуальних і теплових даних, навіть у складних чи важкодоступних умовах. Використання безпілотних літальних апаратів (БПЛА) полегшує швидкий збір зображень і знижує витрати та ризики, пов'язані з ручними перевірками. Результати свідчать, що методи, керовані штучним інтелектом, можуть суттєво підвищити точність перевірок, прискорити технічне обслуговування та забезпечити раннє виявлення критичних пошкоджень, що надзвичайно важливо для безпеки інфраструктури в умовах конфлікту. Інтеграція глибокого навчання в системи моніторингу технічного стану споруд пропонує надійний і автоматизований підхід для захисту будівель і оптимізації зусиль із їх обслуговування.

Ключові слова: глибоке навчання, моніторинг стану будівель, нейронні мережі, YOLO, CNN, плоскі дахи.

РЕАЛІЗАЦІЯ РОЗПОДІЛЕННЯ ПРОЦЕСУ РОБОТИ ГЕНЕТИЧНОГО АЛГОРИТМУ ШЛЯХОМ ВПРОВАДЖЕННЯ КАНАЛІВ ТА ВУЗЛІВ ОБРОБКИ ПОВІДОМЛЕНЬ

Жадан А. А.¹, Шинкаренко В.І.²

¹ Український державний університет науки і технологій, аспірант, Україна

² Український державний університет науки і технологій, д.т.н., професор, Україна

Анотація. Реалізація генетичного алгоритму шляхом використання архітектурного патерну проектування «Pipes and Filters» вирішує два основних завдання — ефективність роботи та легкість модифікації. Перша досягається за рахунок асинхронної комунікації та можливості масштабування окремих фаз додаючи нові вузли обраного типу. Друге забезпечується низьким рівнем зв'язності компонентів системи між собою, а саме вузли повинні знати лише формат і протокол, на основі яких вони повинні формувати повідомлення з результатом своєї роботи. Сучасні мови та середовища програмування надають великий набір інструментів для реалізації систем подібного виду повністю абстрагуючи від взаємодії з ядром операційної системи. Найбільш провідною мовою програмування для реалізації розподілених обчислень є Golang.

Ключові слова: програмне забезпечення, інформаційні технології, генетичний алгоритм, pipes and filters, розподілені обчислення, асинхронне виконання, golang

Класичним представленням генетичного алгоритму є поетапна обробка поточної популяції відповідно до обраного набору фаз. Реалізація такого підходу складається з набору циклічних операторів та функції обробки. Основним недоліком можна відзначити синхронний принцип роботи. Слід відзначити, що загальна складність вищезазначеного алгоритму за нотацією Ландау [1] є лінійною.

Альтернативним підходом є впровадження багатопотоковості в процес з використанням патерну проектування «Pipes and Filters» [2]. На поточний момент існує багато різновидів даного принципу, але для реалізації генетичного алгоритму найбільш відповідним є «Dump Pipes and Smart Endpoints» [3]. Його основа полягає у тому, що канали пересилання даних відповідають лише за пересилку. Вузли обробки даних виконують всю логіку роботи одного з визначених етапів загального процесу, що відповідає основним принципам реалізації генетичного алгоритму (рис. 1).

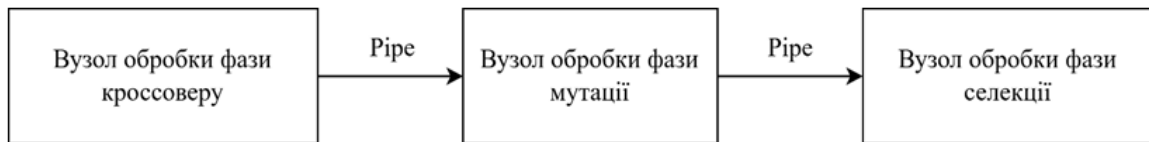


Рисунок 1 — Загальна схема реалізації алгоритму

Класичними елементами програмних реалізацій підходу «Pipes and Filters» на рівні локального середовища є багатопотоковість чи багатопроцесність. В даному випадку кожен вузол обробки виконується на основі окремого об'єкта ядра. У якості загального алгоритму взаємодії зі об'єктами даних є алгоритм вирішення задачі Постачальника-Споживача [4].

Основною проблемою багатопотокової реалізації є відсутності можливості до масштабування без зовнішнього керуючого компонента. В такому випадку найпростішим рішенням є визначення пікової кількості необхідних потоків обробки та їх запуск на початку роботи додатку (рис. 2). Основними недоліками є нераціональне використання ресурсів середовища та можливе зменшення продуктивності роботи при неочікуваних сплесках трафіку даних у системі.

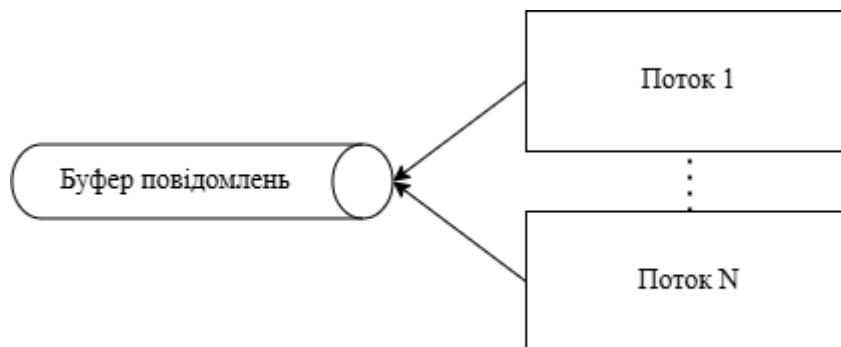


Рисунок 2 — Багатопотоковий підхід

Рішенням зазначених проблем є впровадження компонентів-менеджерів трафіку [5]. Їх основним завданням можуть бути не тільки розподілення навантаження між існуючими потоками обробки, а й запуск нових при недостатності обчислювальних можливостей. Або ж навпаки, зменшувати їх загальну кількість при недостатньому рівні трафіка або в визначені години низької інтенсивності (рис. 3).

У випадку багатопроцесності, окремий процес може повністю покривати функціональність вузла обробки, відповідаючи як за обробку даних, так і за процес масштабування. Слід зазначити, що реалізація даного підходу може відрізнятися базуючись на API обраної операційної системи ЕОМ.

З розвиненням технологій спрямованих на оптимізацію виконання програмних додатків все більше набували популярності рішення для розгалуження процесів обчислення, які надають самі середовища виконання, більшість з яких також підтримує ThreadPool [6]. Для оптимізації кількості використаних потоків, застосовується принцип асинхронного виконання задач [7].



Рисунок 3 — Багатопотоковий підхід з компонентом керування

Найбільш доцільною в питаннях інструментів для паралельних обчислень є мова програмування Golang. У додаток до вище зазначених компонентів вона також надає можливість використовувати канали повідомлень, реалізованих на рівні платформи. Кожен канал представляє собою чергу, яка може використовуватися для пересилання даних між асинхронними задачами. Слід зазначити, що виходячи з типу ітерації, а саме чи є вона найпершою, чи ні, перший вузол в ланцюжку обробки різний. При початку процесу, перший вузол повинен генерувати набір хромосом на основі заданих параметрів. В інших випадках, отриманий набір даних повинен бути лише перетворений відповідно до специфікації формату наступника (рис. 4). Для подальшого збільшення ефективності роботи можливе масштабування окремих елементів алгоритму на архітектурному рівні [8].

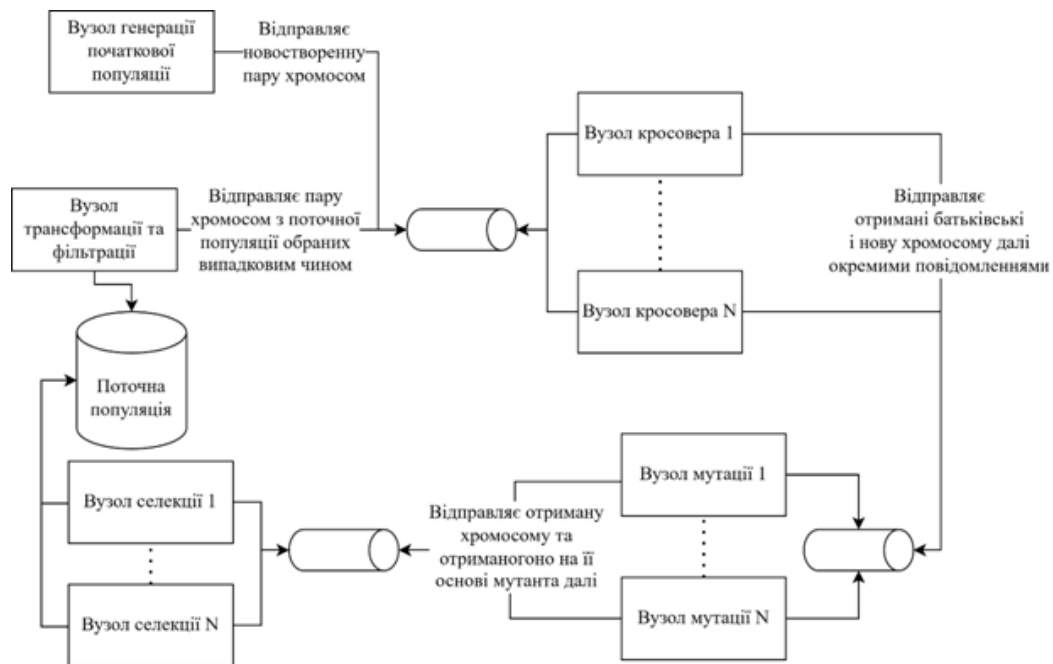


Рисунок 4 — Реалізація генетичного алгоритму інструментами мови Golang

В результаті даної роботи була спроектований та реалізований програмний модуль, який асинхронно виконує генетичний алгоритм на основі асинхронної комунікації між групами вузлів, кожна з яких відповідає за окрему фазу загального процесу. Пересилання даних між вузлами виконується за допомогою буферизованих черг повідомлень.

ЛІТЕРАТУРА

1. Cormen T. H.; Leiserson C. E.; Rivest R. L. Growth of Functions. Introduction to Algorithms 1990, pp. 23–41.
2. “Pipes and Filters pattern”. Microsoft documentation website. <https://learn.microsoft.com/en-us/azure/architecture/patterns/pipes-and-filters> (accessed Mar 30, 2025).
3. “Smart endpoints and dumb pipes” AWS official documentation website. <https://docs.aws.amazon.com/whitepapers/latest/running-containerized-microservices/smart-endpoints-and-dumb-pipes.html> (accessed Mar 30, 2025).
4. Abhishek Sai A. M., Reddy D., Raghavendra P., Kiran G. Y., Rejeenth V. R. Producer-Consumer problem using Thread pool. 3rd International Conference for Emerging Technology – 2022, pp. 1- 5.
5. Islam M. S., Rouff M. A., Threads Scheduling and Load Balancing with Loop Iteration in Multicore Processors: a Case Study with OpenMP. 3rd International Conference on Sustainable Technologies for Industry 4.0 – 2021, pp. 1-6.
6. “The CLR’s Thread Pool”. Microsoft documentation website. <https://learn.microsoft.com/en-us/archive/msdn-magazine/2003/june/net-column-the-clr-s-thread-pool> (accessed Mar 30, 2025).

7. “Asynchronous programming scenarios”. Microsoft documentation website. <https://learn.microsoft.com/en-us/dotnet/csharp/asynchronous-programming/async-scenarios> (accessed Mar 30, 2025).
8. Shynkarenko V. I., Zhadan A. A., “Multiservice architecture of software for stochastic fractal time series forecasting” 2024 IEEE 19th International Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT), Zbarazh, Ukraine, в друкy.

IMPLEMENTING DISTRIBUTED GENETIC ALGORITHM WORKFLOW WITH CHANNELS AND MESSAGE PROCESSING NODES

Artem Zhadan, Viktor Shynkarenko

Abstract. *The implementation of the genetic algorithm using the architectural design pattern "Pipes and Filters" solves two main problems – efficiency and ease of modification. The first is achieved due to asynchronous communication and the ability to scale individual phases by adding new nodes of the selected type. The second is ensured by a low level of connectivity of the system components among themselves, namely, the nodes should know only the format and protocol, based on which they should form messages with the results of their work. Modern languages and programming environments provide a large set of tools for implementing systems of this type, completely abstracting from interaction with the operating system kernel. The most leading programming language for implementing distributed computing is Golang.*

Keywords: *software engineering, information technologies, genetic algorithm, pipes and filters, distributed computing, asynchronous execution, golang.*

REFERENCE

1. Cormen T. H.; Leiserson C. E.; Rivest R. L. Growth of Functions. Introduction to Algorithms 1990, pp. 23–41.
2. “Pipes and Filters pattern”. Microsoft documentation website. <https://learn.microsoft.com/en-us/azure/architecture/patterns/pipes-and-filters> (accessed Mar 30, 2025).
3. “Smart endpoints and dumb pipes” AWS official documentation website. <https://docs.aws.amazon.com/whitepapers/latest/running-containerized-microservices/smart-endpoints-and-dumb-pipes.html> (accessed Mar 30, 2025).
4. Abhishek Sai A. M., Reddy D., Raghavendra P., Kiran G. Y., Rejeenth V. R. Producer-Consumer problem using Thread pool. 3rd International Conference for Emerging Technology – 2022, pp. 1- 5.
5. Islam M. S., Rouff M. A., Threads Scheduling and Load Balancing with Loop Iteration in Multicore Processors: a Case Study with OpenMP. 3rd International Conference on Sustainable Technologies for Industry 4.0 – 2021, pp. 1-6.
6. “The CLR's Thread Pool”. Microsoft documentation website. <https://learn.microsoft.com/en-us/archive/msdn-magazine/2003/june/net-column-the-clr-s-thread-pool> (accessed Mar 30, 2025).
7. “Asynchronous programming scenarios”. Microsoft documentation website. <https://learn.microsoft.com/en-us/dotnet/csharp/asynchronous-programming/async-scenarios> (accessed Mar 30, 2025).
8. Shynkarenko V. I., Zhadan A. A., “Multiservice architecture of software for stochastic fractal time series forecasting” 2024 IEEE 19th International Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT), Zbarazh, Ukraine, in publishing.

USING DLP TO OPTIMIZE COMPUTER MODELS IN SCADA SYSTEMS

Zhulkovskyi O.O.¹, Zhulkovska I.I.², Vokhmianin H.Ya.³

¹ *Dniprovsky State Technical University, PhD, Associate Professor, Ukraine*

² *University of Customs and Finance, PhD, Associate Professor, Ukraine*

³ *Dniprovsky State Technical University, Master Student of the Department of Software Systems, Ukraine*

Abstract. *This paper presents a study on the efficiency of applying data-level parallelism using SIMD technology to optimize computer models within SCADA systems. The focus is on implementing computational algorithms based on explicit and implicit finite difference schemes, which are widely used in industrial process modeling. Experimental research demonstrates improved computational performance achieved through the use of modern SIMD instructions, primarily AVX-256, enabling real-time data processing for complex simulation models in industrial control systems. It was found that explicit finite difference schemes exhibit better suitability for vectorization compared to implicit schemes implemented using the Thomas algorithm. The practical significance of the results lies in enhancing the efficiency of SCADA systems through the optimal utilization of modern CPU capabilities, offering tangible benefits for industrial enterprises adopting this technology.*

Keywords: *Industry 4.0, SCADA, SIMD, parallel computing, finite difference schemes, vectorization, AVX-256.*

Modern SCADA systems (Supervisory Control and Data Acquisition) are key components of the digital transformation in manufacturing, providing real-time data acquisition, analysis, and control of technological processes [1]. With the evolution of the Industry 4.0 paradigm and the integration of artificial intelligence elements into industrial systems, the need for high-performance computational algorithms has become critical. The requirement to process large volumes of data and perform complex computations in real time imposes stringent demands on the performance of algorithms used in these systems. Among such algorithms are computationally intensive tasks of numerical modeling, implemented through finite difference schemes for solving partial differential equations, particularly in problems related to heat transfer, hydrodynamics, and electromagnetism. Therefore, the development of efficient optimization algorithms, including the implementation of parallel computing [2, 3], for both types of schemes is a highly relevant issue.

DLP (Data-Level Parallelism) technology using SIMD (Single Instruction Multiple Data) provides a mechanism for performing the same operation on multiple data elements simultaneously [4-6]. Modern processors support advanced SIMD instruction sets such as AVX, AVX-256 (AVX2), and AVX-512 [7]. These allow simultaneous processing of 4, 8, 16, or more floating-point operands in single and double precision, respectively. However, the effective use of these technologies for finite difference schemes requires the development of specialized algorithms that take into account the specifics of computational patterns and data access structures [8].

As part of the study, a methodology was developed for optimizing numerical modeling algorithms in SCADA systems using SIMD. The software implementation was carried out in C++ with the use of the `<immintrin.h>` library, which provides access to SIMD instructions. As a result, scalar algorithms were implemented for both the explicit and implicit schemes, along with their vectorized counterparts utilizing double and float data types. In the implicit scheme algorithm, the solution of the SLAE (system of linear algebraic equations) was performed using the TDMA (Tridiagonal Matrix Algorithm).

Experimental verification of the developed algorithms was conducted using heat transfer models commonly employed in SCADA systems for monitoring and controlling industrial processes. The testing was performed on a modern Intel processor with support for AVX-256 SIMD instruction sets.

The experimental results demonstrate a speedup in computations when using optimized SIMD algorithms compared to traditional sequential implementations. The highest speedup (up to 1.89 times) is achieved for explicit schemes using single-precision floating-point data types with a high resolution of the computational grid ($>10^3$). Optimization of the implicit scheme algorithm shows a speedup of up to 1.41 times, which is a significant result considering the complexity of vectorizing it due to its sequential nature and the presence of recurrent dependencies. Overall, explicit finite difference schemes exhibit better suitability for vectorization compared to implicit schemes implemented using TDMA.

Conclusions. The conducted research confirms the potential of SIMD technology for optimizing algorithms in SCADA systems. The use of data-level parallelism allows improving the performance of solving problems with explicit and implicit finite difference schemes by approximately 1.4–1.9 times.

Promising directions for future research include the use of other SIMD instructions, particularly AVX-512, the development of hybrid algorithms that combine SIMD with other parallel computing technologies such as multithreading and GPU computing (CUDA), as well as adapting the developed methods to the specific requirements of various industries. Special attention will be given to optimizing machine learning algorithms, which are increasingly integrated into SCADA systems for process forecasting and optimization.

REFERENCE

1. Fraccaroli E., Padovani A. M., Quaglia D., Fummi F. Network Synthesis for Industry 4.0. Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition (DATE). – 2020. P. 1692 – 1697.
2. Hennessy J. L., Patterson D. A. A new golden age for computer architecture. Communications of the ACM. – 2019. №2(62). P. 48 – 60.
3. Zhulkovskiy O., Zhulkovska I., Kurliak P., Sadovoi A., Ulianovska Yu., Vokhmianin H. Using asynchronous programming to improve computer simulation performance in energy systems. Energetika. – 2025. №1(71). P. 23 – 33.
4. Zheng R., Pai S. Efficient execution of graph algorithms on CPU with SIMD extensions. IEEE Access. – 2021. P. 262 – 276.
5. Zhulkovskiy O. O., Zhulkovska I. I., Vokhmianin H. Ya., Firsov O. D., Riabovolenko V. A. Research of progressive tools of parallel computations with the use of SIMD architecture. Informatics and Mathematical Methods in Simulation. – 2023. №3-4(13). P. 228 – 235.
6. Zhulkovskiy O., Zhulkovska I., Vokhmianin H., Firsov A., Tykhonenko I. Application of SIMD-instructions to increase the efficiency of numerical methods for solving SLAE. Computer Systems and Information Technologies. – 2024. №4. P. 126 – 133.
7. Intel® Intrinsics Guide.
URL: <https://www.intel.com/content/www/us/en/docs/intrinsics-guide/index.html> (date of access: 05.04.2025).
8. Vuță-Popescu D., Antofi I. C., Ciobanu C. B., Kertész C. Z. SIMD extensions - a historical perspective. IEEE Access. – 2024. P. 108 – 115.

ВИКОРИСТАННЯ DLP ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ КОМП'ЮТЕРНИХ МОДЕЛЕЙ У SCADA-СИСТЕМАХ

Жульковський О.О., Жульковська І.І., Вохмянін Г.Я.

Анотація. В роботі представлено дослідження ефективності застосування технології паралелізму на рівні даних SIMD для оптимізації комп'ютерних моделей у SCADA-системах на прикладі реалізації обчислювальних алгоритмів за явними та неявними кінцево-різницеvими схемами, які широко застосовуються в моделюванні промислових процесів. Експериментальні дослідження демонструють підвищення обчислювальної продуктивності завдяки використанню сучасних SIMD-інструкцій, передусім AVX-256, дозволяючи реалізувати обробку даних у реальному часі для складних симуляційних моделей в промислових системах керування. Встановлено, що явні кінцево-різницеvі схеми демонструють кращу придатність до векторизації порівняно з неявними схемами, реалізованими з використанням методу прогонки. Практична значимість результатів полягає в підвищенні ефективності SCADA-систем через оптимальне використання можливостей сучасних процесорів, що надає переваги для промислових підприємств, які впроваджують цю технологію.

Ключові слова: Індустрія 4.0, SCADA, SIMD, паралельні обчислення, кінцево-різницеvі схеми, векторизація, AVX-256.

ЛІТЕРАТУРА

1. Fraccaroli E., Padovani A. M., Quaglia D., Fummi F. Network Synthesis for Industry 4.0. Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition (DATE). – 2020. С. 1692 – 1697.
2. Hennessy J. L., Patterson D. A. A new golden age for computer architecture. Communications of the ACM. – 2019. №2(62). С. 48 – 60.
3. Zhulkovskyi O., Zhulkovska I., Kurliak P., Sadovoi A., Ulianovska Yu., Vokhmianin H. Using asynchronous programming to improve computer simulation performance in energy systems. Energetika. – 2025. №1(71). С. 23 – 33.
4. Zheng R., Pai S. Efficient execution of graph algorithms on CPU with SIMD extensions. IEEE Access. – 2021. С. 262 – 276.
5. Zhulkovskyi O. O., Zhulkovska I. I., Vokhmianin H. Ya., Firsov O. D., Riabovolenko V. A. Research of progressive tools of parallel computations with the use of SIMD architecture. Informatics and Mathematical Methods in Simulation. – 2023. №3-4(13). С. 228 – 235.
6. Zhulkovskyi O., Zhulkovska I., Vokhmianin H., Firsov A., Tykhonenko I. Application of SIMD-instructions to increase the efficiency of numerical methods for solving SLAE. Computer Systems and Information Technologies. – 2024. №4. С. 126 – 133.
7. Intel® Intrinsics Guide.
URL: <https://www.intel.com/content/www/us/en/docs/intrinsics-guide/index.html> (дата звернення: 05.04.2025).
8. Vuță-Popescu D., Antofi I. C., Ciobanu C. B., Kertész C. Z. SIMD extensions - a historical perspective. IEEE Access. – 2024. С. 108 – 115.

СУЧАСНІ ТЕНДЕНЦІЇ ТА ПРОБЛЕМИ НАЛАГОДЖЕННЯ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НА БАЗІ ВЕЛИКИХ МОВНИХ МОДЕЛЕЙ

Завгородній А.Д.¹, Іванов О.П.²

¹Український державний університет науки і технологій, аспірант, Україна

²Український державний університет науки і технологій, к.т.н., доцент, Україна

Анотація. У доповіді представлено результати досліджень застосування великих мовних моделей (англ. LLM) у сфері налагодження програмного забезпечення. Розглянуто сучасний стан досліджень у цій галузі, включаючи як перспективні напрямки, так і існуючі проблеми, які обмежують широке практичне застосування такого застосування моделей. Проаналізовано різні підходи використання ВММ у процесі налагодження. Обґрунтовано, що ефективне використання ВММ для налагодження вимагає комплексного підходу, який враховує як розвиток самих моделей, так і підвищення кваліфікації розробників для забезпечення продуктивної взаємодії між людиною та штучним інтелектом. Робота спрямована на визначення оптимальних шляхів застосування ВММ у сфері налагодження програмного забезпечення, з урахуванням поточних технологічних можливостей та потреб розробників.

Ключові слова: великі мовні моделі (скороч. LLM), налагодження програмного забезпечення, автоматизоване налагодження, інтерактивні помічники, середовища розробки, взаємодія людина-ШІ, обмеження великих мовних моделей, розробники програмного забезпечення.

На сьогоднішній день великі мовні моделі (далі скорочено ВММ) набули значної популярності в різноманітних сферах застосування, демонструючи підвищення ефективності при їх використанні [1, 15]. Зокрема, потужний поштовх отримала індустрія програмної інженерії. Моделі від таких компаній, як OpenAI (ChatGPT, та особливо Codex у співпраці з GitHub), Google (Gemini, PaLM 2), Anthropic (Claude), демонструють значний потенціал у генерації коду, процесах налагодження та рефакторингу, спрощуючи та полегшуючи трудомісткі процеси [1, 5, 15].

Основною темою даної доповіді є результати досліджень саме у сфері застосування ВММ у процесах налагодження програм: основні напрямки та підходи, а також проблеми та обмеження застосування ВММ.

Застосування ВММ для вирішення задач генерації коду продемонстрували певні можливості та потенціал у вирішенні синтаксичних помилок, що в свою чергу спровокувало ряд досліджень і експериментів щодо ширшого застосування ВММ у контексті налагодження [5]. Однак невдовзі було засвідчено певні проблеми такого застосування, зумовлені відсутністю глибокого розуміння контекстів (зокрема серед перших версій моделей) та обмеженими знаннями використаними для навчання моделей [2, 4, 5]. Ранні ВММ часто демонстрували обмежену здатність до складного логічного розмірковування та розуміння специфічних бібліотек або фреймворків, що використовувалися в реальних проєктах [2, 6]. Крім того, моделі могли генерувати правдоподібні, але невірні виправлення через галюцинації або використання застарілих знань, що становило значний ризик для процесу налагодження. Ці обмеження в контексті та знаннях безпосередньо впливали на ефективність ВММ при роботі зі складним, реальним кодом, що часто залежить від специфічних технологій та включає багатoshарову логіку [5].

Для того аби подолати та покращити ефективність застосування ВММ для задач налагодження виникли певні підходи [7, 8, 9, 10]. Однак, дані напрацювання, які хоч і демонструють певні покращення ефективності процесу, все ж досі мають низку критичних проблем зумовлених обмеженнями цих моделей, які потребують вирішення та покращення.

Однією з критичних проблем є обмеження розміру вхідного параметру моделі, відомого як контекстне вікно, яке з легкістю порушується розмірами репозиторіїв, якими є більшість сучасних реальних проєктів, з якими працюють розробники [11, 17]. Хоча деякі новіші моделі, такі як ChatGPT4, Gemini 1.5 та 2, мають значно більші контекстні вікна, ефективність обробки інформації в межах дуже великого контексту активно досліджується [3, 11, 17]. Для того аби подолати проблему обмеженого контекстного вікна застосовуються розбиття проєкту на менші логічні одиниці для спрощення роботи [12], проте таке застосування потребує обережного проектування нових індексованих структур щоб знизити ризик втрати повноти розуміння як контексту програми так і зав'язків модулів та файлів програми.

Іншою критичною проблемою є «нова помилка», природу якої модель раніше не бачила або якої не зустрічалась в наборі даних для навчання ВММ [5, 15, 18]. Дана проблема може виникнути в реальних проєктах, коли використовуються нові фреймворки, мови програмування або навіть при застосуванні вже відомих технологій але в унікальних комбінаціях [6, 19]. Хоча ВММ може виконати поверхневий аналіз та намагатиметься вирішити проблему використовуючи певні шаблони та знайомі зв'язки, до яких можна звести нову помилку, зазвичай цього може бути недостатньо аби виконати ефективний аналіз, визначити дефект та запропонувати доречні зміни. Для вирішення цієї проблеми досліджуються підходи, що дозволяють ВММ отримувати доступ до зовнішніх знань, наприклад, через бази знань [14] або шляхом взаємодії з розробником для отримання додаткової інформації [13, 15, 16].

Враховуючи наведені вище проблеми зокрема перспективним є напрямок досліджень, відмінний від повного автоматичного виконання налагодження, спрямований на використання ВММ в парі з експертом-розробником [15, 16]. Даний напрямок отримав розвиток на базі розробок інтегрованих у середовища розробки агентів-помічників, які надають розробникам змогу інтерактивно та покроково виконувати налагодження, також надаючи змогу вести діалоги відносно тієї чи іншої ділянки коду чи отриманої під час виконання програми [16]. Як вже згадувалось у роботі, ВММ, досі є недосконалими, зокрема через недостатність знань відносно тієї чи іншої технології, мови програмування, а також відсутністю глибокого розуміння контексту. Водночас, синергія між розробником та ВММ може зменшити ці проблеми, але за умови експертизи розробника [19]. Як показують дослідження і звіти, загалом при роботі з ВММ, в середньому показники ефективності роботи покращуються, серед досвідчених працівників так і серед новачків, пришвидшуючи їх навчання [19]. Однак є й низка недоліків. В першу чергу, це необхідність додаткових верифікацій, особливо серед початківців, адже при навчанні через недостачу знань або експертизи студенти можуть використовувати частково вірні запропоновані ВММ рішення надто довіряючи

їм, що зокрема відбувається доволі часто [19]. Іншою ж проблемою є поміч у роботі із складними логічними завданням, яка все ж досі залишається несуттєвою (зазвичай це пов'язано із згаданою вже обмеженістю контекстного розуміння моделями) [19] та потребує ретельного припрацювання експертом шляхом надання додаткової інформації про контекст власноруч.

Висновки. Звертаючи увагу на наведені в даній роботі аспекти, маємо, що застосування ВММ для автоматичного налагодження залишається обмеженим та потребує суттєвих покращень через низку причин: обмеження контекстного вікна ВММ (неможливість працювати з великими, реальними проектами) – потребує додаткового розбиття та індексації, невідомі помилки (неможливість ефективно визначити дефект та запропонувати його виправлення) - потребує розвитку інтеграції окремих баз знань та просунутих стратегій пошуку. Також одним із вагомих факторів є власне обмеження моделей, однак вже сьогодні можна покращити процеси налагодження за рахунок інтеграцій ВММ у середовища розробки у вигляді інтерактивних агентів-помічників, які мають працювати в парі з розробником-експертом. Даний факт в свою чергу засвідчує необхідність не тільки розробляти і покращувати можливості ВММ, а й навчати та розвивати навички налагодження у студентів, для ефективної кооперації агентів та розробників.

ЛІТЕРАТУРА / REFERENCES

1. A survey on large language models for software engineering / Q. Zhang et al. arXiv.org. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2312.15223> (дата звернення: 27.03.2025).
2. Large language models for software engineering: survey and open problems / A. Fan et al. 2023 IEEE/ACM international conference on software engineering: future of software engineering (icse-fose), Melbourne, Australia, 14–20 May 2023. 2023. URL: <https://doi.org/10.1109/icse-fose59343.2023.00008> (дата звернення: 25.03.2025).
3. A comprehensive survey of ai-driven advancements and techniques in automated program repair and code generation / A. Anand et al. arXiv.org e-Print archive. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2411.07586> (дата звернення: 25.03.2025).
4. Zhang Y. Chain of Agents: large language models collaborating on long-context tasks. Google Research - Explore Our Latest Research in Science and AI. URL: <https://research.google/blog/chain-of-agents-large-language-models-collaborating-on-long-context-tasks/> (дата звернення: 25.03.2025).

5. A deep dive into large language model code generation mistakes: what and why? / Q. Chen et al. arXiv.org. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2411.01414> (дата звернення: 26.03.2025).
6. LLMs love python: a study of llms' bias for programming languages and libraries / L. Twist et al. arXiv.org e-Print archive. URL: <https://arxiv.org/html/2503.17181v1#S6> (дата звернення: 27.03.2025).
7. Teaching large language models to self-debug / X. Chen et al. arXiv.org. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2304.05128> (дата звернення: 26.03.2025).
8. Training LLMs to better self-debug and explain code / N. Jiang et al. Amazon Science. URL: <https://www.amazon.science/publications/training-llms-to-better-self-debug-and-explain-code> (дата звернення: 26.03.2025).
9. Zhong L., Wang Z., Shang J. Debug like a human: a large language model debugger via verifying runtime execution step by step. Findings of the association for computational linguistics ACL 2024, Bangkok, Thailand and virtual meeting. Stroudsburg, PA, USA, 2024. P. 851–870. URL: <https://doi.org/10.18653/v1/2024.findings-acl.49> (дата звернення: 26.03.2025).
10. InferFix: End-to-End Program Repair with LLMs / M. Jin et al. ESEC/FSE '23: 31st ACM joint european software engineering conference and symposium on the foundations of software engineering, San Francisco CA USA. New York, NY, USA, 2023. URL: <https://doi.org/10.1145/3611643.3613892> (дата звернення: 26.03.2025).
11. Extending context window of large language models via semantic compression / W. Fei et al. Findings of the association for computational linguistics ACL 2024, Bangkok, Thailand and virtual meeting. Stroudsburg, PA, USA, 2024. P. 5169–5181. URL: <https://doi.org/10.18653/v1/2024.findings-acl.306> (дата звернення: 26.03.2025).
12. Shiraishi M., Shinagawa T. Context-aware code segmentation for c-to-rust translation using large language models. arXiv.org e-Print archive. URL: <https://arxiv.org/html/2409.10506v1#S8> (дата звернення: 26.03.2025).
13. Enhancing the code debugging ability of llms via communicative agent based data refinement / W. Yang et al. arXiv.org e-Print archive. URL: <https://arxiv.org/html/2408.05006v1> (дата звернення: 27.03.2025).
14. KBLaM: knowledge base augmented language model / X. Wang et al. arXiv.org. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2410.10450> (дата звернення: 27.03.2025).
15. Haque M. A. LLMs: a game-changer for software engineers?. arXiv.org. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2411.00932> (дата звернення: 27.03.2025).
16. CodeAgent: enhancing code generation with tool-integrated agent systems for real-world repo-level coding challenges / K. Zhang et al. Proceedings of the 62nd annual meeting of the association for computational linguistics (volume 1: long papers), Bangkok, Thailand. Stroudsburg, PA, USA, 2024. P. 13643–13658. URL: <https://doi.org/10.18653/v1/2024.acl-long.737> (дата звернення: 27.03.2025).
17. Alibaba lingmaagent: improving automated issue resolution via comprehensive repository exploration / Y. Ma et al. arXiv.org. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2406.01422> (дата звернення: 27.03.2025).

18. Tarassow A. The potential of LLMs for coding with low-resource and domain-specific programming languages. arXiv.org. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2307.13018> (дата звернення: 27.03.2025).
19. Human-AI experience in integrated development environments: a systematic literature review / A. Sergeyuk та ін. arXiv.org e-Print archive. URL: <https://arxiv.org/html/2503.06195v1#S5> (дата звернення: 01.04.2025).

MODERN TRENDS AND CHALLENGES IN DEBUGGING SOFTWARE BASED ON LARGE LANGUAGE MODELS

Andrii Zavorodnii, Oleksandr Ivanov

Abstract. *This report presents the results of research on the application of large language models (LLMs) in the field of software debugging. The current state of research in this area is examined, including both promising directions and existing problems that limit the widespread practical application of such model usage. Various approaches to using LLMs in the debugging process are analyzed. Particular attention is paid to the integration of LLMs into development environments as interactive assistants that work in close collaboration with the developer. It is argued that the effective use of LLMs for debugging requires a comprehensive approach that considers both the development of the models themselves and the improvement of developers' skills to ensure productive human-AI interaction. The work aims to identify optimal ways of applying LLMs in the field of software debugging, considering current technological capabilities and the needs of developers.*

Keywords: *Large Language Models (LLMs), software debugging, automated debugging, interactive assistants, development environments, human-AI interaction, LLM limitations, software developers.*

ШТУЧНИЙ ІНТЕЛЕКТ В ІМІТАЦІЙНОМУ МОДЕЛЮВАННІ СИСТЕМ

Зінов'єва О.Г.

*Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного,
Україна*

Анотація. Імітаційне моделювання є важливим інструментом в різних наукових та інженерних галузях, дозволяючи представляти складні системи та процеси без обмежень фізичного експерименту. Традиційні методи моделювання часто виявляються недостатньо ефективними для аналізу та прогнозування таких систем. Ці інструменти значно еволюціонували з інтеграцією штучного інтелекту (ШІ), який пропонує розширені можливості в основних аспектах імітаційного моделювання, таких як оптимізація, аналіз даних, верифікація та валідація. Застосування ШІ, зокрема машинного навчання та агентного моделювання з елементами інтелекту, дозволяє автоматизувати окремі етапи моделювання, підвищити точність прогнозів та отримати глибше розуміння динаміки досліджуваних систем. У статті розглядаються переваги використання ШІ для генерації сценаріїв, калібрування моделей, оптимізації параметрів та аналізу результатів імітації. Обговорюються перспективи подальшого розвитку інтеграції ШІ в імітаційні моделі.

Ключові слова: штучний інтелект, імітаційне моделювання, машинне навчання, агентне моделювання, оптимізація, аналіз даних

Вступ. Сучасні системи стають все більш складними, що потребує нових методів їх аналізу та прогнозування. Імітаційне моделювання дозволяє створювати моделі реальних процесів, вивчати їх поведінку в різних умовах та передбачати можливі сценарії розвитку. Однак традиційні методи моделювання часто потребують значних обчислювальних ресурсів та не завжди забезпечують достатню точність. Однією з головних проблем є складність та багатомірність систем, які моделюються. Реальні системи часто мають багато взаємодіючих елементів, їх повний опис є складним. Крім того, велика кількість даних може викликати складнощі при їх обробці та аналізі, особливо коли мова йде про задачі з високим рівнем невизначеності. Це потребує пошуку більш ефективних методів моделювання, які зможуть покращити процес прийняття рішень та знизити витрати часу та ресурсів [1].

В цьому контексті ШІ пропонує нові перспективи. Використання машинного навчання, алгоритмів оптимізації та інших AI-технологій дає можливість збільшувати точність та швидкість імітаційного моделювання, а також відкриває нові перспективи для аналізу та прогнозування.

Метою даної роботи є дослідження сучасних підходів до інтеграції штучного інтелекту та імітаційного моделювання, аналіз основних переваг такої інтеграції.

Основний матеріал. Імітаційне моделювання – це метод дослідження систем шляхом побудови моделей, які імітують поведінку систем у реальному часі або в умовах, близьких до реальних. Імітаційне моделювання дозволяє моделювати як дискретно-подієві системи, так і безперервні або гібридні процеси.

Часто поняття «імітація» спрощується до побудови моделей, які відповідають на гіпотетичні питання типу «Що буде, якщо...?». Однак, досягнення у галузі штучного інтелекту значно розширили можливості моделювання. ШІ вніс нові методи, що базуються на логічних висновках, міркуваннях, алгоритмах пошуку інформації та способах представлення знань. Це дозволило створити досконаліші моделі, здатні відповідати на питання, що виходять за межі простих сценаріїв. Такий підхід, який використовує знання, накопичені в ШІ, називається «імітацією на основі знань».

На відміну від традиційних методів імітаційного моделювання, які в основному фокусуються на поведінковому моделюванні та прогнозуванні, «імітація на основі знань» використовує складніші механізми ШІ, для аналізу та виведення інформації, дозволяючи отримати більш глибокі та якісні результати.

Інтеграція штучного інтелекту в імітаційне моделювання може здійснюватися різними способами:

- 1) Машинне навчання для калібрування та валідації моделей. Алгоритми машинного навчання можуть бути використані для автоматичного налаштування параметрів імітаційної моделі на основі історичних даних або даних реальної системи. Це дозволяє підвищити точність моделі та зменшити залежність від ручного налаштування. Крім того, методи машинного навчання дозволяють перевірити

адекватність імітаційних моделей шляхом порівняння їх вихідних даних з реальними показниками та оцінити рівень відповідності і коректності моделювання [2].

2) Агентне моделювання з інтелектуальними агентами. Хоча агентне моделювання не завжди відноситься до ШІ в класичному розумінні, воно часто використовує методи ШІ для моделювання поведінки агентів у системі. У багатокомпонентних системах агенти можуть приймати рішення на основі алгоритмів навчання з підкріпленням, що дозволяє моделювати складну поведінку індивідуальних елементів системи.

3) ШІ для аналізу вихідних даних імітаційних експериментів. Методи машинного навчання, а саме кластеризація, класифікація та асоціативні правила, можуть бути використані для аналізу великих обсягів даних, отриманих в результаті імітаційних експериментів. Це дозволяє виявляти приховані закономірності, визначати основні фактори впливу та отримувати глибше розуміння поведінки досліджуваної системи.

4) Використання нейронних мереж для побудови мета-моделей. Нейронні мережі можуть бути навчені на результатах імітаційних експериментів для створення мета-моделей, які апроксимують поведінку складної імітаційної моделі. Мета-моделі можуть бути використані для швидкого прогнозування результатів за різних вхідних параметрах без необхідності повторного запуску ресурсоємної імітаційної моделі.

Процес створення та застосування моделей штучного інтелекту для прогнозування критичних ситуацій, наприклад, в інженерних системах, є багатоступеневим алгоритмом, що вимагає ретельного аналізу та валідації. Початковим етапом є побудова моделей машинного навчання, які встановлюють зв'язки між різними факторами та критичними реакціями системи. Це, власне, навчання моделі на історичних даних. У цьому контексті фактори можуть являти собою будь-які вхідні параметри системи. Вибір відповідних моделей машинного навчання залежить від специфіки задачі. Це може бути регресійний аналіз для прогнозування безперервних величин, класифікація для визначення категорій подій (наприклад, «нормальна робота» або «аварійна ситуація»), або нейронні мережі для вирішення складніших завдань із нелінійними залежностями. Важливо правильно визначити та підготувати дані для навчання. Дані мають бути релевантними, досить об'ємними і, особливо важливо, якісними, тобто без істотних викидів та помилок.

Наступним кроком є визначення змінних, які будуть використовуватися в моделі. Це вимагає глибокого розуміння самої системи та її поведінки. Після того, як змінні обрані, проводиться аналіз їх передбачуваності. Якщо залежності між змінними досить стабільні та піддаються кількісному опису

можна переходити до навчання моделі. Процес навчання моделі включає підбір оптимальних параметрів моделі, валідацію на незалежному наборі даних і тестування, щоб оцінити точність і надійність прогнозів. на заключному етапі навчена модель інтегрується із системою імітаційного моделювання. Це дозволяє використовувати модель ШІ для проведення віртуальних експериментів, що імітують різні сценарії роботи системи та оцінки ефективності запропонованих рішень. Такий підхід дозволяє своєчасно виявляти потенційні проблеми та розробляти ефективні стратегії запобігання критичним ситуаціям. Таким чином, результатом всього процесу стає інструмент, здатний прогнозувати ризики та допомагати у прийнятті оптимальних рішень.

Одним з найбільш значущих прикладів застосування ШІ в імітаційному моделюванні – це проект AlphaFold, який передбачає структуру білків з високою точністю. Компанії, такі як Google та NVIDIA розробляють моделі ШІ для збільшення точності прогнозів погоди. Машинне навчання дозволяє аналізувати великі масиви кліматичних даних та прогнозувати екстремальні погодні умови.

Висновки. Використання штучного інтелекту в імітаційному моделюванні відкриває нові можливості для вивчення складних систем та керування ними. Реальні проекти підтверджують ефективність такого підходу, дозволяючи прискорювати розрахунки, підвищувати точність прогнозів та адаптувати моделі до мінливих умов. В майбутньому очікується подальший розвиток інтеграції ШІ та імітаційного моделювання, що приведе до появи ще більш потужних інструментів для аналізу складних систем.

ЛІТЕРАТУРА

1. Zeigler, B., Muzy, A., Yilmaz, L. Artificial Intelligence in Modeling and Simulation. In: Meyers, R. (eds) *Encyclopedia of Complexity and Systems Science*. Springer, New York, 2009. S. 344 – 368.
2. Томашевський В.М. Моделювання систем. Київ: Видавнича група BHV. 2005. 352 с.

ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN SYSTEMS SIMULATION

Olha Zinovieva

Abstract. *Simulation modeling is an important tool in various scientific and engineering fields, allowing to represent complex systems and processes without the limitations of physical experiment. Traditional modeling methods often prove to be insufficiently effective for the analysis and prediction of such systems. These tools have evolved significantly with the integration of artificial intelligence (AI), which offers enhanced capabilities in the main aspects of simulation modeling, such as optimization, data analysis, verification and validation. The application of AI, in particular machine learning and agent modeling with elements of intelligence, allows to automate individual stages of modeling, increase the accuracy of predictions and gain a deeper understanding of the dynamics of the studied systems. The article considers the advantages of using AI for scenario generation, model calibration, parameter optimization and analysis of simulation results. The prospects for further development of AI integration into simulation models are discussed.*

Keywords: *artificial intelligence, simulation modeling, machine learning, agent modeling, optimization, data analysis.*

REFERENCE

1. Zeigler, B., Muzy, A., Yilmaz, L. Artificial Intelligence in Modeling and Simulation. In: Meyers, R. (eds) *Encyclopedia of Complexity and Systems Science*. Springer, New York, 2009. S. 344 – 368. [in English]
2. Tomashevskyi V.M Modeliuvannia system. Vydavnycha hrupa BHV. 2005. S. 352. [in Ukrainian].

**ДО ПИТАННЯ ПОБУДОВИ ГІБРИДНИХ РОЗРАХУНКОВИХ СІТОК ДЛЯ
ЧИСЕЛЬНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ТУРБУЛЕНТНИХ ТЕЧІЙ У ПРОТОЧНІЙ
ЧАСТИНІ РАДІАЛЬНИХ ВЕНТИЛЯТОРІВ**

Зінченко А.В.¹, Редчиць Д.О.²,

¹Інститут транспортних систем і технологій НАН України, к.ф.-м.н., ст..н.с.,
Україна

²Інститут транспортних систем і технологій НАН України д.ф.-м.н., ст..н.с.,
Україна

Анотація. Проведено аналіз підходів до побудови розрахункових сіток для чисельного моделювання турбулентних течій в областях складної геометрії за наявності рухомих зон. Розглянуто переваги та недоліки підходів з використанням багатоблокових рухомих сіток, а також наближення “замороженого ротора”. Обґрунтовано доцільність використання наближення “замороженого ротора” для моделювання течій у проточній частині радіальних вентиляторів. Розроблено метод оптимізації пересічних областей багатоблокових сіток. Виконано генерацію гібридної багатоблокової розрахункової сітки для проточної частини радіального вентилятора, придатної для використання підходу “замороженого ротора”, та наведено її структуру. Проведені в подальшому розрахунки турбулентної течії на базі комплексу сгенерованих багатоблокових сіток показали високу якість отриманих чисельних результатів та задовільне співпадіння з відомими результатами експериментів.

Ключові слова: чисельне моделювання, рівняння Нав'є-Стокса, розрахункові сітки, радіальні вентилятори, багатоблокові гібридні сітки.

Розвиток промисловості висуває все нові вимоги до турбомашин та вентиляторів: підвищення їх ефективності, зменшення габаритних розмірів, маси, створення нових компоновальних схем. Комп'ютерне моделювання турбулентних течій на базі чисельного розв'язку рівнянь Нав'є-Стокса є найкращим сучасним інструментом дослідження переваг та недоліків конструкцій радіальних вентиляторів та забезпечення їх високого коефіцієнту корисної дії та продуктивності при заданих масово-габаритних розмірах. Вибір типу розрахункової сітки та її параметрів є визначальним фактором, що впливає на відповідність отриманого розв'язку реальним фізичним процесам, які відбуваються у фізичній області (рис. 1).

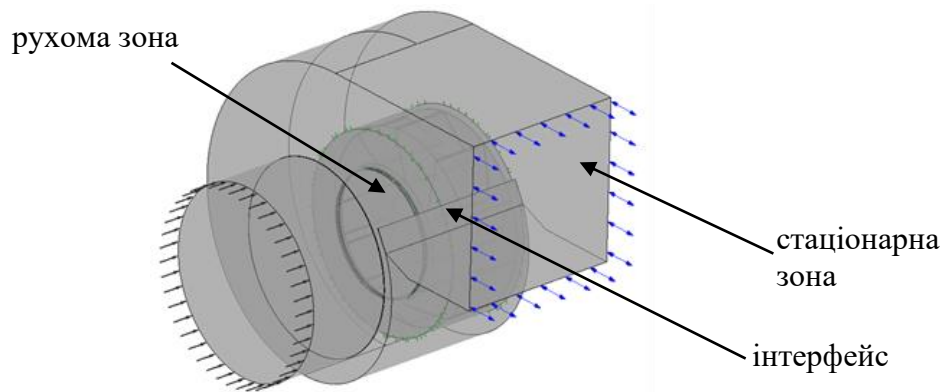


Рисунок 1 – Схема проточної частини вентилятора та зони розрахункової області

Для задач моделювання течій у проточних частинах радіальних вентиляторів, головний інтерес представляє обтікання рухомих частин таких як обертові лопаті та робочі колеса вентиляторів. У більшості випадків рухомі частини роблять задачу нестационарною, якщо розглядати її зі стаціонарної системи відліку. Однак при рухомій системі відліку потік навколо рухомої частини можна, з певними обмеженнями, моделювати як стаціонарну задачу відносно рухомої системи координат.

Загальноприйнятним є використання рухомих сіток [1], коли узгодження параметрів змінних на межі рухомих та стаціонарних зон в зоні інтерфейсу (рис. 1) відбувається на кожному кроці за часом шляхом переінтерполяції. Таким чином вдається звести задачу, яка є нестационарною у нерухомій, інерціальній системі відліку, до стаціонарної відносно рухомої системи координат.

В той же час для розрахунків на усталення, більш ефективним в обчислювальному плані є так званий підхід “замороженого ротора” [2]. Це стаціонарне наближення, в якому окремим зонам розрахункової сітки можуть бути призначені різні обертальні та поступальні швидкості. Течія в кожній рухомій зоні розв'язується з використанням рівнянь рухомої системи відліку. Якщо зона стаціонарна, рівняння зводяться до стаціонарних форм. На інтерфейсах між зонами сітки також виконується переінтерполяція змінних. Даний підхід не враховує відносний рух рухомої зони по відношенню до суміжних зон, які можуть бути рухомими або нерухомими. Сітка залишається фіксованою для обчислення. Це аналогічно заморожуванню руху рухомої

частини в певному положенні і спостереження за миттєвим полем потоку у цьому положенні.

Хоча підхід “замороженого ротора” явно є наближенням, він є прийнятним припущенням для багатьох задач. Його можна використовувати для турбомашин в яких взаємодія ротор-статор є відносно не вносить серйозних збурень у потік, а структура течії поблизу інтерфейсу між зонами є відносно не складною. Іншим потенційним використанням моделі “замороженого ротора” є обчислення поля течії, яке буде використовуватися як початкове наближення для розрахунку перехідної рухомої сітки.

Для течії в проточній зоні радіального вентилятора можна визначити рухому систему відліку, яка охоплює робоче колесо та потік, що його оточує, і використати нерухому сітку для області поза робочим колесом (рис. 1).

Потік на виході з робочого колеса, що є інтерфейсною зоною, вважається стаціонарним. Абсолютні значення швидкостей на інтерфейсній межі повинні бути однаковими для рухомої та нерухомої сітки. На межі між двома підобластями дифузія та інші члени в рівняннях переносу потребують відповідних значень швидкостей взятих із суміжної підобласті. Чисельний алгоритм повинен забезпечувати постійність абсолютної швидкості в зоні інтерфейсу, щоб отримати коректні значення сусідніх швидкостей для відповідної підобласті.

Виходячи з аналізу переваг і недоліків різних типів сіток було зроблено вибір на користь багатоблокових гібридних сіток [3], що складаються з декількох структурованих та неструктурованих підобластей. Області з неструктурованою сіткою були побудовані навколо твердих стінок, а решта розрахункової області заповнювалась структурованою сіткою. Такий підхід дозволив виробити єдину методологію розрахунків течій в'язкого суцільного середовища навколо тіл складної геометричної форми.

Для подальших розрахунків в даному дослідженні була побудована багатоблокова гібридна сітка з загальною кількістю $2 \cdot 10^6$ вузлів. Сітка представлена на рис. 2-4. Вона має суттєві згущення поблизу твердих стінок для забезпечення кращої деталізації ефектів у примежовому шарі.

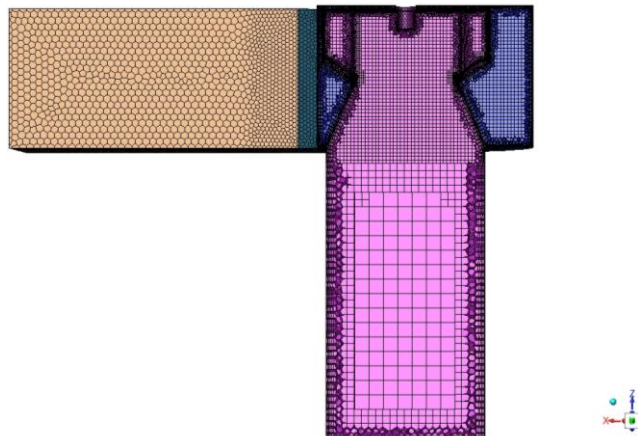


Рисунок 2 – Візуалізація тривимірної розрахункової сітки у горизонтальному перерізі

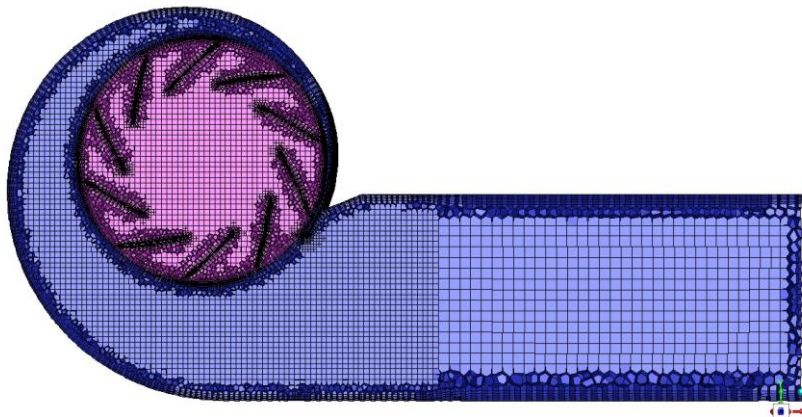


Рисунок 3 – Візуалізація тривимірної розрахункової сітки у фронтальному перерізі

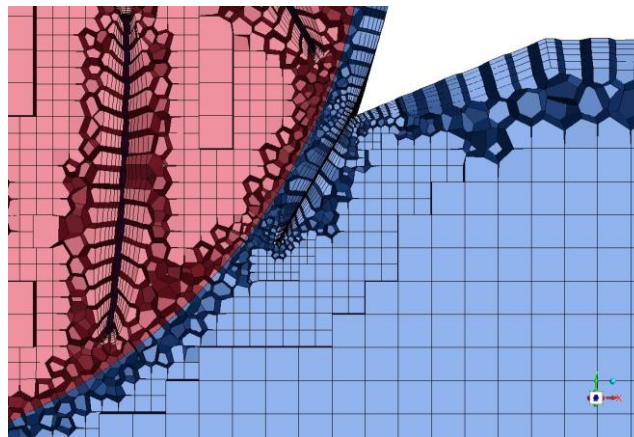


Рисунок 4 – Візуалізація тривимірної розрахункової сітки у зоні язика улітки вентилятора

Заключним кроком в отриманні якісного розв'язку для пересічних областей повинна бути оптимізація багатоблокових сіток. В областях перетинань окремих блоків залишаються лише комірки з мінімальною площею. Ця процедура виконується після формування блоків, коли стають відомі всі донорні та приймаючі вузли розрахункових сіток. Метод оптимізації

пересічних областей засновано на тому, що вузли докладної сітки залишаються як частина обчислювальної області, у той час як для вузлів грубої сітки застосовується інтерполяція з вузлів докладної сітки.

Розроблений в рамках даного дослідження алгоритм оптимізації пересічних областей має високу надійність і виконується в повністю автоматичному режимі.

Висновки. Базовано на підході “замороженого ротора” виконано генерацію гібридної багатоблокової розрахункової сітки для проточної частини радіального вентилятора. Проведені в подальшому розрахунки турбулентної течії на базі сгенерованої сітки [4] показали високу якість отриманих чисельних результатів та задовільне співпадіння з відомими експериментальними результатами.

ЛІТЕРАТУРА

1. Snyder D., Koutsavdis E., Anttonen J. Transonic store separation using unstructured CFD with dynamic meshing. Technical Report AIAA-2003-3913. 33rd AIAA Fluid Dynamics Conference and Exhibit American Institute of Aeronautics and Astronautics. – 2003.
2. Luo J., Issa R., Gosman A. Prediction of Impeller-Induced Flows in Mixing Vessels Using Multiple Frames of Reference. In IChemE Symposium Series 136. – 1994. – P. 549–556.
3. Chung T. J. Computational Fluid Dynamics, 2nd ed. New York City, USA: Cambridge University Press. – 2009. – 1058 p.
4. Zinchenko A., Arsenyuk M., Gorna O. On the question of performance analysis and design options for centrifugal fan impellers. Computer Hydromechanics: Materials of VIII International Conference, Kyiv: IHM of NAS of Ukraine, 2022. - p. 126.

ON DEVELOPMENT OF HYBRID COMPUTATIONAL MESHES FOR NUMERICAL SIMULATION OF TURBULENT FLOWS IN THE FLOW PART OF CENTRIFUGAL FANS

Andrii Zinchenko, Dmytro Redchyts

Abstract. *An analysis of approaches to the development of computational meshes for the simulation of turbulent flows in areas of complex geometry with moving zones is performed. The pros and cons of multiblock moving grids and the “frozen rotor” approaches are considered. The efficiency of using the “frozen rotor” approach for simulating flows in the flowing part of centrifugal fans is discussed. A method for optimizing the overlapping regions of multiblock meshes is developed. A hybrid multiblock computational grid for the flow part of a centrifugal fan suitable for using the*

frozen rotor approach is generated. The details of its structure are presented. The subsequent simulations of the turbulent flows based on the complex of generated multiblock meshes showed high quality of the obtained numerical results and sufficient consistency with the known experimental data.

Keywords: *numerical simulation, Navier-Stokes equations, computational meshes, centrifugal fans. multiblock hybrid meshes.*

REFERENCES

1. Snyder D., Koutsavdis E., Anttonen J. Transonic store separation using unstructured CFD with dynamic meshing. Technical Report AIAA-2003-3913. 33rd AIAA Fluid Dynamics Conference and Exhibit American Institute of Aeronautics and Astronautics. – 2003.
2. Luo J., Issa R., Gosman A. Prediction of Impeller-Induced Flows in Mixing Vessels Using Multiple Frames of Reference. In IChemE Symposium Series 136. – 1994. – P. 549–556.
3. Chung T. J. Computational Fluid Dynamics, 2nd ed. New York City, USA: Cambridge University Press. – 2009. – 1058 p.
4. Zinchenko A., Arsenyuk M., Gorna O. On the question of performance analysis and design options for centrifugal fan impellers. Computer Hydromechanics: Materials of VIII International Conference, Kyiv: IHM of NAS of Ukraine, 2022. - p. 126.

LONG SHORT-TERM MEMORY MODEL WITH THE EXTERNAL TREND AND INTERNAL COMPONENTS ANALYSIS

O. Inkin, V. Belozyorov

¹*Oles Honchar Dnipro National University, postgraduate student, Ukraine*

²*Oles Honchar Dnipro National University, Doctor of Physical and Mathematical
Sciences, Professor, Ukraine*

Abstract. *This paper presents a modification of a recurrent neural network with long-term and short-term memory for modeling electroencephalogram signals and highlights its potential in predicting pathological conditions. The demonstrated interpretation includes a method for decomposing the external trend and internal components that most characteristically determine the parameters of the input signal. The obtained segmented data, after pre-processing by this method, are further processed by a neural network, which is trained on them with more efficient calibration. As a result, the trained network can reproduce the data on which it was trained and predict the further trend of brain activity. The results show the potential of this approach for both basic neuroscience research and clinical applications in the diagnosis and modeling of neuropathologies.*

Keywords: *EEG, LSTM, ETICA, neural network, modeling, trend decomposition.*

The development of automated electroencephalogram (EEG) analysis systems has become essential for timely medical decision-making, particularly when managing brain-related pathologies where rapid assessment can significantly impact patient outcomes. Medical professionals require sophisticated tools that can provide initial analysis and guidance regarding illness severity or the potential approach of critical periods. Within the complex patterns of EEG signals, the ability to predict future developments holds tremendous clinical value for intervention planning. Recent computational advances have positioned neural signal prediction as a primary focus in cutting-edge research, with recurrent neural networks (RNNs) demonstrating remarkable effectiveness across multiple domains. Long short-term memory (LSTM) networks, an advanced RNN variant, have proven particularly valuable by addressing the vanishing gradient problem through the implementation of memory cells in place of standard hidden layer units, thereby enhancing predictive capabilities [1, 2, 3]. Predictive accuracy can be further enhanced through hybrid or ensemble modeling approaches. Despite these technological advances,

certain EEG time series remain challenging to analyze due to their inherent instability and chaotic nature. The External Trend and Internal Components Analysis (ETICA) decomposition method effectively addresses this limitation by systematically dividing highly fluctuating data into more manageable lower-frequency components, creating a robust foundation for subsequent analysis and prediction tasks [4, 5, 6].

The integration of LSTM networks with outer-trend decomposition and inner-component analysis presents a sophisticated framework for modeling EEG signals that addresses the inherent problems of non-stationarity and complex temporal dependencies in neural data. This methodological approach begins with a thorough preprocessing of EEG signals using bandpass filtering, artifact removal, and segmentation, followed by an ETICA decomposition step that separates the signal into physiologically relevant components - outer trends that capture low-frequency drift, rhythmic components that correspond to neural oscillations in different frequency bands, and transient components that represent event-related potentials. These decomposed elements serve as the basis for further parameter extraction, from which statistical, frequency, and connectivity characteristics are extracted and normalized before being fed into an architecturally optimized LSTM network designed with multiple recurrent layers, carefully calibrated regularization dropouts, and output layers. The network's ventilation mechanism, consisting of forgetting gates, entry gates, and exit gates, allows it to selectively retain relevant historical information while discarding noise, thus modeling both short-term and long-term dependencies characterizing cognitive processes, seizure dynamics, sleep architecture, and various neurological states (Fig. 1).

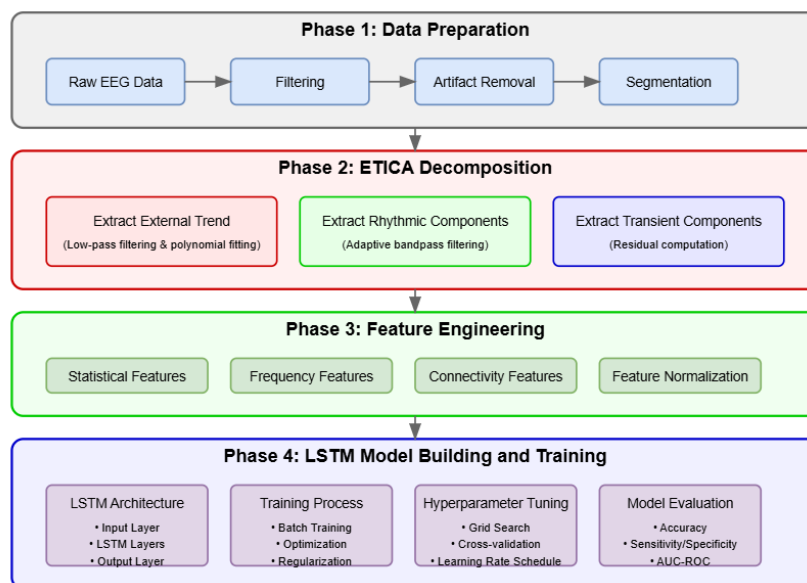


Figure 1 – Architecture LSTM-ETICA model

This synergistic combination demonstrates high performance in creating an interface between the brain and the computer and has the potential to be further adapted to detect abnormal EEG patterns. To demonstrate the results of processing with the described tool, a MATLAB script was developed and some EEG signals with abnormal areas were simulated (Fig. 2).

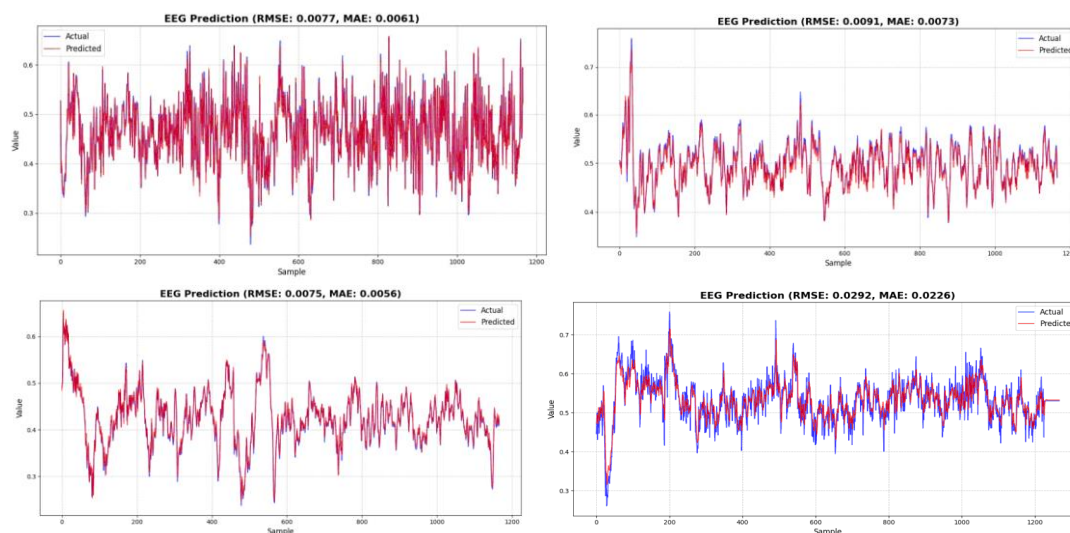


Figure 2 – Result of modeling EEG signals

As a result, the model demonstrated 95% matching accuracy and high data processing performance. However, the forecasting did not yield such encouraging results, but some of the main trends persist (Fig. 3).

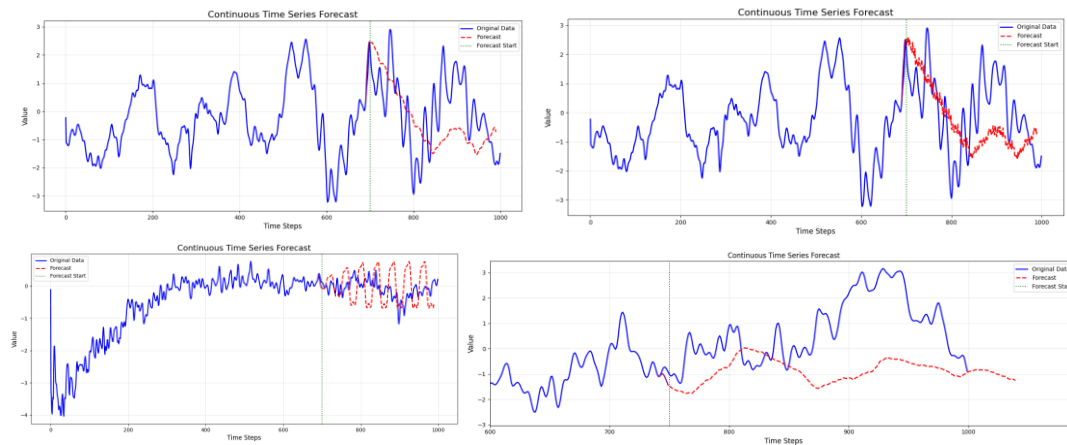


Figure 3 – Result of forecasting EEG signals

Conclusion. The proposed model, which is described in detail in the previous section, is a unique hybrid method that combines LSTM and ETICA decomposition. The ETICA method is first used to decompose the time series into internal components and external trends, which are then predicted separately by the LSTM model. The accuracy of the model's forecast is evaluated using the RMSE and MAE metrics to compare the predicted values with the initial values. In most of the experiments conducted, the average RMSE ranged from 0.007-0.009, and the MAE from 0.005-0.0075. These results indicate that ETICA-ISTM is well suited for EEG modeling and prediction, as it minimizes both the root mean square error and the mean absolute error, providing more accurate and consistent prediction.

REFERENCE

1. Najafi, T., Jaafar, R., Remli, R., Zaidi, W. A. W., & Chellappan, K. (2022). A Computational Model to Determine Membrane Ionic Conductance Using Electroencephalography in Epilepsy. *Physical Sciences Forum*, 5(1), 45. <https://doi.org/10.3390/psf2022005045>.
2. Inkin O.A., Pogorelov O.V. (2024). OA, I., & OV, P. (2024). Modeliuvannia EEG za dopomohoiu hlybokykh neironnykh merezh [Modeling of EEG using deep neural networks]. *System Technologies*, 3(152), 57–68. <https://doi.org/10.34185/1562-9945-3-152-2024-06> [in Ukrainian].
3. Basak, M., Maiti, D., & Das, D. (2024). EEG Innovations in Neurological Disorder Diagnostics: A Five-Year Review. *Asian Journal of Research in Computer Science*, 17(6), 226–249. <https://doi.org/10.9734/ajrcos/2024/v17i6470>.
4. Dioubi, F., Hundera, N. W., Xu, H., & Zhu, X. (2024). Enhancing stock market predictions via hybrid external trend and internal components analysis and long short term memory model. *Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences*, 102252. <https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2024.102252>

5. Monesi, M. J., Accou, B., Montoya-Martínez, J., Francart, T., Van hamme, H. (2020). An LSTM Based Architecture to Relate Speech Stimulus to EEG. arXiv: Audio and Speech Processing. <https://arxiv.org/abs/2002.10988>
6. Hecker, L., Maschke, M., Rupprecht, R., Tebartz van Elst, L., & Kornmeier, J. (2023). Evaluation of Long-Short Term Memory Networks for M/EEG Source Imaging with Simulated and Real EEG Data. bioRxiv. <https://doi.org/10.1101/2022.04.13.488148>

МОДЕЛЬ ДОВГОСТРОКОВОЇ КОРОТКОСТРОКОВОЇ ПАМ'ЯТІ З ВРАХУВАННЯМ ЗОВНІШНЬОГО ТЕНДЕНЦІЙНОГО ТА ВНУТРІШНЬОГО КОМПОНЕНТНОГО АНАЛІЗУ

Інкін О. А., Білозьоров В. Є.

Анотація: У даній роботі представлено модифікацію рекурентної нейронної мережі з довгостроковою та короткостроковою пам'яттю для моделювання сигналів електроенцефалограми та виділено її потенціал в прогнозуванні патологічних станів. Продемонстрована інтерпретація включає метод декомпозиції зовнішнього тренду та внутрішніх компонент, які найбільш характерно визначають параметри вхідного сигналу. Отримані сегментовані дані після попередньої обробки зазначеним методом в подальшому обробляються нейронною мережею, яка на них навчається з більш ефективним калібруванням. В результаті, навчена мережа може відтворювати дані, на яких вона була навчалась та спрогнозувати подальшу тенденцію мозкової активності. Отримані результати свідчать про потенціал цього підходу як для фундаментальних нейронаукових досліджень, так і для клінічного застосування в діагностиці та моделюванні нейропатологій.

Ключові слова: EEG, LSTM, ETICA, нейронна мережа, моделювання, декомпозиція тренду.

ЛІТЕРАТУРА

1. Najafi, T., Jaafar, R., Remli, R., Zaidi, W. A. W., & Chellappan, K. (2022). A Computational Model to Determine Membrane Ionic Conductance Using Electroencephalography in Epilepsy. Physical Sciences Forum, 5(1), 45. <https://doi.org/10.3390/psf2022005045>.
2. Інкін О.А., Погорелов О.В. (2024). Моделювання EEG за допомогою глибоких нейронних мереж. Системні технології, 3(152), 57–68. <https://doi.org/10.34185/1562-9945-3-152-2024-06>.
3. Basak, M., Maiti, D., & Das, D. (2024). EEG Innovations in Neurological Disorder Diagnostics: A Five-Year Review. Asian Journal of Research in Computer Science, 17(6), 226–249. <https://doi.org/10.9734/ajrcos/2024/v17i6470>.
4. Dioubi, F., Hundera, N. W., Xu, H., & Zhu, X. (2024). Enhancing stock market predictions via hybrid external trend and internal components analysis and long short term

memory model. Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences, 102252. <https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2024.102252>

5. Monesi, M. J., Accou, B., Montoya-Martínez, J., Francart, T., Van hamme, H. (2020). An LSTM Based Architecture to Relate Speech Stimulus to EEG. arXiv: Audio and Speech Processing. <https://arxiv.org/abs/2002.10988>

6. Hecker, L., Maschke, M., Rupprecht, R., Tebartz van Elst, L., & Kornmeier, J. (2023). Evaluation of Long-Short Term Memory Networks for M/EEG Source Imaging with Simulated and Real EEG Data. bioRxiv. <https://doi.org/10.1101/2022.04.13.488148>

ОНТОЛОГІЇ НА ОСНОВІ АНОТОВАНИХ ТЕКСТІВ

Карповський Д.О¹., Шинкаренко В.І².

¹УДУНТ, аспірант, Україна

²УДУНТ, д.т.н., професор, Україна

Анотація. У роботі аналізуються методи анотування текстів, які застосовуються для роботи з онтологіями. Анотування допомагає структурувати інформацію та спрощує її аналіз. Розглядаються два основні підходи: ручне та автоматичне анотування. Ручне анотування є точнішим, оскільки враховує контекст та специфіку мови, але є трудомістким і вимагає значних ресурсів. Автоматичне анотування є більш швидким, набагато швидше піддається масштабуванню, проте може допускати помилки через обмежене розуміння контексту та малий об'єм початкової бази знань. Окремо висвітлюються інструменти і технології для анотування, зокрема програмне забезпечення, що автоматизує цей процес. Визначено проблеми, пов'язані з підвищенням точності автоматичних систем та інтеграцією різних методів аналізу даних. Анотація текстів має важливе значення для розвитку онтологій, автоматичного перекладу та аналізу даних, що сприяє покращенню технологій у цих сферах. На основі анотованих текстів створюється онтологія, яка є основою для подальших досліджень за темою. За допомогою неї вирішується проблема неповноти інформації в тексті, а також виявлення та виправлення протиріч та невідповідностей.

Ключові слова. анотування текстів, онтології, природна мова, автоматичне анотування, обробка текстових даних, інформаційні системи.

Анотування текстів є ключовим етапом у процесі обробки природної мови, яке має велике значення для створення ефективних онтологій. Онтології використовуються для структурування знань у різних сферах, таких як медицина, фінанси, біологія та багато інших, де важливо зберігати точність та узгодженість даних. Вони дозволяють створювати точні моделі для автоматичної обробки інформації, а також виявляти та виправляти суперечливі або неповністю покриті сценарії. Анотації є важливим інструментом для організації текстових даних, що дозволяє покращити їх подальший аналіз, класифікацію та інтеграцію в автоматизовані системи. У роботі розглядаються основні методи анотування текстів, їхні переваги та недоліки, а також роль анотацій у побудові онтологій. Зокрема, ми

досліджуємо, як різні типи анотування можуть допомогти у покращенні точності та ефективності обробки текстових даних для подальшого виявлення й виправлення недоліків у процесах автоматичного аналізу [1].

Методами анотування тексту є «ручне анотування» та «автоматичне анотування».

Ручне анотування – це класичний метод, який полягає у залученні вузьконаправлених фахівців для додавання міток до текстів. Це може включати маркування сутностей (таких як певні об'єкти, місця, дати), а також вказування на відношення між сутностями, лексичні характеристики або навіть мовні синтаксичні структури. Зазвичай цей метод застосовується в дослідженнях, де необхідна висока точність анотацій.[2]

Автоматичне анотування здійснюється за допомогою алгоритмів машинного навчання і методів обробки природної мови (NLP). В цьому випадку використовуються попередньо навчені моделі для автоматичного виділення сутностей, класифікації тексту та виявлення відносин між елементами.

Ручне анотування краще обирати, якщо результати анотування мають бути високоточними, адже фахівці можуть врахувати всі особливості контексту, специфіку мови та граматичні особливості. Також його треба застосовувати в тому випадку, якщо отриману анотацію необхідно адаптувати до специфічних вимог тексту або завдання. Перевагою ручного анотування також є те, що для досягнення високої якості результатів не треба попередньо навчати моделі на великому обсязі попередньо анотованих даних. [3].

Автоматичне анотування є гарним кандидатом для обрання, якщо необхідно обробляти великі обсяги даних за короткий час, також його можна успішно застосовувати до великих наборів даних.

Типи анотування тексту можна поділити на «анотування сутностей», «зіставлення сутностей», «класифікація тексту», «анотування емоційного настрою». [4]

Анотування сутностей – тип анотування, який фокусується на виявленні та розпізнаванні важливих елементів у тексті, таких як імена, дати, місця чи

спеціалізовані терміни. Розпізнавання іменованих сутностей (NER) є важливим інструментом в аналізі тексту, зокрема в застосуваннях, таких як пошукові системи та чат-боти.

Зіставлення сутностей – після того як сутності були виділені, наступним кроком є їх зіставлення з відповідними даними в інших базах знань. Це дозволяє уточнити значення та контекст сутностей, наприклад, з'ясувати, чи йдеться про людину чи організацію під певним іменем.

Класифікація тексту – завдання передбачає анотування текстових фрагментів певною категорією або міткою. Наприклад, класифікація документів або текстів за темою чи емоційним настроєм. Таке анотування важливе в контексті автоматизації процесів пошуку та сортування інформації.

Анотування емоційного настрою – тип анотування займається визначенням емоцій або думок, виражених у тексті. Аналіз емоційного настрою є важливим для розуміння споживчої поведінки, соціальних медіа та інших областей, де потрібно інтерпретувати емоції, висловлені в текстах [5].

Онтології відіграють важливу роль у структуризації знань та забезпеченні їх семантичною обробкою. Анотовані тексти стають основою для створення або вдосконалення онтологій, що дозволяє значно підвищити точність автоматичного аналізу текстів [6].

Онтології допомагають:

- покращити точність аналізу: дозволяють правильно інтерпретувати анотовані дані, покращуючи результати обробки тексту;
- забезпечити інтеграцію даних: дозволяють об'єднувати дані з різних джерел та форматів, полегшуючи їх аналіз та опрацювання;
- спрощують пошук та класифікацію: завдяки структурованій організації знань, онтології полегшують пошук та класифікацію інформації у великих масивах даних.

Анотування текстів для подальшої обробки онтологій є складним завданням, що вимагає вирішення кількох проблем [7]:

- автоматизація процесу анотування: зменшення потреби в людському втручанні при збереженні високої точності;
- виявлення протиріч та неповноти документу: аналіз документу на предмет протилежних за змістом тверджень, а також не повних сценаріїв;
- обробка багатомовних текстів: необхідність створення моделей, які ефективно працюють з текстами на різних мовах;

- інтеграція анотованих даних з іншими системами: забезпечення сумісності між різними типами даних та онтологіями.

Перспективи розвитку теми включають покращення технологій машинного навчання, застосування глибоких нейронних мереж для анотування та інтеграцію цих технологій в практичні додатки [8].

Висновок. Анотування текстів є важливою складовою частиною обробки природної мови та побудови онтологій. Ручне та автоматичне анотування мають свої переваги та обмеження, але в сукупності вони дозволяють створювати точніші, більш ефективні моделі для подальшої автоматичної обробки даних. Обрання методу анотування текстів залежить від задачі та наявних ресурсів (людських, часових, матеріальних). Залучення онтологій для структурування анотованої інформації відкриває нові можливості для розвитку технологій в багатьох сферах, таких як аналіз даних, автоматичний переклад та штучний інтелект. Використання анотування та онтологій даватиме можливість виявляти протиріччя в одному початковому текстовому файлі, а також знаходити неповну інформацію, тобто ту частину певного описуваного об'єкту яка не є описаною.

ЛІТЕРАТУРА

1. Дмитраш О., Романюк А., Тимошук П. Анотування текстів для здійснення автоматичного розпізнавання іменованих сутностей. Вісник Національного університету «Львівська політехніка» – 2013. №751. С. 395–402.
2. Бісікало О.В., Назаров І.О. Огляд методів автоматичного анотування текстів. Праці ВНТУ – 2023, № 2, С. 17–21.
3. Белоіваненко М.В. Модель інтеграції семантичної анотації математичної залежності в онтологічні бази знань. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies – 2012. №2(56). С. 54–57.
4. Литвин В., Мушаста С. Метод побудови ембедінгів ознак у задач глибинного навчання на основі онтологій. Вісник Національного університету «Львівська політехніка» - 2023. №13. С. 189–197.
5. Gruninger M., Fox M. Methodology for the Design and Evaluation of Ontologies. Proceedings of IJCAI-95 Workshop on Basic Ontological Issues in Knowledge Sharing – 1995. P. 10–17.
6. Munira K., Anjum M.S, The use of ontologies for effective knowledge modelling and information retrieval. Applied Computing and Informatics – 2018. №14(2). P. 116–126.
7. Карповський Д.О., Шинкаренко В. І., Перспективи рефакторингу онтологій. Information Technologies in Metallurgy and Machine building–ITMM – 2024. С. 257–259.

8. Kuropiatnyk, O., Shynkarenko, V., Zhuchyi, L. and Lyakhova, M. Geometric Fractals' Constructive-Synthesizing Models using Ontological Means. CEUR Workshop Proceeding – 2024., P. 419-431.

USING ONTOLOGIES IN TEXTS ANNOTATION

Dmytro Karpovskyi, Viktor Shynkarenko

Abstract. *The work analyzes the text annotation methods used to work with ontologies. Annotation helps to structure information and simplifies its analysis. Two main approaches are considered: manual and automatic annotation. Manual annotation is more accurate, as it considers the context and language specifics, but is laborious and requires significant resources. Automatic annotation is faster, scales much faster, but can be prone to errors due to limited understanding of the context and a small amount of initial knowledge base. Tools and technologies for annotation are separately highlighted, software that automates this process. Problems associated with increasing the accuracy of automatic systems and integrating various data analysis methods are identified. Text annotation is important for the development of ontologies, automatic translation, and data analysis, which contributes to the improvement of technologies in these areas. Ontology helps solve the problem of incomplete information in the text, as well as identify and correct contradictions and inconsistencies.*

Keywords: *text annotation, ontologies, natural language, automatic annotation, text data processing, information systems.*

REFERENCE

1. Dmytrash O., Romaniuk A., Tymoshchuk P. Annotation of texts for automatic recognition of named entities. Visnyk of Lviv Polytechnic National University - 2013. №751. P. 395–402. [in Ukrainian]
2. Bisikalo O.V., Nazarov I.A. Review of methods of automatic annotation of texts. Works of VNTU - 2023, №2, P. 17–21. [in Ukrainian]
3. Beloivanenko M.V. Model of integration of semantic annotation of mathematical dependence into ontological knowledge bases. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies – 2012. №2(56). P. 54-57. [in Ukrainian]
4. Lytvyn V., Mushasta S. Method of constructing feature embeddings in deep learning problems based on ontologies. Visnyk of Lviv Polytechnic National University - 2023. №13. P. 189-197. [in Ukrainian]
5. Gruninger M., Fox M. Methodology for the Design and Evaluation of Ontologies. Proceedings of IJCAI-95 Workshop on Basic Ontological Issues in Knowledge Sharing – 1995. P. 10–17.
6. Munira K., Anjum M.S, The use of ontologies for effective knowledge modelling and information retrieval. Applied Computing and Informatics – 2018. №14(2). P. 116–126.
7. Karpovskyi D.O., Shynkarenko V.I., Prospects for refactoring ontologies. Information Technologies in Metallurgy and Machine building–ITMM – 2024. P. 257-259. [in Ukrainian]
8. Kuropiatnyk, O., Shynkarenko, V., Zhuchyi, L. and Lyakhova, M. Geometric Fractals' Constructive-Synthesizing Models using Ontological Means. CEUR Workshop Proceeding – 2024., P. 419-431.

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ ПРОЦЕСУ ІНЖЕКТУВАННЯ СУМІШІ РЕАГЕНТІВ

Кисляков В.Г.^{1,2}, Єлісєєв В.І.¹, Петруша В.П.¹

¹Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАНУ, м. Дніпро, Україна

²Український державний університет науки та технологій, м. Дніпро, Україна

Анотація. На основі теорії двофазних течій (газ - тверді частинки), що базується на математичному описі досліджуваних систем, розроблено методику теоретичного оцінювання впливу характеристик двофазних потоків та характеристики траси, що транспортує двофазний потік, на зміну параметрів двофазного потоку. Зроблено припущення, що між дисперсною та дисперсійною середовищами відсутній масообмін, крім того відкинуто дисипативні та пульсаційні члени для несучого середовища, так як передбачається, що енергія міжфазової взаємодії значно перевищує ці енергетичні втрати. На «холодній» моделі проведено лабораторні дослідження процесу інжектування рафінуючої суміші. У лабораторних дослідженнях у якості реагентів використовували соду, вапно та їх суміш з оксидом заліза. Отримано уточнені коефіцієнти Бусройда. Зроблено порівняння теоретичних розрахунків з отриманими в лабораторних умовах.

Ключові слова: чавун, домішки, комплексна обробка, коефіцієнт Бусройда, модель.

Вступ. Комплексна обробка чавуну, що включає видалення сірки, кремнію і фосфору має переваги перед стандартною технологією поетапного рафінування чавуну у вигляді зменшення загального циклу плавки, теплових втрат і зменшення витрат у подальшому конвертерному переділі. У розглянутій технології як реагент пропонується використовувати суміш на основі $\text{CaO} - \text{Na}_2\text{CO}_3 - \text{FeO}$. Значний науковий і практичний інтерес становлять дослідження гідро-газодинамічних закономірностей процесу інжектування цієї суміші.

Основний матеріал. На основі теорії двофазних течій (газ - тверді частинки), що базується на математичному описі досліджуваних систем, розроблено методику теоретичного оцінювання впливу характеристик двофазних потоків (витрата газової фази, інтенсивність подачі твердої фази) та характеристики траси, що транспортує двофазний потік (діаметр каналу,

довжина горизонтальних, вертикальних та похилих ділянок, матеріал траси), на зміну параметрів (перепад тиску, між початком та закінченням траси, швидкість газової та твердої фаз) двофазного потоку [1, 2].

Для даного процесу початкова величина або швидкість частинок відіграють важливу роль, внаслідок чого ці значення досить суттєво можуть вплинути на визначені параметри і, зокрема, визначення коефіцієнта Бусройда [3].

Попередні розрахунки показують, що коефіцієнт Бусройда при горизонтальному русі двофазного середовища слабо впливає на перепад тиску, тому приймемо його рівним 0.5, як це було прийнято при розрахунках траси [4]. В експерименті його можна уточнити. Коефіцієнт Бусройда на вертикальній ділянці руху двофазного середовища впливає значніше, тому він становить більший інтерес у розрахунках. З досвіду дослідження траси випливає, що його величина може змінюватися не більше 0,00002 – 0,0002. Внаслідок цього проведемо результати розрахунків цих двох крайніх значень коефіцієнта.

З використанням розробленої методики виконано розрахунки перепаду тисків, швидкостей газової та твердої фаз для частинок CaO з діаметром 60, 100 мкм; FeO - 70, 450 мкм; Na₂CO₃ - 100 мкм) і Al - 500 мкм за витрати газу 100 нл/хв та інтенсивності подачі твердої фази 1,67 кг/с та 2,5 кг/с, які транспортують каналом діаметром 4 мм з горизонтальною ділянкою 1 м і вертикальною 0,6 м.

Для уточнення теоретично отриманих значень коефіцієнта Бусройда було проведено лабораторні дослідження. Як реагенти були використані - кальцинована сода, негашене вапно, оксид заліза (II) та рідина ПАР. Лабораторна установка дозволяла в процесі досліджень змінювати витрату газу-носія та інтенсивність подачі реагенту.

За допомогою розробленої методики були виконані розрахунки, які дали змогу порівняти лабораторні значення з теоретичними розрахунками. Зведені дані представлені в таблиці 1.

Таблиця 1

Порівняння лабораторних даних з теоретичними розрахунками

	Інтенсивність гр/хв	Концентрація, кг/м ³	Витрата газа- носія, м ³ /ч	Тиск на вході установки, МПа	Тиск за розрахунками, МПа
Сода	400	6,66	3,6	0,15	0,17
	550	7,85	4,2	0,20	0,19
Вапно	100	2,00	3,0	0,15	0,15
	100	1,66	3,6	0,20	0,16
	160	2,46	3,9	0,21	0,19
	160	2,29	4,2	0,22	0,19
Суміш	230	3,29	4,2	0,22	0,21
	410	6,83	3,6	0,22	0,24

Висновки: Отримані експериментальні дані дозволили уточнити оціночні величини необхідних коефіцієнтів. Для цього скористалися тими величинами, які отримано під час витікання двофазного середовища в атмосферний простір, тобто з відомим кінцевим тиском, що дорівнює атмосферному. За допомогою розробленої методики були виконані розрахунки, які дали змогу порівняти теоретично отримані значення з лабораторними значеннями.

ЛІТЕРАТУРА

1. Soo S.L. Fluid dynamics of multi-phase systems. Toronto-London: Blaisdell. 1967.
2. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. Ч. I. – М.: Наука, 1987, 464с.
3. Волошин А.И., Пономарев Б.В. Механика пневмотранспортирования сыпучих материалов. – Киев: Наукова думка, 2001, 520с.
4. Елисеев В.И., Толстопят А.П., Флеер Л.А., Совит Ю.П., Шевченко А.Ф., Шевченко С.А. Движение двухфазного потока в фурме. Вісник Дніпропетровського університету. Серія Механіка, Вип. 23, Т. 27, № 5, 2019, С. 21 – 34.

STUDYING THE REGULARITIES OF THE PROCESS OF INJECTING A MIXTURE OF REAGENTS

V.G. Kislyakov, V.I. Yeliseiev, V.P. Petrusha

Abstract. *Based on the theory of two-phase flows (gas - solid particles), which is based on the mathematical description of the systems under study, a methodology for theoretical evaluation of the influence of the characteristics of two-phase flows and the*

characteristics of the route transporting the two-phase flow on the change in the parameters of the two-phase flow has been developed. It is assumed that there is no mass transfer between the dispersed and dispersed media, and the dissipative and pulsation terms for the carrier medium are rejected, since it is assumed that the energy of interfacial interaction significantly exceeds these energy losses. Laboratory studies of the refining mixture injection process were carried out on the "cold" model. In laboratory studies, soda, lime, and their mixture with iron oxide were used as reagents. The refined Busroyd coefficients were obtained. Theoretical calculations were compared with those obtained in the laboratory.

Keywords: *cast iron, impurities, complex processing, Busroyd's coefficient, model..*

REFERENCES:

1. Soo S.L. Fluid dynamics of multi-phase systems. Toronto-London: Blaisdell. 1967. [in English].
2. Nigmatulin R.I. Dinamika mnogofaznyh sred. Ch. I. – M.: Nauka, 1987, 464s. [in Russian].
3. Voloshyn A.Y. , Ponomarev B.V. Mekhanyka pnevmotransportyrovaniya сыпучих материалов. – Kyev: Naukova dumka, 2001, 520 s. [in Russian].
4. Elyseev V.Y., Tolstopiat A.P., Fleer L.A., Sovyt Yu.P., Shevchenko A.F., Shevchenko S.A. Dvyzhenye dvukhfaznogo potoka v furme. Visnyk Dnipropetrovskoho universytetu. Seriia Mekhanika, Vyp. 23, T., 2019, T. 27, № 5, S. 21 – 34. [in Russian].

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ЧАСОВОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ АЛГОРИТМІВ ПОШУКУ ПІДРЯДКА

Клименко І.В.¹, Лебідь Є.А.²

¹УДУНТ, к.е.н., доцент, Україна

²УДУНТ, аспірант, Україна

Анотація. У статті проведено порівняльний аналіз часової ефективності чотирьох класичних алгоритмів пошуку підрядка (string searching algorithms), що намагаються знайти позицію, де один або декілька текстових рядків (зразків) входять у довший рядок або текст. Порівнювались наступні алгоритми: наївного пошуку (перебору, або ж брут-форс), Кнута-Морріса-Пратта (КМП), Боєра-Мура та Рабіна-Карпа. Дослідження проводилось на трьох різних архітектурах процесорів та з трьома наборами вхідних даних різного обсягу. Алгоритми тестувались за умов як холодного, так і прогрітого кешу. Для зниження впливу сторонніх чинників було реалізовано запуск на одному процесорному ядрі та примусове очищення пам'яті після кожного тесту. Результати експериментів проаналізовано за допомогою розрахунків *S*- та *R*-показників ефективності, надано рекомендації щодо доцільності застосування кожного окремого алгоритму в різних умовах.

Ключові слова: інформаційна технологія, машинний експеримент, *S*- та *R*-показники, алгоритм пошуку підрядка, часова ефективність алгоритму

Пошук підрядка в рядку є однією з базових задач інформатики та комп'ютерних наук, з широким спектром застосування – від пошукових систем, обробки природної мови та аналізу великих даних до компіляторів і текстових редакторів. Попри однакову функціональність, існуючі алгоритми пошуку суттєво відрізняються за структурою, стратегією пошуку та ефективністю в різних умовах. Наявність великої кількості алгоритмів пошуку та їх різноманітність виводить задачу вибору оптимального алгоритму для кожного окремого випадку на новий рівень – визначення критеріїв, оцінок та метрик, які дають змогу враховувати теоретичні оцінки складності [2], емпіричні характеристики у реальному середовищі виконання і практично оцінити його якість/ефективність для заданих вхідних даних.

Метою дослідження є експериментальне порівняння часової ефективності функціонально еквівалентних алгоритмів пошуку підрядка: наївного пошуку

(брут-форс), Кнута-Морріса-Пратта [3], Боєра-Мура [4] та Рабіна-Карпа [5]. Основне завдання – оцінити вплив програмно-апаратних засобів, обсягу вхідних даних та стану кешу на продуктивність алгоритмів і визначити найбільш доцільні умови їх застосування.

Усі алгоритми реалізовані мовою Go із забезпеченням однакових умов запуску. Тестування виконувалось на трьох різних апаратних платформах: Apple M1 (MacBook Pro M1 2020 - ARM, 8 vCPU (4+4), 16 GB RAM), GCP VM c2-standard-4 (Intel Cascade Lake, 4 vCPU, 16 GB RAM), GCP VM c2d-highcpu-4 (AMD Milan, 4 vCPU, 8 GB RAM).

Для зменшення впливу багатозадачності та отримання більш достовірних результатів експериментів на всіх архітектурах примусово обмежувалось виконання операцій тільки на одному ядрі (за допомогою інструкції GOMAXPROCS(1)); додатково перед кожною ітерацією експерименту проводилось очищення пам'яті (використовуючи runtime.GC()). Оскільки часова ефективність алгоритмів залежить від об'єму вхідних даних [1], для отримання об'єктивних результатів експерименти проводились над трьома різними наборами текстових даних – маленькому (500 – 1000 символів), середньому (приблизно 10000 символів) та великому (більше 100000 символів). Щоб оцінити вплив кешування на час виконання алгоритмів окремо було проведено серію виконань для різних режимів кешу: так званого «прогрітого» (100 попередніх виконань алгоритму результати яких не замірюються) та холодного (без попередніх виконань).

Для кожної конфігурації (архітектури/об'єму даних/режиму кешу) виконувалось 100, 500 та 1000 виконань алгоритмів, оскільки виконання серії випробувань підвищує статистичну точність результату. Після збору результатів обчислювались середні значення часу виконання, медіана та довірчий інтервал, а також розраховувались S- і R-показники ефективності відповідно до запропонованої та обґрунтованої методики [1].

Розрахунок показника S – середньої переваги одного алгоритму над іншим, базується на методі попарного порівняння часових витрат та виконується наступним чином:

$$S = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{t_i'' - t_i'}{\max(t_i', t_i'')} \cdot 100\%, \quad (1)$$

де t_i'' , t_i' – час виконання для кожного з алгоритмів у i -му випробуванні, N – кількість випробувань. Для кожної пари алгоритмів обчислюється, скільки разів один із них виконався швидше за інший, та виводиться відсоткове співвідношення (S-показник).

Показник R – визначає відносну частку області, де спостерігається перевага одного з алгоритмів над іншим та може бути представлений як:

$$R = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \text{sign}(t_i'' - t_i') \cdot 100\%, \quad \text{sign}(a) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } a > 0 \\ 0, & \text{якщо } a \leq 0 \end{cases} \quad (2)$$

На рис. 1 графічно зображено час виконання алгоритмів пошуку підрядка в рядку (Бойера-Мура, перебором, КМП, Рабіна-Карпа) у середовищі GCP VM (c2-standard-4, Intel) з великим набором даних у режимі прогрітого кешу, серія випробувань складала 500 ітерацій.

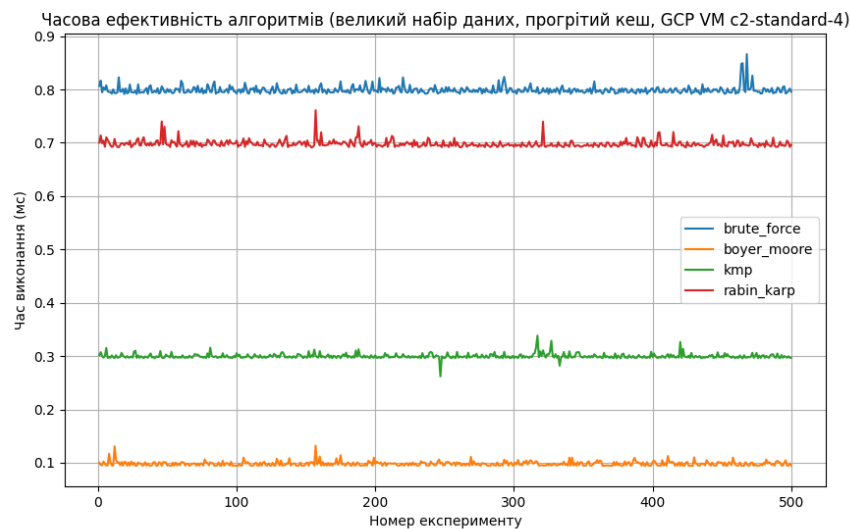


Рисунок 5 – час виконання алгоритмів у середовищі c2-standard-4

У табл. 1 наведено значення середніх часів виконання, медіани та довірчого інтервалу для усіх чотирьох алгоритмів у середовищі GCP VM (c2-standard-4, Intel) з великим набором даних у режимі прогрітого кешу, серія випробувань складала 500 разів. Як бачимо, алгоритм Бойера-Мура у цьому сценарії найшвидший і має найменший довірчий інтервал, що свідчить про його стабільність. Алгоритм Кнута-Морріса-Пратта приблизно втричі повільніший за Бойера-Мура, а алгоритм наївного пошуку (брут-форс) найповільніший за даних умов. Алгоритм Рабіна-Карпа має дещо кращий час виконання ніж алгоритм наївного пошуку, але в рази більший довірчий інтервал ніж у інших алгоритмів (дуже нестабільний).

Таблиця 1

Час виконання алгоритмів пошуку (Intel)

Параметр	boyer_moore	brute_force	kmp	rabin_karp
Середнє значення (мс)	0.098188	0.798881	0.299812	0.698225
Медіана (мс)	0.097596	0.796274	0.298501	0.695973
Довірчий інтервал ($\pm$ мс)	0.000296	0.000546	0.000506	0.002880

У табл. 2 наведено значення S- та R-показників часової ефективності алгоритмів пошуку підрядка в рядку (Бойера-Мура, наївного пошуку, Кнута-Морріса-Пратта, Рабіна-Карпа). Експеримент проводився у середовищі GCP VM (c2d-highcpu-4, AMD) на великому наборі даних, в режимі прогрітого кешу, серія випробувань складала 500 ітерацій. Як бачимо з таблиці, алгоритм Бойера-Мура демонструє найвищу часову ефективність серед усіх алгоритмів: має перевагу над алгоритмом наївного пошуку ($84.9 \pm 0.1\%$), КМП ($60.0 \pm 0.7\%$) і Рабіна-Карпа ($87.0 \pm 0.1\%$), причому перевага була зафіксована у 100% випадків (R: 100). Алгоритм КМП посідає друге місце в рейтингу – він кращий за алгоритм наївного пошуку ($61.9 \pm 0.9\%$) та Рабіна-Карпа ($67.3 \pm 0.8\%$), і програє тільки Бойера-Мура ($-60.0 \pm 0.7\%$). Згідно з наведених даних найгіршим алгоритмом у цьому сценарії є алгоритм Рабіна-Карпа.

Таблиця 2

S- та R-показники ефективності (великий набір даних)

Алгоритм	boyer_moore	brute_force	kmp	rabin_karp
boyer_moore	X	S: 84.9 ± 0.1	S: 60.0 ± 0.7	S: 87.0 ± 0.1
		R: 100	R: 100	R: 100
brute_force	S: -84.9 ± 0.1	X	S: -61.9 ± 0.9	S: 14.1 ± 0.4
	R: 0		R: 0	R: 99
kmp	S: -60.0 ± 0.7	S: 61.9 ± 0.9	X	S: 67.3 ± 0.8
	R: 0	R: 100		R: 100
rabin_karp	S: -87.0 ± 0.1	S: -14.1 ± 0.4	S: -67.3 ± 0.8	X
	R: 0	R: 1	R: 0	

У табл. 3 наведено значення S- та R-показників часової ефективності алгоритмів пошуку підрядка в рядку (Бойера-Мура, наївного пошуку, Кнута-Морріса-Пратта, Рабіна-Карпа). Експеримент проводився у середовищі GCP VM (c2d-highcpu-4, AMD) на маленькому наборі даних, в режимі прогрітого кешу, серія випробувань складала 500 ітерацій. В даному сценарії найкращим є алгоритм КМП, а алгоритм Бойера-Мура посідає тільки друге місце. Згідно з

розрахунками найгіршим алгоритмом у цьому сценарії також є алгоритм Рабіна-Карпа, який програє навіть алгоритму наївного пошуку (брут-форс).

Таблиця 3

S- та R-показники ефективності (малий набір даних)

Алгоритм	boyer_moore	brute_force	kmp	rabin_karp
boyer_moore	X	S: 46.7 $\pm$ 2.0	S: -22.6 $\pm$ 0.6	S: 54.9 $\pm$ 1.9
		R: 100	R: 1	R: 100
brute_force	S: -46.7 $\pm$ 2.0	X	S: -58.7 $\pm$ 2.1	S: 15.4 $\pm$ 0.7
	R: 0		R: 0	R: 99
kmp	S: 22.6 $\pm$ 0.6	S: 58.7 $\pm$ 2.1	X	S: 65.0 $\pm$ 1.9
	R: 99	R: 100		R: 100
rabin_karp	S: -54.9 $\pm$ 1.9	S: -15.4 $\pm$ 0.7	S: -65.0 $\pm$ 1.9	X
	R: 0	R: 1	R: 0	

В результаті експериментального дослідження встановлено, алгоритм Боєра-Мура впевнено демонструє найкращу часову ефективність у більшості сценаріїв, особливо на великих та середніх наборах даних. Водночас алгоритм Кнута-Морріса-Пратта (КМП) у деяких випадках демонстрував порівняну або навіть кращу (особливо на малому обсязі даних) часову ефективність. В той же час, алгоритм Рабіна-Карпа проявляє нестабільність і високу дисперсію часу, особливо на маленьких об'ємах даних.

Що стосується впливу кешу («холодного»/«прогрітого») на результати роботи, то для «прогрітого» кешу спостерігається зменшення середнього часу виконання алгоритмів до 25%. При цьому, у режимі прогрітого кешу розбіжності між алгоритмами зменшуються, хоча алгоритм Боєра-Мура все одно зберігає лідерство. У режимі холодного кешу час виконання дуже коливається, особливо для алгоритму Рабіна-Карпа.

В подальших дослідженнях розглядається можливість використання вище зазначеного підходу для вибору алгоритму пошуку заданого набору ключових слів (навичок та компетенцій) у певній множині текстових файлів (резюме, анкетах та профілях кандидатів) для подальшого їх ранжування та побудови рекомендацій щодо формування команд для виконання ІТ проектів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Шинкаренко В. І. Порівняльний аналіз часової ефективності функціонально еквівалентних алгоритмів. Проблеми програмування. – 2001. № 3–4. С. 31–39.

2. Cormen T. H., Leiserson C. E., Rivest R. L., Stein C. Introduction to Algorithms. MIT Press. – 2009. 1292 p.
3. Knuth D.E., Morris J.H., Pratt V.R. Fast Pattern Matching in Strings. SIAM Journal on Computing. – 1977. Vol. 6(2). P. 323–350.
4. Boyer R. S., Moore J. S. A Fast String Searching Algorithm. Communications of the ACM. – 1977. Vol. 20(10). P. 762–772.
5. Karp R. M., Rabin M. O. Efficient randomized pattern-matching algorithms. IBM Journal of Research and Development. – 1987. Vol. 31(2). P. 249–260.

COMPARATIVE ANALYSIS OF TIME EFFICIENCY OF SUBSTRING SEARCH ALGORITHMS

Klymenko I.V., Lebid Y.A.

Abstract. *This paper presents a comparative analysis of the time efficiency of four classical string searching algorithms that attempt to identify the position where one or more pattern strings occur within a longer string or text. The evaluated algorithms include the naive (brute-force) method, Knuth–Morris–Pratt (KMP), Boyer–Moore, and Rabin–Karp. The experiments were conducted on three different processor architectures using three datasets of varying sizes. Each algorithm was tested under both cold and warm cache conditions. To reduce external influence, the benchmarking was limited to a single CPU core, and memory was forcibly cleaned after each run. The experimental results were analyzed using S- and R-indicators of efficiency, and practical recommendations are provided regarding the applicability of each algorithm under different operating conditions.*

Keywords: *information technology, machine-based benchmarking, S- and R-metrics, substring search algorithm, time efficiency of algorithms.*

REFERENCES

1. Shynkarenko V. I. Comparative Analysis of Time Efficiency of Functionally Equivalent Algorithms. Problems of Programming, 2001, Vol. 3–4, pp. 31–39.
2. Cormen T. H., Leiserson C. E., Rivest R. L., Stein C. Introduction to Algorithms. MIT Press. – 2009. 1292 p.
3. Knuth D.E., Morris J.H., Pratt V.R. Fast Pattern Matching in Strings. SIAM Journal on Computing. – 1977. Vol. 6(2). P. 323–350.
4. Boyer R. S., Moore J. S. A Fast String Searching Algorithm. Communications of the ACM. – 1977. Vol. 20(10). P. 762–772.
5. Karp R. M., Rabin M. O. Efficient randomized pattern-matching algorithms. IBM Journal of Research and Development. – 1987. Vol. 31(2). P. 249–260.

ДОСЛІДЖЕННЯ ОДНОРІДНОСТІ ПСЕВДОВИПАДКОВИХ ВИБІРОК КРИТЕРІЯМИ АНДЕРСОНА ТА ЙОГО АНАЛОГАМИ

Клименко О. Д.

Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, аспірант, Україна

Анотація. У роботі детально розглянуто критерії статистичної однорідності вибірок експериментальних вимірювань у випадках, коли функції розподілу ймовірностей апріорно невідомі. Зокрема, проаналізовано критерій Андерсона, який широко застосовується в практиці для оцінювання однорідності даних на основі рангових розподілів. Запропоновано комбінований критерій Буша-Вінда, який базується на логістичних випадкових величинах і за своїми властивостями є аналогом відомих статистик Ван-дер-Вардена та Клотца. Наведено відповідні математичні моделі, алгоритми для обчислень, а також критичні значення, які застосовуються для перевірки статистичних гіпотез щодо однорідності вибірок. Проведені експериментальні дослідження з використанням різної кількості вимірювань (довжина вибірки) та з різними видами закону розподілу ймовірності (логістичний, експоненціальний). Отримані результати дослідження підтвердили високу ефективність використаних критеріїв у прикладних задачах аналізу даних.

Ключові слова: статистика, критерій, алгоритм, математична модель, розподіл ймовірності, однорідність.

Дослідження статистичної однорідності вибірок є важливим завданням у математичній статистиці, оскільки воно дозволяє оцінювати достовірність експериментальних вимірювань та визначати, чи належать вони до однієї генеральної сукупності [1-6]. Розглянемо підходи щодо перевірки статистичної однорідності вибірок: критерій Андерсона та комбінований критерій Буша-Вінда. Кожен із цих критеріїв має свої особливості, сфери застосування та ефективність залежно від специфіки вибірок, що аналізуються. Критерій Андерсона широко використовується для оцінки статистичної однорідності вибірок, отриманих у ході експериментальних досліджень, коли функція розподілу ймовірностей невідома. Основна ідея цього критерію полягає в аналізі рангових характеристик вибірок та порівнянні їх у рамках єдиної сукупності даних [4]. Методологія цього підходу базується на порівнянні упорядкованих значень вибірок та їхніх об'єднаних рангових характеристик. Завдяки цьому критерію можна робити висновки про рівномірний розподіл

даних у вибірках та їхню взаємну відповідність. Важливо зазначити, що ефективність цього критерію значно зростає при достатньо великій кількості спостережень у вибірках. Запропонований налог критерію Андерсона ґрунтується на порівнянні власних рангів двох вибірок [1, 4]. Цей критерій особливо ефективний у випадках, коли потрібно оцінити взаємозв'язок між даними, отриманими одним і тим самим вимірювальним приладом. Завдяки використанню рангових характеристик можна уникнути впливу викидів та локальних аномалій у вибірках, що робить цей метод більш стійким до нерівномірного розподілу даних. Даний критерій має високу інформативність при великих обсягах вибірок, оскільки випадкові відхилення у розподілі даних стають менш значущими. Запропоновано комбінований критерій Буша-Вінда базується на використанні логістичних випадкових величин та є аналогом статистик Ван-дер-Вардена і Клотца. Він дозволяє оцінювати вибірки з невідомими статистичними закономірностями, що робить його універсальним засобом для аналізу експериментальних вимірювань. Однією з ключових переваг цього критерію є його здатність враховувати як відхилення у середніх значеннях вибірок, так і варіації у їхній дисперсії. Такий підхід до обробки випадкових величин дозволяє отримати більш точні результати при аналізі вибірок, які можуть мати суттєві відмінності у своїх параметрах. Критерій Буша-Вінда використовується у випадках, коли стандартні методи перевірки статистичної однорідності дають неоднозначні результати або не враховують всіх можливих відхилень у вибірках.

Висновки. Проведені дослідження статистичної однорідності вибірок за допомогою критеріїв: Андерсона та комбінованого критерію Буша-Вінда. Проведені дослідження показали, що кожен з методів має свої переваги та обмеження залежно від кількості даних (довжини вибірок) та виду розподілу ймовірності (логістичний, експоненціальний, тощо). Критерій Андерсона демонструє високу точність при роботі з великими вибірками та рівномірним розподілом даних. Комбінований критерій Буша-Вінда забезпечує найбільш універсальний підхід, дозволяючи аналізувати вибірки з різними статистичними параметрами розподілу. У результаті проведеного дослідження

підтверджено, що кожен із розглянутих критеріїв може бути ефективно застосований у залежності від конкретного завдання. Для перевірки вибірок з невідомими розподілами найкраще підходить комбінований критерій Буша-Вінда, оскільки він враховує широкий спектр можливих варіацій у вибірках. Отримані результати можуть бути корисними для проведення статистичного аналізу у різних наукових і прикладних дослідженнях, включаючи контроль якості продукції, оцінку надійності вимірювальних приладів, аналіз економічних даних та інші сфери, де необхідно визначати статистичну однорідність вибірок. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на розширення спектра критеріїв, що застосовуються, та розробку нових підходів до оцінки статистичної однорідності вибірок з урахуванням складніших математичних моделей і методів машинного навчання.

ЛІТЕРАТУРА

1. Malaichuk, V., Klymenko, S., & Astakhov, D. (2023). Computer Processing of Measurements in Problems of Observation of the Condition of Technical Objects. Journal of Rocket-Space Technology, 30(4), 99-106. <https://doi.org/10.15421/452213>
2. GailF. Fahoometwenty Nonparametric Statistics And Their Large Sample Approximations / Journal of Modern Applied Statistical Methods. No2, Wayne State University, 2002. p.248–268.
3. Hajek J. Nonparametric Statistics. Holden-Day, San Francisco, 1969. – P. 346.
4. Kobzar, A. I. (2006). Applied Mathematical Statistics: For Engineers and Researchers. M.: Fizmatlit.– P. 816
5. Таблиці функцій та критичних точок розподілів. Розділи: Теорія ймовірностей. Математична статистика. Математичні методи в психології. / уклад. М. М. Горонескуль. Харків: УІЦЗУ, 2009. 90с.
6. Турчин В.М. Теорія ймовірностей і математична статистика: навч. пос. Дніпропетровськ: IMA, 2014. 556 с.

RESEARCH ON THE HOMOGENEITY OF PSEUDO-RANDOM SAMPLES USING ANDERSON'S CRITERION AND ITS ANALOGS

Klymenko O. D.

Abstract. *The paper examines in detail the criteria for statistical homogeneity of samples of experimental measurements in cases where the probability distribution functions are a priori unknown. In particular, the Anderson criterion, which is widely used in practice to assess the homogeneity of data based on rank distributions, is analyzed. The Spearman criterion is also considered, which allows comparing two*

samples obtained using the same measuring device and identifying statistical differences between them. In addition, the combined Busch-Wind criterion is proposed, which is based on logistic random variables and is analogous to the well-known Van der Waerden and Klotz statistics in its properties. The corresponding mathematical models, algorithms for calculations, and critical values used to test statistical hypotheses regarding the homogeneity of samples are presented. Experimental studies have been conducted that included logistic and exponential samples, which confirmed the high efficiency of the criteria used in applied data analysis problems.

Keywords: *statistics, criterion, algorithm, mathematical model, probability distribution, homogeneity.*

REFERENCES

1. Malaichuk, V., Klymenko, S., & Astakhov, D. (2023). Computer Processing of Measurements in Problems of Observation of the Condition of Technical Objects. *Journal of Rocket-Space Technology*, 30(4), 99-106. <https://doi.org/10.15421/452213>
2. Fahoome, G. F. (2002). Twenty Nonparametric Statistics and Their Large Sample Approximations. *Journal of Modern Applied Statistical Methods*, 2, 248–268.
3. Hajek, J. (1969). *Nonparametric Statistics*. San Francisco: Holden-Day.
4. Kobzar, A. I. (2006). *Applied Mathematical Statistics: For Engineers and Researchers*. M.: Fizmatlit. – P. 816.
5. Horoneskul, M. M. (Ed.). (2009). *Tables of Functions and Critical Points of Distributions: Probability Theory, Mathematical Statistics, Mathematical Methods in Psychology*. Kharkiv: UCZU.
6. Turchyn, V. M. (2014). *Probability Theory and Mathematical Statistics: A Textbook*. Dnipro: IMA.

**МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ РУХУ СИПУЧОГО МАТЕРІАЛУ ПО РОБОЧОМУ
ОРГАНУ ВІБРАЦІЙНОГО ЖИВИЛЬНИКА З ДОВІЛЬНОЮ ФОРМОЮ
ПОПЕРЕЧНОГО ПЕРЕРІЗУ**

Кононов Д.О., Ціколія А.З., Атаманчук Р. П.

*ННІ «Дніпровський металургійний інститут», Український державний
університет науки і технологій*

Анотація. *Виробництво сталі в конвертерних цехах пов'язане з витратою багатьох видів сипких матеріалів, включаючи значну кількість твердих розкислювачів.*

Використання вібраційних живильників з інерційним приводом ускладнено так як вони не забезпечують необхідну точність дозування, особливо у випадках, коли живильник працює у режимі частих пусків та зупинок.

Розроблено математичну модель багатошарового сипучого середовища з урахуванням форми поперечного перерізу лотка вібраційного живильника.

Приведені результати розв'язання системи диференціальних рівнянь. Рішення проводилося чисельно з використанням метода Рунге-Кутта IV-го порядку.

Побудовані відповідні графіки залежностей кінематичних параметрів від часу.

Розподіл швидкостей висотою поперечного перерізу носить складний характер і залежить від співвідношення різних параметрів. Спостерігаються режими, коли швидкості верхніх шарів більші за нижчі і навпаки.

Ключові слова: *сипкий матеріал, вібраційний живильник, багатошарова модель.*

Вступ. Виробництво сталі в конвертерних цехах пов'язане з витратою багатьох видів сипких матеріалів, включаючи значну кількість твердих розкислювачів. Треба відмітити, що кількість цих компонентів постійно зростає [1, 2, 3].

Широко застосовувані електровібраційні живильники відрізняються високою вартістю, складністю систем керування та налаштування. Простіші вібраційні живильники з інерційним приводом, але вони не забезпечують необхідну точність дозування, особливо у випадках, коли живильник працює у режимі частих пусків та зупинок.

Зазвичай вібраційний живильник (ВЖ) працює так:

За командою на завантаження ВЖ включається і подає матеріал або на конвеєр з ваговимірником або у ваговий бункер. Після набору необхідної дози сипучого матеріалу дається команда на зупинку.

Для забезпечення стійкої роботи живильника використовується зарезонансна настройка. Тобто власна частота коливань ВЖ у 3-4 рази менша за частоту збудовуючої сили.

У зв'язку з цим мають місце складності, що виникають при пуску та зупинці Вібромашини: збільшення амплітуди коливань, миттєвої продуктивності. Це приводить до перевантаження матеріала.

Для урахування цього перевантаження треба розробити модель вібраційного руху сипкого матеріалу. Існують багато моделей руху, але більшість з них побудовано на основі руху матеріальної точки та не враховує форму поперечного перерізу лотка ВЖ. Тому розробка математичної моделі руху сипучого матеріалу по робочому органу ВЖ з довільною формою поперечного перерізу є актуальною задачею [3, 4].

Основний матеріал. Розглянемо характер руху сипучого матеріалу по лотку вібраційного живильника з самобалансними вібраторами, нахиленому до горизонту на кут α , і представимо на ньому матеріал у вигляді багаточислової моделі, показаної на рис. 1.

Розіб'ємо весь матеріал площинами, паралельними верхній зовнішній поверхні матеріалу, що транспортується, на кілька шарів. Кожен шар характеризується дискретною масою, постійної у процесі вібротранспортування.

Як припущення розглядатимемо шар у вигляді твердого тіла постійного об'єму та форми.

Розглянемо сили, що діють на i -ий шар матеріалу:

$$\text{сила тяжіння } G_i = m_i \cdot g = \rho \cdot A_i \cdot L_i \cdot g,$$

де $m_i = \rho \cdot A_i \cdot L_i$ – маса i -ого шару матеріалу; A_i – площа поперечного перерізу; L_i – Довжина шару, приймається рівною довжині робочого органу живильника;

реакції взаємодії з нижче-і вищележачими шарами, N_i або N_{i-1} ;

для нижнього шару реакції взаємодії з робочим органом живильника, N_i ;
сила тертя про вище- і нижчі шари, F_{mpi} і $F_{mp\ i-1}$;
сила тертя об стіну робочого органу або його бічну поверхню (для живильників з нерухомою бічною поверхнею) F_{Tp}^{δ} ;
сила обурення, що дорівнює переносній силі інерції, яку можна розкласти на дві складові: дотичну та нормальну до поверхні, що вібрує.

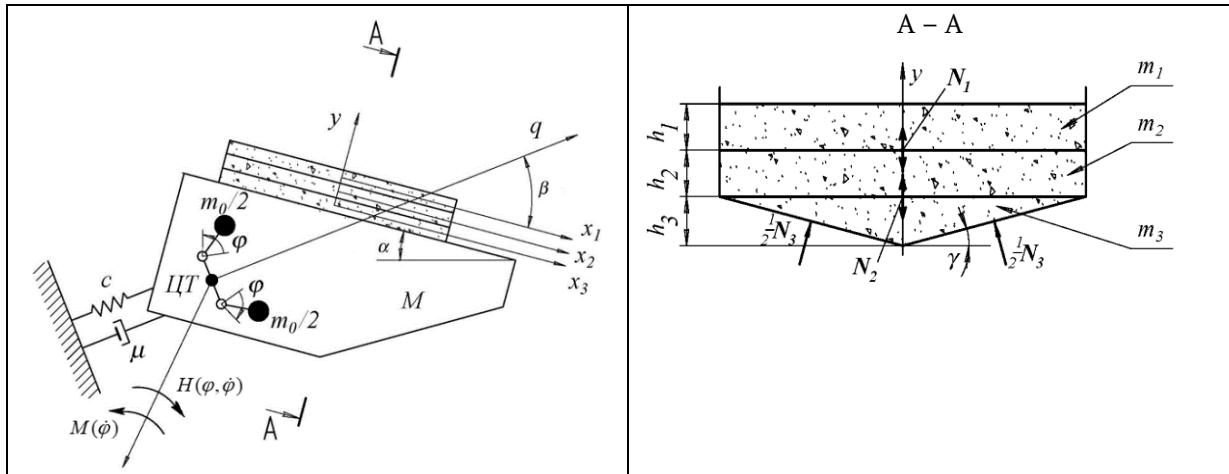


Рисунок 1 - Розрахункова схема вібраційного самобалансного живильника з багатшаровою моделлю сипучого матеріалу

На підставі вищевикладеного, можна записати таку систему диференціальних рівнянь для тришарової моделі:

$$\begin{cases} (M + \xi \cdot m) \ddot{q} + \mu \dot{q} + cq = m_0 r (\dot{\varphi})^2 \sin \varphi - m_0 r \ddot{\varphi} \cos \varphi; \\ I \ddot{\varphi} + b \dot{\varphi} + m_0 f_{npr} \frac{d}{2} \dot{\varphi}^2 = M(\varphi) - m_0 r \ddot{q} \cos \varphi; \\ m_1 \ddot{y}_1 = -k_1^6 m_1 q \sin \beta - m_1 g \cos \alpha + N_1; \\ m_2 \ddot{y}_2 = -k_2^6 m_2 \ddot{q} \sin \beta - m_2 g \cos \alpha + N_2 - N; \\ m_3 \ddot{y}_3 = -k_3^6 m_3 \ddot{q} \sin \beta - m_3 g \cos \alpha - N_2 + N_3 \cos \gamma; \\ m_3 \ddot{y}_3 = -k_3^b m_3 \ddot{q} \sin \beta - m_3 g \cos \alpha - N_2 + N_3 \cos \gamma; \\ m_1 \ddot{x}_1 = -k_1^2 m_1 \ddot{q} \cos \beta + m_1 g \sin \alpha + F_{mp2} - F_{mp1}^{\delta}; \\ m_2 \ddot{x}_2 = -k_2^2 m_2 \ddot{q} \cos \beta + m_2 g \sin \alpha - F_{mp1} + F_{mp2} - F_{mp2}^{\delta}; \\ m_3 \ddot{x}_3 = -k_3^2 m_3 \ddot{q} \cos \beta + m_2 g \sin \alpha - F_{mp2} + F_{mp3} - F_{mp3}^{\delta}, \end{cases} \quad (1)$$

де m_i – маса i -го шару; $k_i^{e(z)}$ – коефіцієнт загасання для збурюючої сили; γ – кут, що утворюється днищем живильника та горизонталлю в поперечному перерізі живильника; $q, \dot{q}, \ddot{q}$ – координата, швидкість прискорення живильника; $\phi, \dot{\phi}, \ddot{\phi}$ – кут повороту, кутова швидкість і прискорення валу дебалансу; $\ddot{x}, \ddot{y}$ – відносне прискорення матеріалу; M – загальна маса коливальних частин; I – наведений момент інерції обертових частин приводу; m_0 – сумарна маса дебалансів; c – наведена жорсткість пружної системи у напрямку осі q ; r – радіус обертання центрів тяжкості дебалансів; $M(\dot{\phi})$ – момент на валу електродвигуна; μ – коефіцієнт в'язкого опору руху живильника, b – коефіцієнт в'язкого опору; $f_{пр}$ – наведений коефіцієнт тертя в підшипниках вібратора; d – діаметр цапфи підшипника; α – кут нахилу площини лотка до горизонту; β – кут між віссю q і площиною живильника (кут вібрації).

Система диференційованих рівнянь (2) є нелінійною, і з цієї причини рішення знаходитимемо чисельними методами з фіксованим кроком інтегрування.

Для обліку ударної взаємодії скористаємося коефіцієнтом відновлення при ударі k та визначимо швидкості після удару за відомими формулами.

При ударі об лоток

$$U = -kV \quad (2)$$

при ударі двох шарів, що рухаються

$$U_1 = \frac{m_1 V_1 + m_2 V_2 - m_2 k (V_1 - V_2)}{m_1 + m_2}; U_2 = \frac{m_1 V_1 + m_2 V_2 + m_1 k (V_1 - V_2)}{m_1 + m_2}, \quad (3)$$

де V_i, U_i – швидкості шарів до і після удару, відповідно; m_1, m_2 – маси шарів, що ударяються.

На рис.2 та 3 представлені результати розв'язання системи диференціальних рівнянь. Рішення проводилося чисельно з використанням метода Рунге-Кутта IV-го порядку з допомогою ЕОМ з такими основними вихідними даними: $M = 600$ кг; $m_0 = 25$ кг; $m_1 = m_2 = 75$ кг; $m_3 = 50$ кг; $I = 1,1$ кг·м

^{2} ; $\mu=2000 \text{ Н} \cdot \text{с/м}$; $z = 7105 \text{ Н} \cdot \text{м}$; $r=0,05 \text{ м}$; $d = 0,06 \text{ м}$; $b = 0,1 \text{ Н} \cdot \text{м}$; $f = 0,01$; $P = 9,5 \text{ кВт}$; $n_n = 1460 \text{ хв}^{-1}$; $n_c = 1500 \text{ хв}^{-1}$.

Слід зазначити, що розподіл швидкостей висотою поперечного перерізу носить складний характер і залежить від співвідношення різних параметрів. Спостерігаються режими, коли швидкості верхніх шарів більші за нижчі і навпаки.

Наприклад, для високоінтенсивних режимів роботи швидкість переміщення верхніх шарів більше нижніх, теж саме спостерігається і при збільшенні кута нахилу лотка до горизонту. При зупинці живильника (за винятком малого проміжку часу) переміщення слів відбувається за рахунок ковзання по робочому органу та відносно один одного без відриву від лотка; тому при дослідженні процесу вибігу можна знехтувати підкиданням матеріалу. Отримані результати добре узгоджуються з експериментальними даними різних досліджень.

Висновок. Розроблено математичну модель багатошарового сипучого середовища з урахуванням форми поперечного перерізу лотка вібраційного живильника. Побудовані відповідні графіки залежностей кінематичних параметрів від часу.

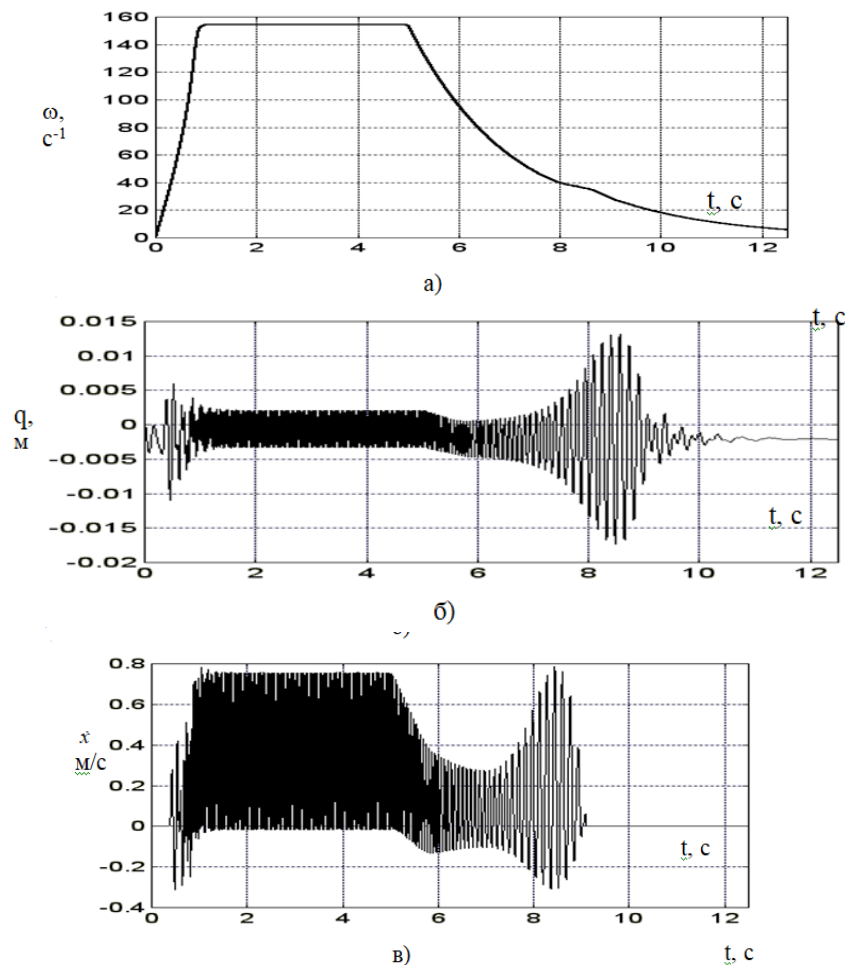


Рисунок 2 - Кінематичні параметри роботи вібраційного живильника: а) кутова швидкість двигуна; б) - переміщення живильника; в) - швидкість переміщення матеріалу

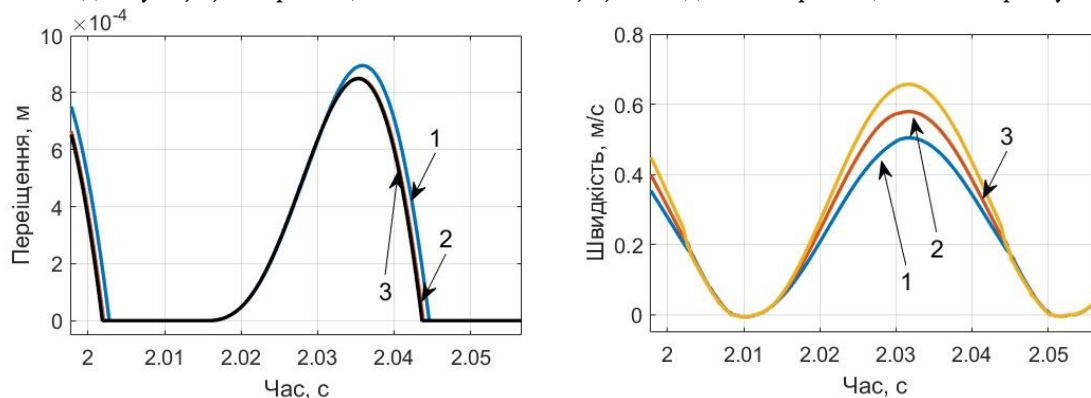


Рисунок 3 - Збільшені характеристики роботи вібраційного живильника з багатошаровою моделлю сипучого матеріалу (1-верхній шар, 2-нижній шар, 3-нижній шар): а) нормальне переміщення до віброуючої площини; б) швидкість переміщення матеріалу

ЛІТЕРАТУРА

1. Усачов В.П. Технологічні лінії та комплекси цехів. – У 2-ч. – Ч.2 – Технологічні основи компоновки ліній металургійних виробництв: Підручник для вузів. – К.: ІСДО, 1994.–416 с.

2. Вибрационная техника и технологии в энергоемких производствах : Моногр./ В. Н. Потураев, В. П. Франчук, В. П. Надутый; НАН Украины. Ин-т геотехн. механики. - Д., 2002. - 190 с.
3. Усачов В.П., Кононов Д.О. Проблеми раціонального використання вібраційної техніки в системах дозування сипких матеріалів// Підйомно-транспортна техніка.- Дніпропетровськ, 2002, №1-2.-с.135-139.
4. Кононов, Дмитро Олександрович. Підвищення точності дозування сипучих матеріалів шляхом удосконалення вібраційних живильників [Текст] : дис... канд. техн. наук: 05.05.08 / Кононов Дмитро Олександрович ; Національна металургійна академія України. - Д., 2004.

MATHEMATICAL MODEL OF THE MOVEMENT OF BULK MATERIAL ALONG THE WORKING BODY OF A VIBRATING FEEDER WITH AN ARBITRARY CROSS-SECTIONAL SHAPE

Kononov D.O., Tsikolia A.Z., Atamanchuk R. P.

Abstract. *Steel production in converter shops is associated with the consumption of many types of bulk materials, including a significant amount of solid deoxidizers.*

The use of vibrating feeders with an inertial drive is complicated because they do not provide the necessary accuracy of dosing, especially in cases where the feeder operates in the mode of frequent starts and stops.

A mathematical model of a multilayer bulk medium has been developed taking into account the shape of the cross-section of the vibrating feeder tray.

The results of solving the system of differential equations are presented. The solution was carried out numerically using the Runge-Kutta method of the 4th order.

The corresponding graphs of the dependences of kinematic parameters on time have been constructed.

The distribution of speeds along the height of the cross-section is complex and depends on the ratio of various parameters. Modes are observed when the speeds of the upper layers are greater than the lower ones and vice versa.

Keywords: *bulk material, vibrating feeder, multilayer model.*

REFERENCE

1. Usachov V.P. Technological lines and complexes of shops. – In 2 parts – Part 2 – Technological bases of arrangement of lines of metallurgical productions: Textbook for universities. – K.: ISDO, 1994.–416 p.
2. Vibration equipment and technologies in energy-intensive productions: Monograph. / V. N. Poturaev, V. P. Franchuk, V. P. Naduty; NAS of Ukraine. Institute of geotechnical mechanics. - D., 2002. - 190 p.

3. Usachov V.P., Kononov D.O. Problems of rational use of vibration equipment in dosing systems of loose materials// Lifting and conveying equipment.-Dnepropetrovsk, 2002, No. 1-2.-p.135-139. Smirnov V.O., Biletsky V.S. Preparatory processes of mineral enrichment. [textbook] – Donetsk: Eastern Publishing House, Donetsk branch of the National Technical School, 2012. – 286 p.
4. Kononov, Dmitry Aleksandrovich. Increasing the accuracy of dosing bulk materials by improving vibrating feeders [Text]: Dissertation... Candidate of Technical Sciences: 05.05.08 / Kononov Dmitry Aleksandrovich; National Metallurgical Academy of Ukraine. - D., 2004.

ОПТИМАЛЬНЕ РОЗТАШУВАННЯ СЕРВІСНИХ ЦЕНТРІВ

Косолап А.І.

*Дніпровський національний університет ім. О. Гончара, докт. фіз.-мат. наук,
професор, Україна*

Анотація. Розглядається задача оптимального розташування сервісних центрів. Така задача постійно виникає при розвитку інфраструктури регіонів. В роботі використано принцип збиткового проектування. Він передбачає проектування безлічі сервісних центрів, серед яких залишаються тільки ті, які задовольняють умовам оптимальності. Вхідними даними для даної задачі є час обслуговування клієнтів кожним сервісним центром. Відомі також затрати на відкриття сервісного центру, затрати на погодинне обслуговування та затрати на весь проект. Розглядаються різні постановки даної задачі. Зокрема, коли частина сервісних центрів уже функціонує, коли враховується плата за надання послуг клієнтам. Побудовані оптимізаційні моделі, які є квадратичними з булевими змінними. Розв'язано декілька тестових задач, які підтверджують адекватність моделей та ефективність їх для чисельного розв'язування задач оптимального розташування сервісних центрів. Для чисельного розв'язування задач використовувалась надбудова OpenSolver для Excel.

Ключові слова: оптимізаційна модель, квадратична задача с булевими змінними, обчислювальні результати.

Вступ. Інфраструктура регіонів кожної держави стрімко розвивається. З'являється безліч сервісних центрів на установку яких виділяються значні кошти. У зв'язку з цим актуальною є задача оптимального розташування сервісних центрів та їх ефективного функціонування.

Даній темі присвячено безліч публікацій, зокрема оглядових робіт [1]. Більшість моделей враховують відстані між клієнтами та сервісними центрами. В якості критерія обирається мінімізація сумарної відстані. Затрати на установку сервісних центрів, як правило, не враховуються. В даній роботі розглядається більш загальна постановка задачі з урахуванням фінансових затрат.

Основний матеріал. Будемо допускати, що відомо кількість клієнтів n та кількість сервісних центрів m . Позначимо через t_{ij} – час обслуговування i -го клієнта в j -му сервісному центрі ($i = 1, \dots, n, j = 1, \dots, m$). Час обслуговування може

бути пропорційний відстані між клієнтом і сервісним центром. Відомі також затрати P_j на відкриття j -го сервісного центру, витрати s_j на годину його роботи та виділені затрати S на відкриття всіх сервісних центрів. Введемо змінні даної задачі x_{ij} – дорівнює одиниці, якщо i -й клієнт обслуговується в j -му сервісному центрі, інакше ця змінна дорівнює нулю. Змінна z_j дорівнює одиниці, якщо j -й сервісний центр відкривається, інакше ця змінна дорівнює нулю. Задача полягає в тому, щоб визначити які сервісні центри відкривати, щоб забезпечити ефективне обслуговування клієнтів, другими словами, обслуговувати всіх клієнтів за мінімальний час. Оптимізаційна модель цієї задачі буде мати вигляд

$$\min\{T \mid \sum_{i=1}^n t_{ij} x_{ij} \leq T, j=1, \dots, m, \sum_{j=1}^m z_j (P_j + s_j \sum_{i=1}^n t_{ij} x_{ij}) \leq S, \sum_{j=1}^m x_{ij} = 1, i=1, \dots, n\}, \quad (1)$$

де змінні x_{ij} , z_j приймають булеві значення. В задачі (1) знаходимо мінімальний час T обслуговування всіх клієнтів.

Задачу (1) легко узагальнити для типової ситуації, коли вже існує декілька сервісних центрів. Тоді для відповідних сервісних центрів покладемо $P_j = 0$ і $z_j = 1$ та розв'яжемо відповідну задачу (1).

Як правило, сервісні центри за обслуговування клієнтів знімають плату. Це може бути погодинна або фіксована плата, яку позначимо відповідно через v_j та w_j для j -го сервісного центру. Тоді критерієм задачі може бути максимізація сумарної вартості обслуговування (для сервісних центрів) або мінімізація сумарної вартості обслуговування (для клієнтів). Відповідно отримуємо наступні оптимізаційні моделі.

$$\min\{\sum_{j=1}^m v_j \sum_{i=1}^n t_{ij} x_{ij} \mid \sum_{i=1}^n t_{ij} x_{ij} \leq T, j=1, \dots, m, \sum_{j=1}^m z_j (P_j + s_j \sum_{i=1}^n t_{ij} x_{ij}) \leq S, \sum_{j=1}^m x_{ij} = 1, i=1, \dots, n\} \quad (2)$$

та

$$\min\left\{\sum_{j=1}^m w_j \sum_{i=1}^n x_{ij} \mid \sum_{i=1}^n t_{ij} x_{ij} \leq T, j = 1, \dots, m, \sum_{j=1}^m z_j (P_j + s_j \sum_{i=1}^n t_{ij} x_{ij}) \leq S, \right. \\ \left. \sum_{j=1}^m x_{ij} = 1, i = 1, \dots, n\right\}. \quad (3)$$

Задачі (2)–(3) розв’язуються після задачі (1), де знаходиться величина T . Розглянуті задачі (1)–(3) є квадратичні, так як одне з обмежень містить добуток змінних. Ці булеві змінні, що значно ускладнює задачу. Як правило, такі задачі розв’язуються методом розгалужень та границь, який реалізований в багатьох програмних засобах. Але ці програмні засоби можуть передчасно завершувати пошук оптимальних рішень. Крім того, час розв’язування задач буде швидко зростати зі збільшенням розмірності задачі. В таких випадках, альтернативою є метод точної квадратичної регуляризації [6].

Для перевірки моделей було розв’язано декілька тестових задач. Вхідні дані заносились на лист Excel та вводились відповідні формули задач (1)–(3). Задачі розв’язувались надбудовою OpenSolver для Excel. Отримані результати підтверджують ефективність запропонованих моделей.

Висновки. Запропоновані нові оптимізаційні моделі оптимального розташування сервісних центрів. Проведені обчислювальні експерименти, які свідчать про їх ефективність.

ЛІТЕРАТУРА

1. Owen S.H., Daskin M.S. Strategic facility location: a review. *European Journal of Operational Research*. – 1998. № 11. P. 423–447.
2. Sahina G., Süralb H. A review of hierarchical facility location models. *Computers & Operations Research*. – 2007. № 34. P. 2310 – 2331.
3. Snyder, L. V. Facility location under uncertainty: a review. *IIE Transactions*. – 2006. № 38(7). – P. 547– 564, DOI:10.1080/07408170500216480.
4. Bruno G., Cerulli R., Gentili M. Models, algorithms and applications for location problems. *Optim. Letter*. – 2016. № 10. P. 871–873, DOI: 10.1007/s11590-016-1032-6.
5. Klose A., Drexel A. Facility location models for distribution system design. *European Journal of Operational Research*. – 2005. № 162(1). P. 4–29.
6. Kosolap A. *Practical Global optimization*. Dnipro: Publisher Bila K.O., 2020. 192 p.

OPTIMAL LOCATION OF SERVICE CENTERS

Anatolii Kosolap

Abstract. *We are considering the problem of optimal location of service centers. Such a problem constantly arises in the development of regional infrastructure. The principle of loss-making design is used in the work. It involves designing a multitude of service centers, among which only those that satisfy the optimality conditions remain. The input data for this problem are the time of customer service by each service center. The costs of opening a service center, the costs of hourly service and the costs of the entire project are also known. Various statements of this problem are considered. In particular, when some of the service centers are already operating, when the fee for providing services to customers is taken into account. Optimization models have been constructed, which are quadratic with Boolean variables. Several test problems have been solved, which confirm the adequacy of the models and their effectiveness for numerically solving problems of optimal location of service centers. The OpenSolver add-in for Excel was used to numerically solve the problems.*

Keywords: *optimization model, quadratic problem with Boolean variables, computational results.*

REFERENCES

1. Owen S.H., Daskin M.S. Strategic facility location: a review. European Journal of Operational Research. – 1998. № 11. P. 423–447.
2. Sahina G., Süralb H. A review of hierarchical facility location models. Computers & Operations Research. – 2007. № 34. P. 2310 – 2331.
3. Snyder, L. V. Facility location under uncertainty: a review. IIE Transactions. – 2006. № 38(7). – P. 547– 564, DOI:10.1080/07408170500216480.
4. Bruno G., Cerulli R., Gentili M. Models, algorithms and applications for location problems. Optim. Letter. – 2016. № 10. P. 871–873, DOI: 10.1007/s11590-016-1032-6.
5. Klose A., Drexel A. Facility location models for distribution system design. European Journal of Operational Research. – 2005. № 162(1). P. 4–29.
6. Kosolap A. Practical Global optimization. Dnipro: Publisher Bila K.O., 2020. 192 p.

ВИКОРИСТАННЯ СИСТЕМ КОМП'ЮТЕРНОЇ АЛГЕБРИ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІКИ ПРИВОДІВ КАНАТНИХ ДОРІГ

Куроп'ятник О. С.

Український державний університет науки і технологій, к. т. н., доцент, Україна

Анотація. У роботі розглянуто принципи формування математичної моделі динаміки приводу канатної дороги. Для проведення досліджень було обрано спрощений підхід до складання схеми динамічної системи, який полягає у приведенні мас окремих підсистем приводу до приводного шківів. Це дозволило представити математичну модель як систему рівнянь у формі деформацій ділянок тягового каната з використанням положень хвильової механіки. Для автоматизації складання системи рівнянь та проведення досліджень динаміки було використано програму, розроблену автором в системі комп'ютерної алгебри MathCAD. Застосування отриманих результатів дозволило в подальшому побудувати частотні діаграми приводів канатних доріг різних типів та уточнити значення швидкості руху вагонів з урахуванням необхідності попередження та обмеження резонансних явищ, виникнення яких є небезпечним для експлуатації таких транспортних засобів.

Ключові слова: канатна дорога; динаміка; математичне моделювання; MathCAD; система комп'ютерної алгебри

Будь-який транспортний засіб з гнучким тяговим органом, і зокрема, канатна дорога (КД) є досить складною системою з точки зору математичного моделювання динаміки її елементів. Вона характеризується наявністю зосереджених мас та елементів з розподіленими параметрами. Це визначає математичну модель руху елементів КД у вигляді системи диференціальних рівнянь у звичайних та часткових похідних, яка є досить громіздкою та складною для аналізу. Застосування систем комп'ютерної алгебри дозволяє суттєво спростити, прискорити і навіть автоматизувати процес складання математичних моделей динаміки механічних систем.

У роботі [1] моделюється динаміка канатів канатних доріг з використанням систем автоматизованого проєктування за різних характеристик матеріалу канатів, проте досліджуються лише поперечні коливання. У роботі [2] досліджено динаміку несучого і тягового канатів вантажної канатної дороги, визначено динамічні навантаження. Більш глибоке

дослідження проведено в роботі [3], проте не розглянуто питання впливу частотного спектру приводу на обмеження швидкості руху вагонів і не враховано можливості використання систем комп'ютерної алгебри для моделювання динаміки.

Метою даної роботи є обґрунтування доцільності використання систем комп'ютерної алгебри для моделювання динаміки приводів канатних доріг та розроблення програму, що здійснює формування математичної моделі, розрахунок власних чисел та власних частот в автоматизованому режимі в залежності від вказаних вихідних даних.

Для спрощення математичної моделі можна застосувати один з таких підходів:

- заміна елементів з розподіленими параметрами системою скінченної кількості зосереджених мас, що дозволяє складати математичну модель виключно з рівнянь Лагранжа II роду без використання часткових похідних;

- приведення мас окремих підсистем приводу до приводного шківів (рис. 1), що дозволяє складати математичну модель виключно з рівнянь хвильової механіки без використання звичайних похідних.

У межах даної роботи застосовуємо другий підхід. За таких умов математична модель, яка описує динаміку приводу КД, складається з рівнянь у формі деформацій ділянок тягового каната з використанням положень хвильової механіки [4]:

$$\begin{cases} \frac{\partial^2}{\partial t^2} U^H = a^2 \frac{\partial^2}{\partial x^2} U^H; \\ \frac{\partial^2}{\partial t^2} U^B = a^2 \frac{\partial^2}{\partial x^2} U^B, \end{cases} \quad (1)$$

де $U^H = \begin{bmatrix} u_i^H \end{bmatrix}$ – вектор деформацій ділянок тягового каната на нижньому напрямку руху вагонів ($i = \overline{1, n+1}$);

$U^B = \begin{bmatrix} u_i^B \end{bmatrix}$ – вектор деформацій ділянок тягового каната на верхньому напрямку руху вагонів ($i = \overline{1, n+1}$);

a – швидкість розповсюдження пружної хвилі у поздовжньому напрямку коливань.

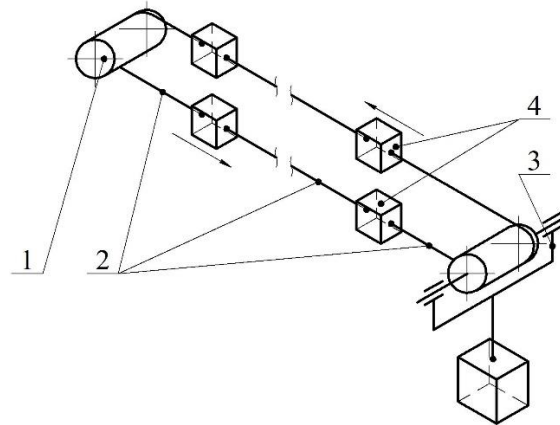


Рисунок 1 – Схема КД як динамічної системи:
1 – приводний шків; 2 – відрізки тягового каната;
3 – натяжний пристрій; 4 – вагони

Як граничні умови використовуємо по два рівняння для кожної із зосереджених мас КД, одне з яких відображає рівність деформацій ділянок тягового каната з обох боків зосередженої маси, а інше є рівнянням руху цієї маси. Наприклад, для i -ого вагона на нижньому напрямку руху граничні умови мають вигляд:

$$u_i^H(x_i^H, t) = u_{i+1}^H(x_i^H, t); \quad (2)$$

$$m_i^H \frac{\partial^2 u_i^H}{\partial t^2} \bigg|_{x=x_i^H} = EF \left(\frac{\partial u_i^H}{\partial x} - \frac{\partial u_{i+1}^H}{\partial x} \right) \bigg|_{x=x_i^H}, \quad (3)$$

де m_i^H – маса i -ого вагона на нижньому напрямку руху;

E, F – модуль пружності та площа перерізу тягового каната.

Для поєднання отриманих рівнянь у систему використовуємо умови спряження двох напрямків руху. Вони складаються за формою, подібною до вказаних граничних умов, і описують динаміку приводного шківів та натяжного пристрою тягового каната як зосереджених мас. Кількість рівнянь – по два для кожної з мас.

Математична модель, яка дозволяє досліджувати динаміку приводу КД, складається з багатьох рівнянь, кількість яких визначається кількістю вагонів. Вона вміщує чотири умови спряження виразів та по два рівняння для кожного з вагонів. Таким чином, дослідження динаміки приводу КД маятникового типу, яка має лише два вагони (по одному вагону на кожному з напрямків руху),

здійснюється за системою з восьми рівнянь. А для кільцевої дороги, що має 70 вагонів, математична модель складається з 144 рівнянь.

Застосування систем комп'ютерної алгебри (MathCAD, Maple тощо) дозволяє значно спростити процес формування математичної моделі та проведення подальших досліджень. Для системи MathCAD автором було розроблено спеціальну програму, що здійснює формування математичної моделі, розрахунок власних чисел та власних частот в автоматизованому режимі в залежності від вказаних вихідних даних. Ця програма містить такі блоки:

- вихідні дані (масові характеристики та параметри профілю дороги, представлені в матричній формі окремо по вагонах різних напрямків руху);
- програмна частина, у якій реалізовано алгоритм складання системи рівнянь з використанням циклу з кількістю ітерацій, що дорівнює кількості вагонів на одному напрямку руху, та формування частотної функції;
- результати (автоматизоване визначення власних чисел частотної функції та власних частот приводу КД).

Використання отриманих результатів дозволило побудувати частотні діаграми приводів канатних доріг різних типів та уточнити значення швидкості руху вагонів з урахуванням необхідності попередження та обмеження резонансних явищ, виникнення яких є небезпечним для експлуатації КД.

Висновок. Застосування систем комп'ютерної алгебри дозволяє суттєво спростити, прискорити і навіть автоматизувати процес складання математичних моделей динаміки механічних систем. Їх використання дозволило визначити власні частоти приводів канатних доріг та, в подальшому, побудувати частотні діаграми з метою уточнення значень швидкості руху вагонів з урахуванням необхідності попередження та обмеження резонансних явищ, виникнення яких є небезпечним для експлуатації КД.

ЛІТЕРАТУРА

1. Jena Sh. P., Ibrahim M., Subbaratnam B., Kumar S. N. Dynamic behavior of ropeway string. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 998, 012068. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/998/1/012068>

2. Qin J., Liu Ch., He R., Zhu L., Chen W., Chen W. Calculation method for structural dynamics of material ropeway under startup and shutdown conditions with single concentrated loads and distributed multiple loads. Journal of Physics: Conference Series. 2024. Vol. 2731, 012036. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2731/1/012036>
3. Zhao Chi, Jiang Yu., Ma Chi. Research on dynamic characteristics of the unit cableway of the overhead passenger device. Journal of Physics: Conference Series. 2023. Vol. 2660, 012047. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2660/1/012047>
4. Serhii Raksha, Oleksii Kuropiatnyk, Pavlo Anofriev, Dmytro Onoprechuk, Ihor Kovalov. Frequency analysis of vehicle drive with cable traction. MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 230, 01010. DOI: <https://doi.org/10.1051/matecconf/201823001010>

USE OF COMPUTER ALGEBRA SYSTEMS FOR SIMULATING THE ROPEWAYS DRIVES DYNAMICS

Oleksii Kuropiatnyk

Abstract. *The paper considers the principles of forming a mathematical model of the ropeway drive dynamics. For the research, a simplified approach to drawing up a dynamic system scheme was chosen, which consists in reducing the masses of individual drive subsystems to the drive pulley. This made it possible to present the mathematical model as a system of equations in the form of deformations of traction rope sections using the provisions of wave mechanics. To automate the drawing up of the system of equations and conduct dynamics research, a program developed by the author in the MathCAD computer algebra system was used. The application of the obtained results made it possible to further construct frequency diagrams of ropeways drives of various types and to specify the values of the cars speed, taking into account the need to prevent and limit resonance phenomena, the occurrence of which is dangerous for the operation of such vehicles.*

Keywords: *ropeway; dynamics; mathematical modeling; MathCAD; computer algebra system*

REFERENCES

1. Jena Sh. P., Ibrahim M., Subbaratnam B., & Kumar S. N. (2020). Dynamic behavior of ropeway string. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 998, 012068. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/998/1/012068> (in English)
2. Qin J., Liu Ch., He R., Zhu L., Chen W., & Chen W. (2024). Calculation method for structural dynamics of material ropeway under startup and shutdown conditions with single concentrated loads and distributed multiple loads. Journal of Physics: Conference Series, 2731, 012036. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2731/1/012036> (in English)
3. Zhao Chi, Jiang Yu., & Ma Chi (2023). Research on dynamic characteristics of the unit cableway of the overhead passenger device. Journal of Physics: Conference Series, 2660, 012047. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2660/1/012047> (in English)

4. Raksha S., Kuropiatnyk O., Anofriev P., Onopreychuk D., & Kovalov I. (2018). Frequency analysis of vehicle drive with cable traction. MATEC Web of Conferences, 230, 01010. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201823001010> (in English)

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ОБЧИСЛЮВАЛЬНА СКЛАДНІСТЬ ФОРМУВАННЯ ГРАФОВИХ ФРАКТАЛІВ НА ОСНОВІ КРИСТАЛІЧНИХ ҐРАТОК

Летучий О. І.¹, Шинкаренко В. І.²

¹Український державний університет науки і технологій, магістр, Україна

²Український державний університет науки і технологій, д.т.н., професор, Україна

Анотація. Визначення експериментальної обчислювальної складності формування графових фракталів дає змогу оцінити та порівняти між собою фрактали, які використовують різні типи кристалічних ґраток. Для моделювання графових фракталів розроблено програму на мові C# з окремим модулем для підрахунку відповідних показників. Для генерації фракталів використовується підхід конструктивно-продукційної моделювання на основі формальних граматик, який складається з низки перетворень та дає гнучкі можливості з налаштування генерації графових фракталів. Обчислювальна складність вираховувалась на основі підрахунку операцій арифметичних, порівняння, присвоєння, переходу під час формування фракталів. Визначені залежності від типу використаної кристалічної ґратки та кількості використаних ітерацій. Встановлено, що асимптотична складність алгоритму формування фрактальних ґраток $O(a^*)$.

Ключові слова: показники; обчислювальна складність, фрактали, граф, програмне забезпечення, інформаційні технології, формальні граматики.

Вступ. Фрактал – це геометрична структура, яка має властивість самоподібності, при зміні масштабу, можна побачити повторювані схожі візерунки або патерни [1]. Фрактали знаходять застосування у фізиці, біології, радіотехніці, інформатики тощо. Як приклад можна навести генерацію складних зображень природних об'єктів, таких як гірські ландшафти [2], дерева, поверхні морів, хмари, вогонь.

Кристалічна ґратка – це впорядкована тривимірна структура, яка описує регулярне розташування атомів, іонів або молекул у кристалі. Вона використовується для пояснення фізичних властивостей твердих тіл, таких як міцність, провідність чи оптичні характеристики, а також для моделювання й аналізу матеріалів у науці та техніці [3-4].

Графові фрактали поєднують властивості фракталів та графів [5-6]. Особливістю таких фракталів є графові вершини, які можуть бути навантажені

координатами у просторі, різними фізичними або хімічними властивостями. Прикладом графових фракталів може виступати кристалічна ґратка.

Експериментальна обчислювальна складність – це галузь дослідження в теорії алгоритмів і обчислювальної математики, яка фокусується на емпіричному вивченні складності алгоритмів та програм шляхом проведення експериментів [7]. На відміну від теоретичного аналізу складності, що базується на математичних оцінках часу чи простору в найгіршому, середньому або найкращому випадках, експериментальна обчислювальна складність вивчає фактичні показники алгоритмів.

Для моделювання фракталів можна використовувати наступні підходи: алгоритмічний, функціонально-алгоритмічний із застосуванням системи ітерованих функцій на основі сукупності стискаючих відображень, афінних автоматів, L-систем. Нами застосовано підхід конструктивно-продукційної моделювання (КПМ) на основі формальних граматик [8-9].

КПМ включає в себе конструктивно-продукційну структуру, яка є послідовністю з трьох складових:

$$C = \langle M, \Sigma, \Lambda \rangle,$$

де M – неоднорідний носій структури, Σ – сигнатура, що складається з безлічі операцій зв'язування, підстановки і висновку, операцій над атрибутами і відносин підстановки, Λ – інформаційне забезпечення, яке включає: онтологію, ціль, правила, обмеження, умови початку та завершення конструювання.

Основна частина. Для реалізації моделювання фракталів за допомогою КПМ та проведення досліджень експериментальної обчислюваної складності написана програма на мові C# в об'єктно-орієнтованому стилі, на фреймворку .NET Framework 4.8.1, див Рисунок 6. Графічний інтерфейс користувача написано у розмітці XAML із виростанням фреймворку WPF.

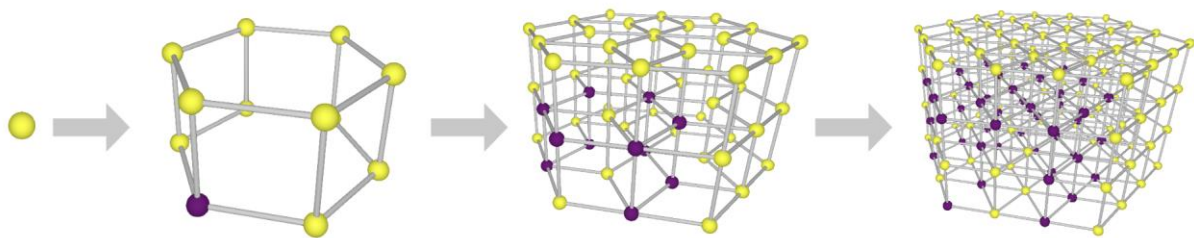


Рисунок 6 – Послідовність сентенційних форм графового фракталу на основі гексагональної кристалічної ґратки

Основні операції, які задіяні для підрахунку показників обчислювальної складності формування мультиатрибутивних просторових графових фракталів: арифметичні (arithmetic), присвоєння (assignment), порівняння (comparison), переходу (jump).

Для цього було переглянута дизасимбльована версія коду на мові C# Рисунок 7, та написана версія алгоритму з додатковими лічильниками операцій.

```

00007FFCDF621BEC mov     rcx,qword ptr [rbp+1A0h]
00007FFCDF621BF3 mov     rcx,qword ptr [rcx+10h]
00007FFCDF621BF7 cmp     dword ptr [rcx],ecx
00007FFCDF621BF9 call    System.Collections.Generic.List`1[[System.__Canon, mscorlib]].Clear() (07FFD3CAE9CB8h)
00007FFCDF621BFE nop

        for (int i = 0; i < Graph.Vertices.Count; i++)
00007FFCDF621BFF xor     ecx,ecx
00007FFCDF621C01 mov     dword ptr [rbp+174h],ecx
00007FFCDF621C07 nop
00007FFCDF621C08 jmp     Crystal.Services.CrystalServiceComponents.Abstraction.Constructor.PerformeSubstitution()+043Dh (07FFCDF621FDDh)
        {
00007FFCDF621C0D nop
            var vertice = Graph.Vertices[i];
00007FFCDF621C0E mov     rcx,qword ptr [rbp+1A0h]
00007FFCDF621C15 call    Crystal.Services.CrystalServiceComponents.Abstraction.Constructor.get_Graph() (07FFCDF2BEF18h)
00007FFCDF621C1A mov     qword ptr [rbp+108h],rax
00007FFCDF621C21 mov     rcx,qword ptr [rbp+108h]
00007FFCDF621C28 mov     r11,offset Pointer to: CLRStub[VSD_LookupStub]@7ffcdef8bb40 (07FFCDEF83298h)
00007FFCDF621C32 cmp     dword ptr [rcx],ecx
00007FFCDF621C34 call    qword ptr [Pointer to: CLRStub[VSD_LookupStub]@7ffcdef8bb40 (07FFCDEF83298h)]
00007FFCDF621C3A mov     qword ptr [rbp+108h],rax
00007FFCDF621C41 mov     rcx,qword ptr [rbp+108h]
00007FFCDF621C48 mov     edx,dword ptr [rbp+174h]

```

Рисунок 7 – Приклад дизасимбльованого коду на мові C# в режимі відладки в середовищі Visual Studio

Порівнюватися будуть просторові графові фрактали, які побудовані за допомогою різних типів кристалічних ґраток. Для генерації кожного графового фракталу буде виконуватись десять ітерацій росту фрактала. На основі отриманих даних будуть складені графіки залежності кількості операцій під час виконання кожної ітерації, Рисунок 8. Як приклад наведено експеримент з формування просторового графу з властивостями гексагональної кристалічної ґратки.

Таблица 1

Кількість операцій на кожен крок росту фракталу

№	Arithmetics	Assignments	Comparisons	Jumps	Total
1	547	1155	605	318	2625
2	6017	12235	6410	3348	28010
3	25162	50616	26528	13820	116126
4	55794	112094	58751	30598	257237
5	111041	222721	116741	60774	511277
6	187621	376119	197150	102620	863510
7	298662	598340	313640	163228	1373870
8	440882	883006	462863	240870	2027621
9	627409	1256169	658481	342638	2884697
10	854961	1711451	897146	466804	3930362

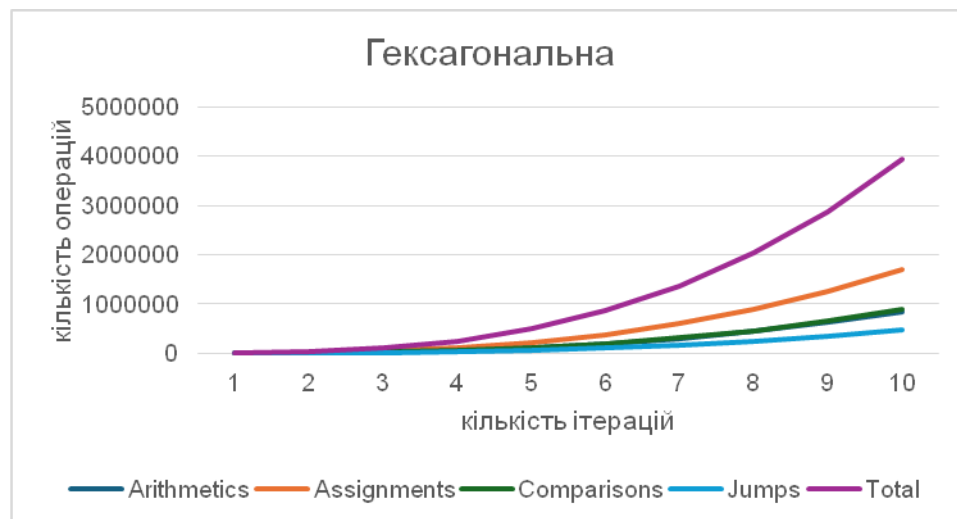


Рисунок 8 – Залежність кількості операцій від кількості ітерацій росту графового фракталу з гексагональним типом кристалічної ґратки

На основі отриманих даних залежності кількості операцій від кількості ітерацій росту графового фракталу виконано розрахунки для знаходження попередньої аналітичної залежності $y = f(x, a, b)$, вид якої є дрібно-раціональний.

Введено заміну змінних $z=1/y$ та $q=1/x$ щоб в площині qOz отримати лінійну залежність. За допомогою методу найменших квадратів знайдемо параметри a та b :

$$b = \frac{n * \sum_{i=1}^n x_i * y_i - \sum_{i=1}^n x_i * \sum_{i=1}^n y_i}{n * \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2} = 0.00322$$

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n y_i - b * \sum_{i=1}^n x_i}{n} = -0.00044$$

Кінцева функція має вигляд:

$$y = \frac{x}{0.00039 + 0.00007 * x}$$

Коефіцієнт кореляції $r=.093$.

Висновок. На основі отриманих даних визначено тип аналітичної залежності. Для визначення параметрів аналітичної залежності використовується метод найменших квадратів, попередньо провівши заміну змінних за потреби. Це надає можливість прогнозування часу формування великих кришталевих ґраток для подальшого їх дослідження.

ЛІТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Banerjee S., Hassan M.K., Mukherjee S., Gowrisankar A. Fractal Patterns in Nonlinear Dynamics and Applications, CRC Press. – 2019. №1. P. 35-72. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781315151564>
2. Jiang B., Brandt S. A Fractal Perspective on Scale in Geography. ISPRS International Journal of Geo-Information. – 2016. №5(6). DOI: <https://doi.org/10.3390/ijgi5060095>
3. Wang L., Zeng X., Yang H., Lv X., Guo F., Shi Y., Hanif A. Investigation and application of fractal theory in cement-based materials: A review. Fractal and Fractional. – 2021. №5(4). DOI: <https://doi.org/10.3390/fractalfract5040247>
4. Müller U., De La Flor G. Symmetry relationships between crystal structures: applications of crystallographic group theory in crystal chemistry, Oxford University Press. – 2024. №24. P. 243-251.
5. Shynkarenko V., Letuchyi O., Chyhir R. Constructive-synthesizing modeling of fractal crystal lattices, 18th IEEE International Conference on Computer Science and Information Technologies (CSIT). – 2023. DOI: <https://doi.org/10.1109/CSIT61576.2023.10324251>
6. Ille P., Woodrow R. Fractal graphs. Journal of Graph Theory. – 2019. №91(1). P. 53-72. DOI: <https://doi.org/10.1002/jgt.22420>
7. Downey A. Think complexity: complexity science and computational modeling. O'Reilly Media, Inc. – 2018.
8. Skalozub V., Ilman V. Shynkarenko V. Ontological support formation for constructive-synthesizing modeling of information systems development processes, Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2018. Vol. 5. №4(95). P. 55–63. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.143968>
9. Shynkarenko V. I. Constructive-Synthesizing Representation of Geometric Fractals. Cybernetics and Systems Analysis. – 2019. №55. P. 186-199. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10559-019-00123-w>

Graph fractals with the variability of the formation process

Oleksandr Letuchyi, Viktor Shynkarenko

Abstract. *The determination of the experimental computational complexity of the formation of graph fractals allows us to evaluate and compare fractals that use different types of crystal lattices. A program in the C# language with a separate module for calculating the corresponding indicators was developed for the modeling of graph fractals. The approach of constructive-synthesizing modeling based on formal grammars is used for the generation of fractals, which consists of a number of transformations and provides flexible options for configuring the generation of graph fractals. The computational complexity was calculated based on the calculation of arithmetic operations, comparisons, assignments, and jumps during the formation of fractals. Dependencies on the type of crystal lattice used and the number of iterations used were determined. It was established that the asymptotic complexity of the algorithm for forming fractal lattices is $O(a^x)$.*

Keywords: *indicators; computational complexity, fractals, graph, software, information technology, formal grammars.*

ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ ІГРОВИХ РУШІЇВ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ ПРОМИСЛОВОГО ОБЛАДНАННЯ

Ломоносов В.В.¹, Анісімов В.В.²

¹УДУНТ, студент, Україна

²УДУНТ, к. т. н., доцент, Україна

Анотація. Ця робота присвячена аналізу можливостей використання ігрових рушіїв для моделювання роботи обладнання в технічних галузях. У роботі розглядаються основні підходи класифікації рушіїв, що базуються на параметрах просторової репрезентації (2D та 3D), потужності фізичного ядра та методах програмування (класичне та візуальне). Такий підхід дозволяє об'єктивно оцінити функціональні можливості окремих рушіїв та їхню придатність для конкретних завдань. Для практичного аналізу обрано три популярних рушії – Unreal Engine, Unity та Godot, результати дослідження представлені у вигляді порівняльної таблиці. На основі проведеного аналізу зроблено висновок, що саме Unreal Engine завдяки своїй потужній фізичній моделі та можливостям візуального програмування є оптимальним варіантом для симуляції складних фізичних процесів у промислових умовах.

Ключові слова: ігрові рушії, моделювання, класифікація, промислове обладнання, Unreal Engine, Unity, Godot.

Ігрові рушії з'явилися не так давно на ринку, і ще не всі аспекти їх використання вивчені. За своїм основним призначенням вони переважно використовуються для розробки ігор, проте можуть успішно застосовуватись і для моделювання роботи обладнання у технічних галузях. Зараз відомо вже велика кількість ігрових рушіїв, кожен з яких має свої переваги і недоліки. Для того щоб визначити, який рушій найкраще підійде для вищеписаних задач є доцільною їх класифікація.

Ігрові рушії в першу чергу класифікують за параметром просторової репрезентації: двовимірні (2D) та тривимірні (3D) [1]. Проте така класифікація є занадто загальною та не дозволяє об'єктивно оцінити доцільність використання рушія для конкретного завдання.

Інший підхід базується на методі створення програмного коду: класичне (текстове) програмування та візуальне програмування. Цей критерій є більш

інформативним, однак також не забезпечує вичерпної оцінки функціональних можливостей рушія.

З огляду на це, доцільно класифікувати рушії за сукупністю кількох ключових параметрів:

- тип простору: 2D, 3D,
- фізичне ядро: сильне, слабе, відсутнє,
- метод програмування: візуальне програмування, класичне програмування.

Якщо об'єднати всі ці критерії, можна більш точно класифікувати рушії та визначити їхню придатність для конкретних завдань.

Наприклад треба симулювати роботу обладнання на деякому підприємстві. Для такої роботи потрібен рушій котрий може симулювати складні фізичні процеси в тривимірному просторі.

Для практичного аналізу обрано три найпопулярніших рушії: Unreal Engine, Unity, Godot.[2] Нижче наведено порівняльну таблицю (табл. 1) по запропонованими критеріями:

Таблиця 1

Порівняльна таблиця рушіїв.

Рушій	Простір	Фізичне ядро	Тип програмування
Unreal engine	3d/2d (переважно 3d)	Сильне	Класичне програмування, візуальне програмування
Unity	3d/2d (переважно 2d)	Слабе	Класичне програмування. Візуальне програмування (частково)
Godot	3d/2d (переважно 2d)	Слабе	Класичне програмування

На основі отриманої класифікації можна прийти до висновку, що для симуляції роботи обладнання на підприємстві найбільш підходить Unreal Engine, тому що він може симулювати складні фізичні процеси на відміну від інших рушіїв. Він має потужну фізичну модель, що дозволяє моделювати складні фізичні процеси. Також він має підтримку візуального програмування, що робить його доступним для користувачів без глибоких знань у програмуванні.

Висновки. Використання ігрових рушіїв як інструментів для технічного моделювання є перспективним напрямом, особливо в умовах обмеженого

доступу до спеціалізованого програмного забезпечення. Зокрема, відкритість платформ Unity, Godot та Unreal Engine забезпечує широкі можливості для їхнього застосування у виробничих цілях.

ЛІТЕРАТУРА

1. Класифікація рушіїв: веб-сайт. URL: <https://jahmelcoleman.wordpress.com/games-development/game-engines/> (дата звернення: 12.04.2025).
2. Популярні рушії в 2024: веб-сайт. URL: <https://gamefromscratch.com/game-engine-popularity-in-2024/> (дата звернення: 12.04.2025).

PROSPECTS FOR THE USE OF GAME ENGINES FOR MODELING THE OPERATION OF INDUSTRIAL EQUIPMENT

Lomonosov Valentyn, Anisimov Volodymyr

Abstract. *This investigation analyzes the possibilities of using game engines to simulate the operation of equipment in technical fields. The investigation discusses the main approaches to classifying engines based on the parameters of spatial representation (2D and 3D), the power of the physical core, and programming methods (classical and visual). This approach allows us to objectively assess the functionality of individual engines and their suitability for specific tasks. Three popular engines - Unreal Engine, Unity and Godot - were selected for practical analysis, and the results of the study are presented in the form of a comparative table. Based on the analysis, it is concluded that the Unreal Engine, due to its powerful physical model and visual programming capabilities, is the best option for simulating complex physical processes in industrial environments.*

Keywords: *game engines, modeling, classification, industrial equipment, Unreal Engine, Unity, Godot.*

REFERENCES

1. Klyasyfikatsiia rushiiv: veb-sait. URL: <https://jahmelcoleman.wordpress.com/games-development/game-engines/> (data zvernennia: 12.04.2025) [in English].
2. Populiarni rushii v 2024: veb-sait. URL: <https://gamefromscratch.com/game-engine-popularity-in-2024/> (data zvernennia: 12.04.2025) [in English].

DEVELOPMENT OF A METHODOLOGY FOR DESIGNING A SIMULATION MODEL OF A GRAIN COLLECTION AND TRANSPORTATION COMPLEX

Lubko D.V.

Candidate of Technical Sciences,

Associate Professor of the Department of Computer Science

Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University

Abstract. *The relevance of the topic of the work is determined by the fact that the use of simulation modeling allows you to assess the efficiency of the collection and transport complex, identify its bottlenecks, reduce costs and increase productivity [1]. In agricultural production, the most widespread are systems of mass service with waiting. These are systems in which the request received at a given time (all service channels are busy) is queued and waits until the channel is free. Thus, a combine with a full hopper does not leave the system and waits for the next vehicle to unload grain. If a request received in the system (stopping a combine with a full hopper), finds all the vehicles busy loading other combines, it is forced to wait its turn until one of the vehicles is free. After servicing (unloading the hopper), the combines are again serviced after some time.*

Keywords: *grain harvesting and transport complex, work flow chart, GPSS, simulation model, design.*

Introduction. Simulation modeling is a method of studying complex systems by creating a digital or mathematical model of them and conducting experiments to analyze the behavior of the system under different conditions [3].

Let us consider the main features of simulation modeling: dynamic reproduction of processes (the model allows us to estimate the change in parameters over time); discrete-event or continuous approach (models can be based on sequential events or continuous processes); analysis of options (you can change input parameters and work scenarios to optimize processes); use of software tools (models are implemented in specialized environments, such as AnyLogic, Arena, Simulink, Python, MATLAB, GPSS, etc.).

In the agricultural sector, simulation modeling helps to predict the efficiency of equipment, optimize transportation routes, and reduce harvesting costs, etc. [2]. Or, for example, to develop a simulation model of the operation of a grain harvesting and transport complex, which is currently very relevant for our country. The relevance is also determined by the fact that the use of simulation modeling allows

you to assess the efficiency of such a complex, identify bottlenecks, reduce costs, and increase productivity.

Basic material. Designing a simulation model of a grain harvesting and transportation complex is an important stage in optimizing the process of grain harvesting and transportation [4]. Here is a detailed methodology for designing a simulation model of a grain harvesting and transportation complex:

Stage 1: System description. Such a complex usually consists of the following main components: combine harvesters; loading bunkers; vehicles for transporting grain (trucks, tractors with trailers); grain reception and storage points

Stage 2: Problem statement (Main tasks of designing a simulation model: determining the operating parameters of combines and transport; analyzing the impact of the number of units of equipment on productivity; determining optimal transportation routes; minimizing equipment downtime.

Stage 3: Methodology. A discrete-event modeling approach is used to create a simulation model. The main tools for implementing the model are: software (AnyLogic, Arena, Simulink, Python, GPSS); data on the productivity of combines and vehicles; geospatial data of fields and routes.

Stage 4: Model development. The model includes the following stages: collection of initial data (machine characteristics, field maps); construction of process logic (combine movement, bunker loading, transportation); setting parameters and work scenarios; conducting simulation experiments.

Stage 5: Analysis of results. After running the simulation scenarios, the following are analyzed: execution time of main operations; workload and idle equipment; optimal operating parameters of the complex; fuel consumption and economic efficiency.

Preliminary conclusions. Simulation modeling allows you to make informed decisions about the organization of the work of a grain harvesting and transport complex. Analysis of the results helps to increase the efficiency of harvesting, optimize the use of equipment and reduce operating costs.

Let us describe in detail the principle of operation of the simulation model we developed. The block diagram of the developed modeling program is shown in Figure 1.

The simulation begins when the harvester (combine) starts harvesting. The service channels are vehicles. The system is a closed multi-channel mass service system. The flow of service requests (applications) in it is characterized by the intensity - λ , and the throughput of the application service channels is characterized by the service intensity - μ .

A combine harvester filled with grain is queued (CHER) to wait for a free vehicle.

When entering the TRAN service device, it places a unit in the BUNKER (memory cell) and is delayed until this cell is equal to zero (Fig. 1).

Having detected an empty BUNKER, the combine immediately leaves the device and frees up space for the next one. Statistics of transport waiting for combines are collected using the CHER block. Then, after a delay for unloading, the transact returns to the beginning of the cycle. After the end of the shift, the transacts are removed from the model (simulation of the end of work).

Using the SAVEVALUE $Tp(QT\$CHER+1/\mu)$ and SAVEVALUE $Lch QA\$CHER$ blocks, the waiting time of combines in the queue and the average queue length, i.e. the number of combines waiting for a vehicle, are determined, respectively (Fig. 1).

Note. In this model, we do not take into account the transportation of grain by vehicles to the receiving point and their unloading, although for the completeness of the experiment it is necessary to take into account all factors. We will limit ourselves only to the distribution of combines by vehicles.

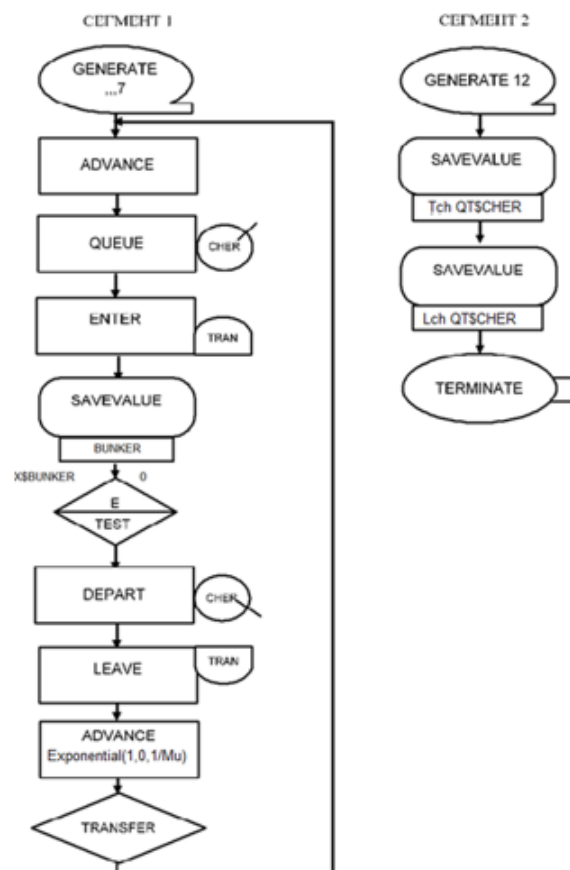


Figure 1 - Structural diagram of the simulation model

According to this flowchart, you can then implement the program code in the GPSS package.

Conclusions. A methodology for designing a simulation model of a grain harvesting and transport complex has been developed.

REFERENCE

1. Domuschi D., Ustuyanov P., Yenakiev Yu., Lipin A. Efficiency of use of collection and transport complexes in terms of operational and energy indicators. 2019. [in Ukrainian].
2. Lubko D.V., Sharov S.V., Zinov'eva O.G. Designing a simulation model of the operation of a manure cleaning technological line on a livestock farm. Scientific notes of the V.I. Vernadsky Tavrichesky National University. Series: Technical Sciences. 2022. Vol. 33(72). No. 3. S. 56 – 60. [in Ukrainian].
3. Kravets I.O. Simulation modeling: a teaching aid for practical work in the disciplines of "System modeling" and "Situational models". Petro Mohyla Black Sea State University. Mykolaiv: Petro Mohyla Black Sea State University, 2010. 107 p. [in Ukrainian].
4. Zagoryansky V.G., Gaikova T.V., Khorolsky V.L., Kuzev I.O. Modeling the composition of the harvesting and transport complex for grain harvest as a mass service system. Bulletin of the Kremenchug National University named after Mykhailo Ostrohradsky. 2019. No. 2. S. 146 – 151. [in Ukrainian].

РОЗРОБКА МЕТОДОЛОГІЇ ПРОЕКТУВАННЯ ІМІТАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ ЗЕРНОВОГО ЗБИРАЛЬНО-ТРАНСПОРТНОГО КОМПЛЕКСУ

Лубко Д.В.

Анотація. Актуальність теми роботи визначається тим, що використання імітаційного моделювання дозволяє оцінити ефективність роботи збирально-транспортного комплексу, визначити вузькі його місця, зменшити витрати та підвищити продуктивність. У сільськогосподарському виробництві найбільшого поширення набули системи масового обслуговування з очікуванням. Це такі системи, в яких заявка, що надійшла в момент часу (всі канали обслуговування зайняті), стає в чергу і чекає, поки не звільниться канал. Так, комбайн з наповненим бункером не залишає систему і чекає на черговий автомобіль для вивантаження зерна. Вимога, що надійшла в систему (зупинка комбайна з повним бункером), якщо застає все автомобілі зайнятими завантаженням інших комбайнів, змушене чекати своєї черги до тих пір, поки не звільниться один з автомобілів. Після обслуговування (розвантаження бункера) комбайни через деякий час знову стають на обслуговування.

Ключові слова: зерновий збирально-транспортний комплекс, блок-схема роботи, GPSS, імітаційна модель, проектування.

ЛІТЕРАТУРА

1. Домущі Д., Устюянов П., Єнакієв Ю., Ліпін А. Ефективність використання збирально-транспортних комплексів по експлуатаційним та енергетичним показникам. 2019.
2. Лубко Д.В., Шаров С.В., Зінов'єва О.Г. Проектування імітаційної моделі роботи технологічної лінії очищення гною на тваринницькій фермі. Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. 2022. №33(72). С. 56 – 60.
3. Кравець І.О. Імітаційне моделювання: навч. посіб. до виконання практ. робіт із дисциплін «Моделювання систем» та «Ситуаційні моделі». Чорномор. держ. ун-т ім. Петра Могили. Миколаїв: ЧДУ ім. Петра Могили, 2010. 107 с.
4. Загорянський В.Г., Гайкова Т.В., Хорольський В.Л., Кузев І.О. Моделювання складу збирально-транспортного комплексу для врожаю зернових як системи масового обслуговування. Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. 2019. №2. С. 146 – 151.

ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ФЛАНЦЕВОГО З'ЄДНАННЯ

Лях М.М.,¹ Дейнега Р.О.,² Михайлюк В.В.,³ Федорович Я.Л.⁴

¹ ІФНТУНГ, канд. техн. наук, професор, Україна

² ІФНТУНГ канд. техн. наук, доцент, Україна

³ ІФНТУНГ канд. техн. наук, доцент кафедри, Україна

⁴ ІФНТУНГ, здобувач першого (бакалаврського) рівня, Україна

Анотація. Трубопровідна арматура є невід'ємною складовою будь яких трубопровідних систем, починаючи від житлово-комунального господарства і закінчуючи системами з підвищеними вимогами до технічної безпеки. До останніх належать системи нафтогазовидобувних та нафтогазопереробних підприємств системи водопостачання теплових електростанцій, основні контури атомної електростанції тощо. У цих галузях промисловості висувається підвищені вимоги до міцності та надійності всіх елементів арматури, особливо фланцевих та різьбових з'єднань. Фланець є основним елементом з'єднання трубопровідних конструкцій, забезпечуючи міцне та щільне роз'ємне з'єднання. Фланцеві з'єднання прості за конструкцією, їх можна легко розбирати та складати. Існує велика кількість різноманітних конструкцій фланцевих з'єднань. Раніше спроби проектування фланців базувалися на грубих і простих припущеннях. Однак сьогодні для дослідження роботи фланцевих з'єднань застосовують сучасні методи, такі як метод скінченних елементів. Для цього використовується спеціалізоване програмне забезпечення, яке окрім розрахунку напружено-деформованого стану дозволяє прогнозувати довговічність з'єднань, знос від дії абразивного середовища тощо. Це значно прискорює проектування та дослідження фланцевих з'єднань, а й забезпечує високу точність отриманих результатів.

Ключові слова: нафтогазове обладнання, фланцеве з'єднання, фланець, імітаційне моделювання, метод скінченних елементів, напруження, контактний тиск.

Фланцеві з'єднання трубопроводів та різноманітного обладнання є одними із найпоширеніших типів з'єднань завдяки простоті конструкції, можливості розбирання та складання [1]. Проте, навіть незважаючи на те що вони на даний час є досить вивчені, вони таки потребують подальших досліджень та вдосконалень, особливо із врахуванням умов їх роботи.

Дослідження роботи фланцевих з'єднань та їх особливостей наведено у публікація [2, 3]. У них розглядаються як алгоритми проектування, аналітичні розрахунки та застосування методу скінченних елементів. Основну увагу зосереджено на те, що при проектуванні фланцевих з'єднань значна увага приділяється визначенню їх міцності, зміні герметичності внаслідок впливу зовнішніх факторів приділяється недостатня увага. Також у цих працях порівнюються результати імітаційного моделювання фланцевих з'єднань із аналітичними розрахунками та встановлено, що вони добре узгоджуються.

Метою даної роботи є дослідження напружено-деформованого стану елементів фланцевого з'єднання з врахуванням особливостей контактування труби із ґрунтом та горизонтального зусилля, яке може виникнути від впливу зовнішніх чинників.

Для виконання роботи побудовано модель фланцевого з'єднання, трубопроводу та ділянки ґрунту (рис. 1). На рисунку 2 показано стандартне фланцеве з'єднання яке містить на одному фланці кільцевий шип, на іншому – кільцевий паз та прокладку.

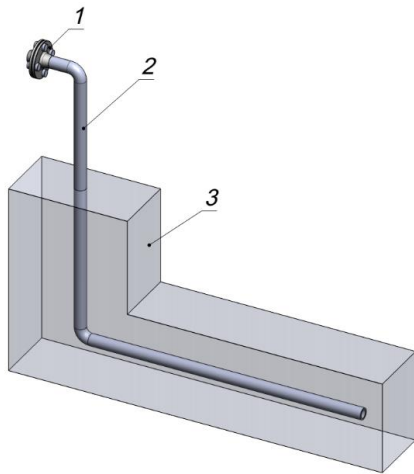


Рисунок 1 – Модель для дослідження
1 – фланцеве з'єднання; 2 – труба; 3 – ґрунт

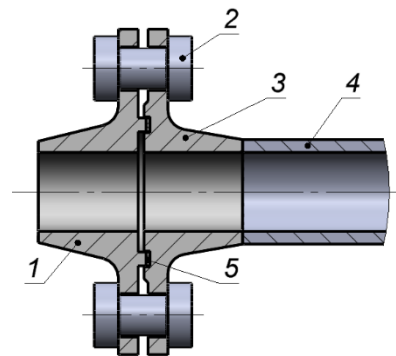


Рисунок 2 – Фланцеве з'єднання
1 – фланець з кільцевим шипом;
2 – шпилькове (болтове) з'єднання;
3 – фланець з кільцевим пазом; 4 – труба;
5 – кільцева фторопластова прокладка

Всі використані величини прийняті умовно для можливості розроблення алгоритму дослідження напружено-деформованого стану елементів фланцевого з'єднання.

У елементах моделі для дослідження прийнято властивості матеріалів, які подано у таблиці 1.

Таблиця 1

Властивості матеріалів

№ з/п	Матеріал	Модуль Юнга, Па	Коефіцієнт Пуассона
1	Сталь	200000000000	0,26
2	Фторопласт-4	833565250	0,2
3	Грунт 1	2900000	0,4

Для дослідження модель розбито на сітку скінченних елементів до якої застосовані окремі налаштування з метою її оптимізації для підвищення точності отриманих результатів.

На рисунку 3 показано розрахункову схему, згідно якої ґрунт 3 обмежений у переміщенні, а на фланець 1 діє переміщення у горизонтальному напрямку на величину 4 мм. При цьому труба 2 розміщена у ґрунті 3 з коефіцієнтом тертя близьким 1.

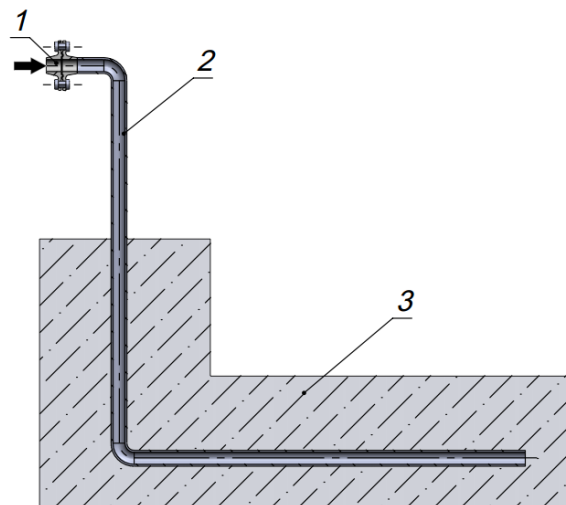


Рисунок 3 – Розрахункова схема. 1 – фланцеве з'єднання; 2 – труба; 3 – ґрунт

При дослідженні враховано тертя між елементами фланцевого з'єднання, який прийнято рівним 0,2.

Оскільки фланцеве з'єднання вибране з технічної документації на тиск 6 МПа, то прийнято, що контактний тиск на поверхні контакту «фланець-прокладка» має бути більшим за робочий у 1,5 рази. Тому для забезпечення герметичності з'єднання контактний тиск має бути не менше 9 МПа.

На першому етапі дослідження проведено визначення сили на шпильковому з'єднанні, при якій контактний тиск на поверхні контакту «фланець-прокладка» дорівнював 9 МПа.

На рисунку 4 показано розподіл контактного тиску на поверхні контакту «фланець-прокладка» при дії тільки осьового зусилля. У всіх контрольних точках величини контактного тиску є більшими 9 МПа.

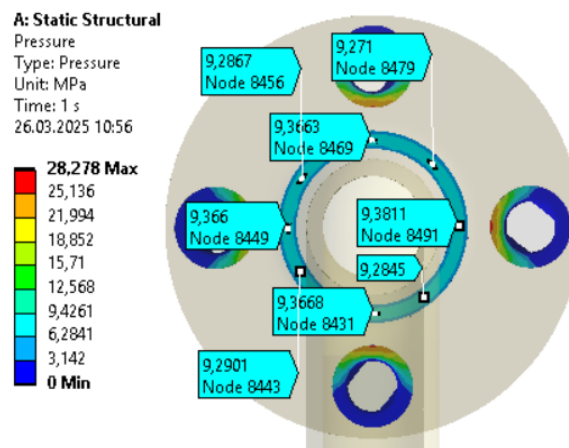


Рисунок 4 – Розподіл контактної тиску на поверхні контакту «фланець-прокладка»

На другому етапі дослідження проведено імітаційне моделювання з'єднання з врахуванням розрахункової схеми, яка наведена на рисунку 3. Розподіл контактної тиску за такої схеми навантаження показано на рисунку 5.

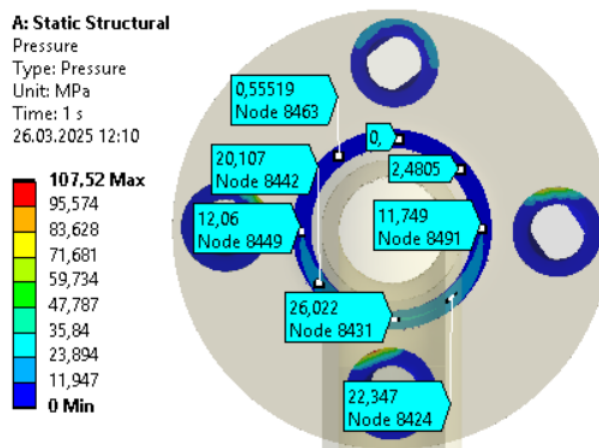


Рисунок 5 – Розподіл контактної тиску на поверхні контакту «фланець-прокладка»

Отже, за такої схеми навантаження відбувається перерозподіл контактної тиску на поверхні контакту «фланець-прокладка», з однієї

сторони він зростає до 22 МПа, а з іншої знижується до 0 МПа (рис. 5). Це означає, що таке з'єднання втратило герметичність.

Висновки. Встановлено, що на герметичність фланцевих з'єднань впливають в основному як конструктивні їх виконання, матеріали з яких виконані їх елементи, моменти згвинчування різьбових з'єднань та ряд зовнішніх факторів, а саме фізичних властивостей ґрунтів, які контактують з трубою, кліматичних умов тощо. Проте, окрім вищезгаданих чинників на герметичність таких з'єднань також впливають вібрації, що спричинені пульсацією тиску рідини чи газу, які в подальшому доцільно дослідити та враховувати під час проектування фланцевих з'єднань.

ЛІТЕРАТУРА

1. Мікульонок, І. О., Карвацький, А. Я., Іваненко, О. І., & Лелека, С. В. (2023). Фланцеві з'єднання обладнання і трубопроводів хімічної технології. Вісник НТУУ "КПІ імені Ігоря Сікорського". Серія: Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження, (2), 15–31. <https://doi.org/10.20535/2617-9741.2.2023.283516>
2. Khan, Niaz & Abid, Muhammad & Jameel, Mohammed & Wajid, Hafiz. (2015). Joint strength of gasketed bolted pipe flange joint under combined internal pressure plus axial load with different (industrial and ASME) bolt-up strategy. ARCHIVE Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part E Journal of Process Mechanical Engineering 1989-1996 (vols. 10.1177/0954408915614460
3. Elkhaidy, Influence of flange geometric configuration and bolt stress on joint integrity during assembly using FEA, Int. J. Pres. Ves. Pip., № 202 DOI: 10.1016/j.ijpvp.2023.104912

RESEARCH OF THE STRESS-STRAIGHTENING STATE OF A FLANGE CONNECTION

Liakh Mykhailo, Deineha Ruslan, Mykhailiuk Vasyl, Fedorovych Yaroslav.

Abstract. *Pipe fittings are integral component of any pipeline systems, starting from housing and communal services farms and ending with systems with increased technical requirements security systems. The latter include oil and gas production and oil and gas refining enterprises systems water supply thermal power plants, main contours atomic power plants etc. In these industries industry is being put forward elevated requirements for strength and reliability all elements fittings, especially flanged and threaded connections. The flange is the main element connection pipeline structures, providing strong and dense detachable connection. Flanged connection simple in design, their can be easily disassembled and assembled. There are a large number various structures*

flanged connections. Previously attempts designing flanges were based on crude and simple assumptions. However today for research works flanged connections apply modern methods such as the finite element method elements. For this used specialized software provision, which in addition to calculation of the stress- strain state allows to predict durability joints, wear from effects of abrasive media etc. This much accelerates design and research flanged connections, but also provides high precision received results.

Keywords: *oil and gas equipment, flange connection, flange, simulation modeling, finite element method, stress, contact pressure.*

REFERENCE

1. Mikulionok I., Karvatskii, A., Ivanenko, O., & Leleka, S. (2023). Flange connections of chemical technology equipment and pipelines. Bulletin of NTUU «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Series «Chemical Engineering, Ecology and Resource Saving», (2), 15–31. <https://doi.org/10.20535/2617-9741.2.2023.283516>
2. Khan, Niaz & Abid, Muhammad & Jameel, Mohammed & Wajid, Hafiz. (2015). Joint strength of gasketed bolted pipe flange joint under combined internal pressure plus axial load with different (industrial and ASME) bolt-up strategy. ARCHIVE Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part E Journal of Process Mechanical Engineering 1989-1996 (vols. 10.1177/0954408915614460
3. Elkhlaidy, Influence of flange geometric configuration and bolt stress on joint integrity during assembly using FEA, Int. J. Pres. Ves. Pip., № 202 DOI: 10.1016/j.ijpvp.2023.104912

ВПЛИВ ТЕМПЕРАТУРИ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ РОБОТИ ГАЗОРІДИННОГО СЕПАРАТОРА

Лях М.М.,¹ Фурса Р. П.,² Процюк В.Р.,³ Михайлюк В. В.⁴

¹ ІФНТУНГ, канд. техн. наук, професор Україна

² ІФНТУНГ, аспірант, Україна

³ ІФНТУНГ, доцент, Україна

⁴ ІФНТУНГ, канд. техн. наук, доцент, Україна

Анотація. У роботі висвітлено дослідження роботи газорідинного сепаратора, який призначений для очищення газу від рідких та твердих домішок. Такі сепаратори застосовуються у нафтогазовій, хімічній, нафтогазопереробній та інших галузях. Основними перевагами сепараторів порівняно із іншим обладнанням для очищення газу є їх низька вартість експлуатації та простота обслуговування. За допомогою імітаційного моделювання у даній роботі було досліджено виконувані функції вертикального газорідинного сепаратора із врахуванням складу газорідинної суміші, її витрати та температури. Під дослідження роботи сепаратора було застосовано параметричне дослідження, що дозволило визначити ряд комбінацій об'ємної витрати газорідинної суміші та температури. Отримані результати імітаційного моделювання дозволяють оцінити вплив складу та температури газового потоку на роботу сепаратора, а саме на масову концентрацію води у вихідному газовому потоці.

Ключові слова: газорідинний сепаратор, краплинна рідина, імітаційне моделювання, ефективність сепарації, очищення газу.

Очищення газу від рідких та твердих домішок, розділення гетерогенних газорідинних і трифазних сумішей – найпоширеніші процеси в нафто- і газовидобувній, нафтогазопереробній, хімічній та нафтохімічній, будівельній та інших галузях промисловості [1, 2]. З цією метою застосовуються різноманітні газорідинні сепаратори, відділення краплинної рідини з газового потоку у яких може відбуватись за рахунок відцентрової сили, гравітації тощо. Перевагами цих пристроїв є їх низька вартість, дешевизна експлуатації, простота технічного обслуговування, висока надійність тощо. В даний час основним завданням при вдосконаленні сепараторів є забезпечення

ефективної роботи у широкому діапазоні тиску, підвищення якості сепарації, збільшення продуктивності та зменшення їх габаритних розмірів і маси.

У роботі [3] проаналізовано особливості процесу сепарації потоку двофазної газорідинної суміші. Основним параметром, який характеризує ступінь відділення рідини від газу в сепараторі, є коефіцієнт ефективності, який залежить від особливостей конструкції сепаратора, термобаричних умов, параметрів технологічної схеми, складу і фізико-хімічних властивостей газорідинного потоку [4, 5].

Донедавна розробку нових конструкцій сепараційного обладнання проводили на основі практичного досвіду попередніх дослідників, а також використовуючи спрощені математичні моделі. Такий підхід вимагав значних фізичних та економічних витрат та часто не забезпечував очікуваних результатів. В сучасних умовах розвитку комп'ютерної техніки вирішення складних актуальних задач здійснюється з допомогою програмних комплексів, які дають можливість моделювати різноманітні робочі процеси та явища [6-8]. Метою роботи є оцінка експлуатаційних характеристик газорідинного сепаратора за допомогою імітаційного моделювання.

Функціональна схема сепаратора показана на рисунку 1.

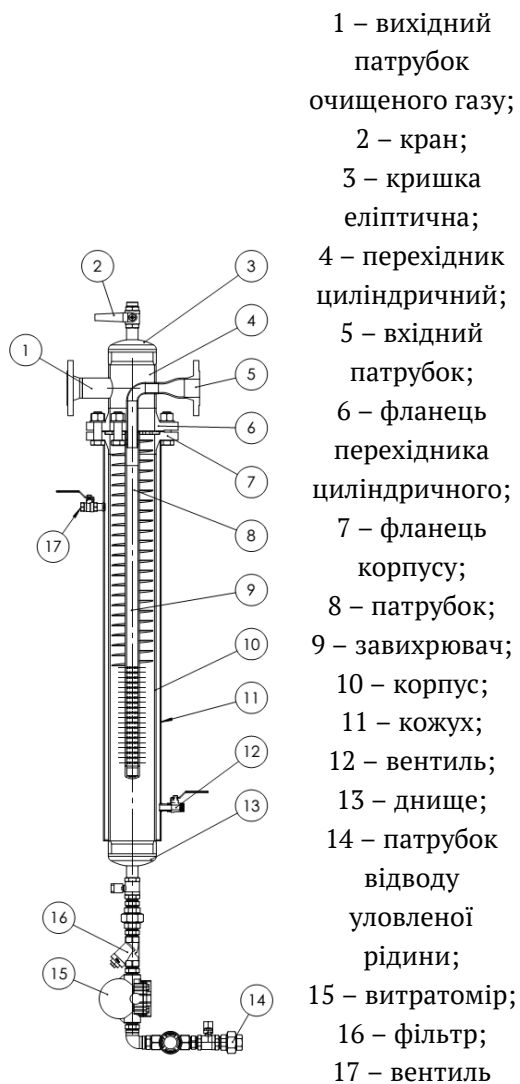


Рисунок 1 – Функціональна схема газорідинного сепаратора

Функціональна схема сепаратора показана на рисунку 1. Неочищений газ подається у вхідний патрубок 5, далі газ рухається по патрубку 8 та виходить з неї через отвори у нижній частині патрубку в корпус 10. На виході з отворів патрубку 8 з газу відділяється краплинна рідина, яка рухається разом з даним потоком вгору. Далі газорідинна суміш потрапляє на завихрювач 9 у якому осьовий рух суміші переходить у гвинтовий. За такого виду руху відбувається збільшення відцентрової складової швидкості, і відповідно, відцентрової сили. За рахунок різниці густин газу та краплинної рідини остання під дією відцентрової сили відкидається на внутрішню поверхню корпусу 10. Далі ця рідина стікає вниз до днища 13 та відводиться з сепаратора через фільтр 16, витратомір 15 та патрубок

відводу уловленої рідини 14. Очищений від краплинної рідини газ відводиться з сепаратора через вихідний патрубок 1.

У зимовий період, за умов низьких температур газу, для підігріву сепаратора передбачено кожух 11, у який подається теплоносієм. Підігрів має відповідати вимогам вибухо- та пожежобезпеки.

Для встановлення характеристик газорідинного сепаратора використано його тривимірну модель, яку зображено на рисунку 2.

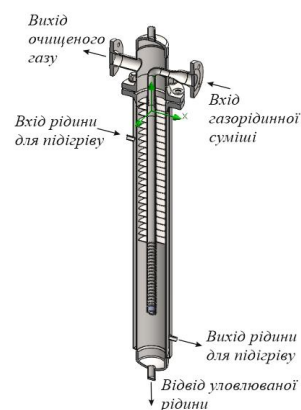


Рисунок 2 – Модель сепаратора для імітаційного моделювання

У дослідженні враховано багатоконпонентність газового потоку, що складається із суміші різних газів. Масова концентрація компонентів газової суміші становить: метан – 93 %, водень – 0,1 %, етан – 2,5 %, пропан – 0,31 %, бутан – 0,11 %, метанол – 0,08 %.

Оскільки температура газу на вході та витрата можуть змінюватись, то було проведено серію імітаційних моделювань. Діапазон температури від мінус 10 до плюс 40 °С, а діапазон витрати від 0,013 до 0,046 м³/с (табл. 1).

Таблица 1

Сценарій імітаційних моделювань

№ з/п	Досліджувана (розрахункова точка)	Об'ємна витрата газорідинної суміші на виході, м ³ /с	Температура газорідинної суміші на вході, °С
1	1	0,013	-10
2	2	0,013	15
3	3	0,013	40
4	1	0,0295	-10
5	2	0,0295	15
6	3	0,0295	40
7	1	0,046	-10
8	2	0,046	15
9	3	0,046	40

Отримані результати імітаційного моделювання дозволяють оцінити вплив складу та температури газового потоку на роботу сепаратора, а саме на масову концентрацію води у вихідному газовому потоці (рис. 3).

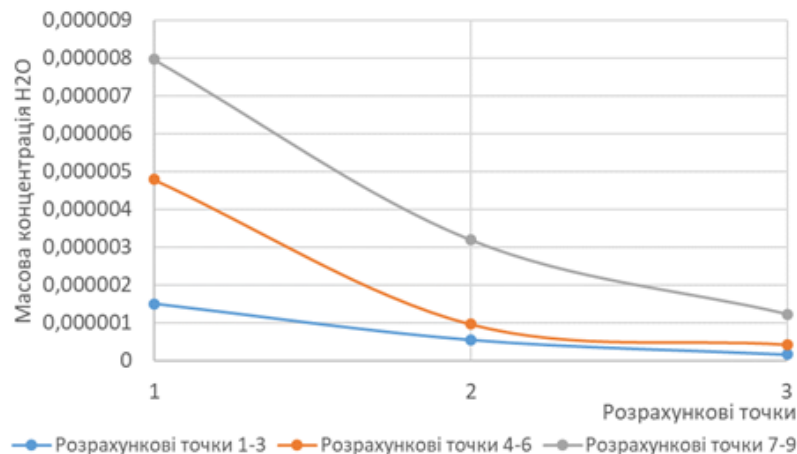


Рисунок 3 – Залежність масової концентрації води у вихідному газовому потоці від параметрів розрахункової точки (об'ємної витрати та температури)

Виходячи з графічних залежностей (рис. 3) масова концентрація води у вихідному газовому потоці із сепаратора значно залежить від температури газової суміші. Для підігріву газової суміші на поверхні сепаратора встановлено «кожух», у яку подається гаряча пара або вода.

При значних від'ємних температурах вода перетворюється із рідкої фази на тверду кристалічну, а наявні нафтові краплини стають в'язкими, що в загальному призводить до зниження ефекту сепарації, а у ряді випадків до повної відмови. Враховуючи це, встановлення підігріву корпусу сепаратора забезпечить безвідмовну роботу при від'ємних температурах.

Висновки. Проаналізувавши існуючі джерела інформації в яких наведена інформація про відділення краплинної рідини з газового потоку та особливостей роботи газорідних сепараторів встановлено, що процеси, які відбуваються під час їх роботи є складними та їх важко описати аналітично. Для дослідження роботи сепараторів застосовують програми CFD, які дозволяють пришвидшити процес розрахунку.

В результаті проведених досліджень газорідного сепаратора встановлено, що на його ефективність роботи суттєво впливає температура газорідної суміші.

ЛІТЕРАТУРА

1. Михайлюк В. В., Фафлей О. Я., Мельник В. О., Захара І. Я., Малишев А. Р., & Процюк Г. Я. Моделювання газового вертикального сіткового сепаратора. Науковий

вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу. 2022. №1(52), 91–100. [https://doi.org/10.31471/1993-9965-2022-1\(52\)-91-100](https://doi.org/10.31471/1993-9965-2022-1(52)-91-100)

2. L. M. Mil'shtein, Modernization of Oil and Gas Field Separation. Development of New-Generation Separation Units and Apparatuses, LAP Press, Saarbrücken, Germany (2012).

3. Liakh M.M., Yuriev E.V., Vakaliuk V.M., Solonychnyi Ya.V. Matematychna model separatsii hazoridynnoi sumishi v separatori inertsiinoho typu. Rozvidka ta rozrobka naftovykh i hazovykh rodovyshch. 2008. № 1. P. 67–73.

4. Wiencke B 2011. Fundamental principles for sizing and design of gravity separators for industrial refrigeration. International Journal of Refrigeration. 34 2092–2108.

5. Chu, Kaiwei & Wang, B. & Xu, D.L. & Chen, Y.X. & Yu, Aibing. (2011). CFD–DEM simulation of the gas–solid flow in a cyclone separator. Chemical Engineering Science. 66. 834–847. 10.1016/j.ces.2010.11.026.

6. Katare, Pravin & Krupan, Abhineel & Dewasthale, A. & Datar, A. & Dalkilic, A.S.. (2021). CFD analysis of cyclone separator used for fine filtration in separation industry. Case Studies in Thermal Engineering. 28. 101384. 10.1016/j.csite.2021.101384.

7. Chu, Kaiwei & Wang, B. & Xu, D.L. & Chen, Y.X. & Yu, Aibing. (2011). CFD–DEM simulation of the gas–solid flow in a cyclone separator. Chemical Engineering Science. 66. 834–847. 10.1016/j.ces.2010.11.026.

8. Vytyaz, Oleg & Chudyk, I. & Mykhailiuk, V.. (2015). Study of the effects of drilling string eccentricity in the borehole on the quality of its cleaning.

INFLUENCE OF TEMPERATURE ON THE EFFICIENCY OF THE GAS-LIQUID SEPARATOR

Liakh Mykhailo, Fursa Roman, Protsiuk Vasyl, Mykhailiuk Vasyl.

Abstract. *The work highlights the study of the operation of a gas-liquid separator, which is designed to purify gas from liquid and solid impurities. Such separators are used in the oil and gas, chemical, oil and gas processing and other industries. The main advantages of separators compared to other gas purification equipment are their low operating cost and ease of maintenance. Using simulation modeling, this work investigated the functions performed by a vertical gas-liquid separator, taking into account the composition of the gas-liquid mixture, its flow rate and temperature. Parametric research was used to study the operation of the separator, which allowed us to determine a number of combinations of the volumetric flow rate of the gas-liquid mixture and temperature. The obtained simulation modeling results allow us to assess the influence of the composition and temperature of the gas stream on the operation of the separator, namely on the mass concentration of water in the output gas stream.*

Keywords: *gas-liquid separator, droplet liquid, simulation modeling, separation efficiency, gas purification.*

REFERENCE

1. Mykhailiuk, V. V., Faflei O. Y., Melnyk V. O., Zakhara, I. Y., Malyshev, A. R., & Protsiuk, H. Y. (2022). Modeling of a gas vertical grid separator. *Scientific Bulletin of Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas*, (1(52)), 91–100. [https://doi.org/10.31471/1993-9965-2022-1\(52\)-91-100](https://doi.org/10.31471/1993-9965-2022-1(52)-91-100) [in Ukrainian].
2. L. M. Mil'shtein, *Modernization of Oil and Gas Field Separation. Development of New-Generation Separation Units and Apparatuses*, LAP Press, Saarbrücken, Germany (2012).
3. Liakh M.M., Yuriev E.V., Vakaliuk V.M., Solonychnyi Ya.V. *Matematychna model separatsii hazoridynnoi sumishi v separatori inertsiiinoho typu. Rozvidka ta rozrobka naftovykh i hazovykh rodovyshch*. 2008. № 1. P. 67-73.
4. Wiencke B 2011. Fundamental principles for sizing and design of gravity separators for industrial refrigeration. *International Journal of Refrigeration*. 34 2092-2108.
5. Chu, Kaiwei & Wang, B. & Xu, D.L. & Chen, Y.X. & Yu, Aibing. (2011). CFD–DEM simulation of the gas–solid flow in a cyclone separator. *Chemical Engineering Science*. 66. 834-847. 10.1016/j.ces.2010.11.026.
6. Katare, Pravin & Krupan, Abhineel & Dewasthale, A. & Datar, A. & Dalkilic, A.S.. (2021). CFD analysis of cyclone separator used for fine filtration in separation industry. *Case Studies in Thermal Engineering*. 28. 101384. 10.1016/j.csite.2021.101384.
7. Chu, Kaiwei & Wang, B. & Xu, D.L. & Chen, Y.X. & Yu, Aibing. (2011). CFD–DEM simulation of the gas–solid flow in a cyclone separator. *Chemical Engineering Science*. 66. 834-847. 10.1016/j.ces.2010.11.026.
8. Vytyaz, Oleg & Chudyk, I. & Mykhailiuk, V.. (2015). Study of the effects of drilling string eccentricity in the borehole on the quality of its cleaning.

КОНСТРУЮВАННЯ АЛГОРИТМІВ СОРТУВАННЯ

Макаров О. В.¹, Шинкаренко В. І.²

¹Український державний університет науки та технологій, аспірант Україна

²Український державний університет науки та технологій, .д.т.н., професор,
Україна

Анотація. З розвитком цифрових технологій та збільшенням обсягів оброблюваних даних ефективність алгоритмів сортування набуває критичного значення. У роботі розглянуто еволюцію сортувальних алгоритмів від класичних до гібридних методів, зокрема Timsort та Introsort, які демонструють покращені часові характеристики та стабільність у порівнянні з традиційними підходами. Окрема увага приділена методам передобробки даних та їх впливу на продуктивність.

Запропоновано підхід конструктивно-продукційного моделювання для створення адаптивних алгоритмів сортування, що дозволяє комбінувати існуючі методи та формувати нові ефективні алгоритми. Використання генетичного алгоритму у процесі конструювання дозволяє автоматизувати вибір оптимальних стратегій сортування відповідно до характеристик вхідних даних.

Отримані результати підтверджують перспективність застосування конструктивно-продукційного підходу для побудови адаптивних алгоритмів сортування, що забезпечують високу продуктивність у різних умовах.

Ключові слова: конструктивно-продукційне моделювання, програмне забезпечення, інформаційні технології, алгоритм, формальні граматики, генетичний алгоритм.

Вступ. З розвитком цифрових технологій та глобальної мережі Інтернет, обсяги інформації, що генеруються, передаються та зберігаються, стрімко збільшуються. Задачі пов'язані з обробкою великих масивів даних породжують нові виклики і потребують неординарних та ефективних рішень. У цьому контексті важливість ефективних алгоритмів сортування є надзвичайно високою. Сортування є фундаментальною операцією, що впливає на продуктивність численних процесів, включаючи обробку запитів у базах даних, роботу операційних систем та аналіз великих обсягів інформації.

Історично алгоритми сортування еволюціонували від простих методів, таких як сортування бульбашкою (Bubble Sort) або вставками (Insertion Sort), що мають обчислювальну складність $O(n^2)$, до більш оптимізованих підходів,

придатних для великих масивів даних. Швидке сортування (QuickSort) та сортування злиттям (MergeSort) значно підвищили ефективність обробки даних, досягнувши середньої складності $O(n \log n)$. Розвиток технологій призвів до появи ще досконаліших рішень, таких як гібридні алгоритми. Наприклад, Timsort [1], який поєднує підходи сортування вставками та злиттям, або Introsort, що адаптується до різних ситуацій, комбінуючи швидке, пірамідальне сортування (Heapsort) та сортування вставками.

Гібридні алгоритми поєднують сильні сторони різних підходів для досягнення оптимальної продуктивності. Останнім часом з'явилися дослідження, присвячені застосуванню методів штучного інтелекту та еволюційних обчислень, зокрема генетичних алгоритмів [2], для оптимізації процесів сортування. Генетичні алгоритми дозволяють адаптувати стратегії сортування до конкретних особливостей вхідних даних, що може забезпечити суттєве підвищення ефективності у спеціалізованих випадках.

Окрім вибору відповідного алгоритму сортування, важливу роль відіграє передобробка даних. Детерміновані методи передобробки [3], такі як передбачення позиції елемента відповідно до діапазону значень у масиві або розвертання усіх послідовностей елементів що стоять у зворотному порядку, дозволяють значно скоротити час сортування, якщо вхідні дані мають певну структуру. Стохастичні підходи [4], включаючи випадкове перемішування, використовуються у випадках, коли структура даних невідома або постійно змінюється. Використання стохастичних методів може допомогти уникнути гірших сценаріїв у швидкому сортуванні [5] або покращити адаптивність алгоритмів до різних типів навантаження. Таким чином, розвиток методів передобробки відкриває нові можливості для підвищення продуктивності сортування та ефективності роботи з великими обсягами інформації.

Формальні граматики [6] відіграють важливу роль у створенні та аналізі алгоритмів сортування. Використання граматичних правил дозволяє формально описувати структуру алгоритмів та їх трансформації. Це дає можливість автоматизованого синтезу ефективних алгоритмів сортування, адаптованих до конкретних типів даних або умов використання. Формальні

граматики також застосовуються для побудови оптимізованих послідовностей операцій та перевірки коректності алгоритмів.

Основний матеріал. У контексті алгоритмів сортування формальні граматики можуть бути використані для формалізації структури алгоритмів, автоматичної генерації їх варіантів та аналізу коректності їх роботи.

Генетичний алгоритм використовується для визначення алгоритму сортування найбільш ефективного у заданих умовах. Кожний алгоритм сортування кодується хромосомою. Генами є множина частин відомих алгоритмів сортування, алгоритми передобробки даних а також самостійні відомі алгоритми сортування. Проводяться експерименти за результатами яких відбираються кращі алгоритми, виконуються мутації, створюються нові популяції.

Хромосома представляє собою структуру-дерево [7]. Кожний вузол включає початкову і кінцеву послідовності генів, а також посилання на вузли-нащадки. Для отримання кінцевої послідовності генів виконується обхід дерева у глибину. Таким чином використовується наступний порядок генів:

- початкової послідовності,
- лівого вузла-нащадка,
- правого вузла-нащадка,
- кінцевої послідовності;

Щоб гарантувати сортування масива, кожна початкова послідовність листового вузла закінчується геном що відповідає одному із існуючих загальновідомих алгоритмів сортування, таких як швидке (quicksort), злиттям (mergesort) або пірамідальне (heapsort) сортування.

Для формування хромосом використовується конструктивно-продукційний підхід. Узагальненим конструктором занимається трійка:

$$C = \langle M, \mathfrak{A}, \Lambda \rangle, \quad (1)$$

Де M – поновлюваний неоднорідний носій, $\mathfrak{A}$ – сигнатура, яка складається із множини операцій зв'язування, підстановки і вивода, операцій над атрибутами і відношення підстановки, Λ – інформаційне забезпечення конструювання, яке включає призначення, умови початку та завершення конструювання, правила підстановки та обмеження.

Визначимо конкретизацію конструктора що породжує алгоритми сортування. Термінальним алфавітом $\mathfrak{A}$ гени генетичного алгоритму. Нетермінальний алфавіт

$N_1 = \{\phi a_i\}$ складається з багатьох допоміжних символів з атрибутами, що позначаються грецькими літерами.

Доступність правил підстановки визначається значеннями атрибутів. Після виконання підстановки проводяться операції над атрибутами. У розроблених правилах підстановки виникає необхідність виконання операцій над атрибутами як після так і перед операцією підстановки.

Правило $\Psi_1 : \phi s_1, g_1 \hat{\Psi}$, включає відносини підстановки s_1 та операції над атрибутами $g_1 : \phi g_{1,1}, g_{1,2} \hat{\Psi}$. Наприклад правило яке дозволяє додати до хромосоми ген швидкої передобробки даних.

$$s_1 = \phi a \tau_1 \otimes QP \times \phi g_{1,1} = \phi ==(\tau_1, pGU, false) \hat{\Psi} g_{1,2} = \phi \frac{+(nG, nG, 1)}{:= (pGU, true)} \hat{\Psi} \quad (2)$$

де τ_1 – атрибут що визначає доступність правила, QP – ген швидкої передобробки, a – нетермінал, pGU – атрибут який вказує чи була остання виконана операція підстановки із геном передобробки, nG – кількість генів у поточному вузлі дерева-хромосоми. Також визначимо математичні операції використані у формулі: $==(a, b, c)$ – операція порівняння b і c , результат записується у a ; $+(a, b, c)$ – операція додавання b і c , результат записується у a ; $:=(a, b)$ – операція присвоєння, значення b записується у a .

Відносини та операції зв'язування елементів конструкцій для класичної хромосоми генетичного алогоритму що має текстову форму представляють собою конкатенацію символа гена до результуючого рядка. Для хромосоми-дерева новий ген додається до початкової послідовності генів поточного вузла дерева. Певні правила підстановки реалізують додавання нових вузлів-нащадків до поточного вузла. І додавання генів до початкової і кінцевої послідовностей генів кожного вузла-нащадка.

Висновки. Конструктивно-продукційне моделювання застосовується до конструювання алгоритмів сортування як засіб формування нових ефективних алгоритмів на основі існуючих. Використання цього підходу дозволяє аналізувати компоненти алгоритмів, комбінувати їх для отримання нових методів, а також здійснювати адаптацію до специфічних структур даних. Завдяки конструктивно-продукційному підходу можливо створювати алгоритми, які будуть стійкими до різних умов використання та зможуть самостійно змінювати свою поведінку залежно від характеристик вхідних даних.

ЛІТЕРАТУРА

1. Peters T. Timsort description, accessed june 2015. <http://svn.python.org/projects/python/trunk/Objects/listsort.txt>.
2. David E. Goldberg. Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning. Addison-Wesley. – 1989. p. 412.
3. Шинкаренко В. І., Макаров О. В. Дослідження ефективності деяких детермінованих методів передобробки сортування даних. Проблеми програмування – 2023. № 4. С. 3-14. doi: 10.15407/pp2023.04.003
4. Шинкаренко В. І., Дорошенко А. Ю., Яценко О. А., Разносілін В. В., Галанін К. К. Двохкомпонентні алгоритми сортування. Проблеми програмування. — 2022. № 3-4. С. 32-41.
5. Marceau, Robert R. An Analysis of the Worst-Case Performance of Quicksort. Rivier Academic Journal – 2011. № 7.1.
6. Гавриленко С. Ю. Формальні мови, граматики та автомати. Харків: НТУ «ХПІ» – 2021. с. 133.
7. Shinkarenko V. I., Makarov O. V. Structural Adaptation of Sorting Algorithms Based on Constructive Fragments. CEUR-WS. – 2024. № 3806. p. 16-29.

CONSTRUCTION OF SORTING ALGORITHMS

O. Makarov, V. Shynkarenko, Doctor of Engineering Sciences

Abstract. *With the development of digital technologies and the increase in the volume of processed data, the efficiency of sorting algorithms is becoming critical. The paper considers the evolution of sorting algorithms from classical to hybrid methods, in particular Timsort and Introsort, which demonstrate improved time characteristics and stability compared to traditional approaches. Special attention is paid to data preprocessing methods and their impact on performance.*

A constructive-synthesizing modeling approach is proposed to create adaptive sorting algorithms, which allows combining existing methods and forming new effective algorithms. The use of a genetic algorithm in the design process allows automating the selection of optimal sorting strategies according to the characteristics of the input data.

The results obtained confirm the prospects of using a constructive-synthesizing approach to build adaptive sorting algorithms that provide high performance in various conditions.

Keywords: *constructive-synthesizing modeling, software, information technology, algorithm, formal grammars, genetic algorithm.*

REFERENCE

1. Peters T. Timsort description, accessed june 2015. <http://svn.python.org/projects/python/trunk/Objects/listsort.txt>.
2. David E. Goldberg. Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning. Addison-Wesley. – 1989. p. 412.

3. Shinkarenko V. I., Makarov O. V. Study of the Efficiency of Some Certain Deterministic Preprocessing Methods for Sorting Algorithms. Problems of Programming – 2023. No. 4. pp. 3–14. doi: 10.15407/pp2023.04.003
4. Shinkarenko V. I., Doroshenko A. Yu., Yatsenko O. A., Raznosilin V. V., Galanin K. K., Data Stochastic Preprocessing for Sorting Algorithms, CEUR in: Proceedings of the 13th International Scientific and Practical Programming Conference UkrPROG 2022, vol. 3501, 29- 38.
5. Marceau, Robert R. An Analysis of the Worst-Case Performance of Quicksort. Rivier Academic Journal – 2011. № 7.1.
6. Havrylenko S. Yu. Formal Languages, Grammars, and Automata. Kharkiv: NTU «KhPI» – 2021. p. 133.
7. Shinkarenko V. I., Makarov O. V. Structural Adaptation of Sorting Algorithms Based on Constructive Fragments. CEUR-WS. – 2024. № 3806. p. 16-29.

РОЗРОБКА МОДЕЛІ ПРОЦЕСУ ВЗАЄМОДІЇ КОМПОНЕНТІВ ДВОФАЗНОГО ПОТОКУ, ВВЕДЕНОГО В ЧАВУН, ПРИ ІНЖЕКЦІЙНІЙ ДЕСУЛЬФУРАЦІЇ

Маначин І.О.¹, Єлісєєв В.І., Кисляков В.Г.³, Рибальченко М.О.⁴

¹ Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, к.т.н., ст. досл.,
Україна. Український державний університет науки і технологій, Україна

² Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України к.ф.-м.н., с.н.с.,
Україна

³ Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, к.т.н., Україна,
Український державний університет науки і технологій, Україна

⁴ Український державний університет науки і технологій, к.т.н., доц., Україна

Анотація. Фактичні результати промислового застосування позапічної десульфурації свідчать, що практичні результати застосування технології в багатьох випадках не є досить стійкими. Дослідження були проведені на розрахункових та "холодних" фізичних моделях. В якості десульфуруючих реагентів оцінені магній, мелене вапно, карбід кальцію. На основі фактичних результатів фізичного моделювання та подальших розрахунків був сформульований поліпшений вираз для розрахунку глибини занурення струменя в залежності від параметрів інжекційної занурювальної фурми. Показано, що під час інжекційної десульфурації чавуну газовий компонент потоку зупиняє свій напрямний рух у розплаві до 80 мм (фактично 50-60 мм), тверді частки продовжують рухатися у порожнині та вдаряються у поверхню цієї порожнини. Для оцінки подальшого руху частинки через межу "газова порожнина-розплав" була розроблена модель для визначення глибини занурення частинок реагенту як функції швидкості вдування двофазного потоку.

Ключові слова: реагент, частинка, модель, занурення, магній, вапно.

Стан питання. Процеси інжекційної десульфурації чавуну широко застосовуються на металургійних підприємствах у багатьох країнах [1–6]. Основні способи десульфурації чавуну використовують методи інжекції для введення диспергованих реагентів у розплав через занурені вогнетривкі фурми [1-9, 11-14]. Використання цих процесів та різних реагентів у диспергованій формі обумовлене бажанням забезпечити десульфурацію чавуну з найвищою ефективністю і за найкоротший період часу.

Фактичні результати промислового застосування позапічної десульфурації чавуну свідчать, що практичні результати застосування в деяких випадках не є досить стійкими та далеко не досягають можливого і очікуваного. Так, процес спільної інжекції магнію у суміші з вапном супроводжується значним споживанням реагентів - 3-4,5 кг/т чавуну, що призводить до значного додаткового шлакоутворення та втрат чавуну разом із цим шлаком [1, 10]. У випадку моноінжекції магнію згідно з технологією китайських інститутів, погані параметри системи вдування та параметрів інжекційної магнію значно знижують робочі можливості технології та ефективність процесу десульфурації чавуну в цілому. Однією з основних причин наведених вище недоліків є те, що розвиток технологій знесірчення чавуну не врахував умови та особливості взаємодії інжекційного двофазного потоку (твердий реагент + газ) з розплавом чавуну, особливо в зоні витоку з каналу фурми до розплаву.

Мета роботи – є розробка моделі розрахунку занурення газової та твердої складових інжектуючого двофазного потоку з розплавом чавуну при позапічній обробці.

Основні результати дослідження.

Змінні параметри були наступними: межі діаметра частинок реагента - від 0,04 до 1,8 мм; витрата інжектуючого азоту - від 10 до 160 нм³/год; діаметр каналу фурми - від 7,5 до 20 мм; швидкість потоку - від 20 до 150 м/с. Гранульований магній, мелене вапно та карбід кальцію були оцінені як десульфуруючі реагенти. Азот був використаний як носій газу. При холодному фізичному моделюванні в якості моделюючого середовища використовувалася вода. На основі фактичних результатів фізичного моделювання та наступних розрахунків було сформульовано поліпшений вираз для визначення довжини газового струменя у рідині, залежно від параметрів інжекційної через занурену фурму [7].

$$L_{\text{стр}} = K_k W_r \times \sqrt{\frac{\rho_r \times D_k}{(\rho_m - \rho_r) \times g}} \quad (1)$$

де ρ_r , ρ_m - густина газової фази та чавуну відповідно; W_r - швидкість потоку на виході фурми; D_k - діаметр каналу фурми; K_k - фактор корекції, встановлений у кожному випадку згідно з виразом:

$$K_k = 3.4408 \cdot W_r^{-0.339} \quad (2)$$

З розрахунків, випливає, що глибина проникнення газової фази збільшується зі збільшенням швидкості потоку та діаметру каналу фурми, досягаючи 15–100 мм (залежно від параметрів інжекційної системи).

Для реальних умов інжекційної подачі десульфуруючих реагентів ($D_c = 7$ –20 мм, $W_g = 20$ –100 м/с), довжина утвореної газової порожнини може бути 20–80 мм. Подібні залежності отримуються за інших умов занурення фурми у розплав чавуну (в середньому 0,5–4,0 м), але з іншими значеннями параметрів. Таким чином, під час інжекційної десульфурації чавуну газовий компонент потоку зупиняє свій напрямлений рух у розплаві до 80 мм (фактично 50–60 мм), тверді частки продовжують рухатися у газовій порожнині та вдаряються у поверхню цієї порожнини. Для оцінки подальшого руху частинки через межу "газова порожнина-розплав" була розрахована глибина проникнення частинок у рідке залізо. Рух частинки у розплаві може бути описаний рівнянням (3), яке відображає умови вертикального руху частинки від верху донизу з заданою початковою швидкістю до повного зупинення частинки:

$$h_{TB} = \frac{dW_{TB}}{dx} = \frac{\left[-0,5 \cdot \pi \cdot r_{TB}^2 \cdot C_x \cdot \rho_m \cdot W_{TB}^2 \right] + \left[0,75 \cdot \pi \cdot r_{TB}^3 \cdot g \cdot (\rho_{TB} - \rho_m) \right]}{\left[0,75 \cdot \pi \cdot r_{TB} \cdot (\rho_{TB} + 0,5 \cdot \rho_m) \right] \cdot W_{TB}} \quad (3)$$

де C_x - коефіцієнт гідродинамічного опору кулі, r_{TB} - радіус твердої частки, ρ_{TB} - густина твердої частки, ρ_m - густина розплаву чавуну, W_{TB} - змінна швидкість частинки у розплаві чавуну. Коефіцієнт C_x може бути визначений за формулою:

$$C_x = \frac{24}{Re_{TB}} + \frac{4,4}{Re_{TB}^{1/2}} + 0,42 \quad (4)$$

де Re_{TB} - критерій Рейнольдса для твердої частки, що рухається у розплаві.

$$= \frac{2r_{TB} W_{TB}}{V_M} \quad (5)$$

де v_M - кінематична в'язкість розплаву.

У розрахунках було враховано, що перед введенням у розплав чавуну тверда частка реагента повинна подолати поверхневий натяг. Враховуючи прийняті припущення,

процес зміни швидкості частинки ($W_{\text{ТВ}}$) через подолання поверхневого натягу може бути оцінений аналітичним виразом (6):

$$W_{\text{ТВ}} = \sqrt{W_{0\text{ТВ}}^2 - \frac{2\sigma_{\text{м}}}{\rho_{\text{ТВ}} \cdot d_{\text{ТВ}}}} \quad (6)$$

де $W_{\text{ТВ}}$ - поточна швидкість твердої частки реагента; $W_{0\text{ТВ}}$ - початкова швидкість твердої частки реагента; $\sigma_{\text{м}}$ - поверхневий натяг рідкого металу; $d_{\text{ТВ}}$, $\rho_{\text{ТВ}}$ - діаметр та густина частинки, відповідно.

Згідно з вищезазначеною моделлю, глибина проникнення частинок реагента в розплав чавуну була визначена шляхом зміни діаметра частинки від 0,02 до 1,8 мм та швидкості від 5 до 160 м/с. Глибина занурення фурми у розплав становила 3 м. Магній, вапно і карбід кальцію вивчалися як реагенти. Перешкода в шляху руху частинки - це межа «газова порожнина-розплав». З розрахунків встановлено, що коли діаметр частинки менше 0,08 а швидкість менше 10 м/с, частинки реагента не подолують поверхневий натяг на межі "порожнина-розплав чавуну". З частинкою діаметром від 0,15 до 1,8 мм та швидкістю 20 м/с або більше, частинки, подолавши поверхневий опір, зменшують швидкість на 0-1 м/с, тобто ці втрати швидкості можна не враховувати. Після подолання поверхневого натягу частинки реагента вводяться у розплав чавуну. Зміни глибини проникнення частинок (на прикладі магнію) розраховані та показані на діаграмі на рис. 2. Подібні діаграми були отримані для використання вапна та карбіду кальцію (майже не відрізняються від діаграми для магнію). З діаграми на рис. 2 випливає, що діаметр частинок (включаючи їх масу) та швидкість руху фундаментально впливають на параметри взаємодії частинок з розплавом. Збільшення діаметра частинки від 0,02–0,06 до 1,8 мм та швидкості частинки від 5–10 до 160 м/с збільшує глибину проникнення частинок магнію в розплав чавуну до 27 мм.

Висновки. За допомогою введення двофазових потоків до розплаву через заглибну фурму здійснюється десульфуратія чавуну дисперсними реагентами. Компоненти двофазового потоку, при їх руху в розплав, мають різні фізичні та енергетичні параметри. Тому газова фаза першою зупиняє свій рух у розплаві, проникаючи у рідкий залізо на глибину до 60 мм (з відповідними параметрами введення). Розроблена модель для розрахунку параметрів занурення твердих

частинок реагенту, що дозволяє прогнозувати їх поведінку у розплаві чавуну при рафінуванні.

ЛІТЕРАТУРА

1. Voronova, N. A. (1983). Desulfurization of Hot Metal by Magnesium; Publisher. Iron & Steel Society; Publication date. January 1, 1983. [in Russian]
2. Robey, R. and etc. (2014). Out-of-blast processing of cast iron, taking into account specific production conditions. MPT International, 1, 16-24 [in Russian].
3. Molchanov, L., Nizyaev, K., Boychenko, B., Stoyanov, A., Synehin, Ye. (2013). Ladle desulphurization of liquid iron in context of the tasks of national industry. New Materials and Technologies in Metallurgy and Mechanical Engineering, 2, 38-41 [in Ukrainian].
4. A. M. Zborshchik, S. V. Kuberskii, K. E. Pismarev, V. V. Akulov & G. Ya. Dovgalyuk (2010). Comparison of ladle technologies for hot-metal desulfurization. Steel Transl., 40, 35–37 <https://doi.org/10.3103/S0967091210010092>
5. A. F. Shevchenko, A. M. Bashmakov, A. S. Vergun, I. A. Manachin, V. G. Kislyakov, É. A. Trotsenko, Liu Dong Yie & Yang Jia Rui. (2019). Modern High-Performance Complexes of Extra-Deep Desulphurization of Cast iron by Mono-Injection of Magnesium. Metallurgist, 62, 965–973. <https://doi.org/10.1007/s11015-019-00734-w>.
6. Tovarovskii, I. G. (2014). Influence of blast-furnace parameters on coke consumption and productivity. Steel Transl., 44, 350–358. <https://doi.org/10.3103/S0967091214050155>.
7. Vergun, A. S., Shevchenko, A. F., Kislyakov, V. G., Molchanov, L. S., Dvoskin, B. V. (2019). Sulphur and gas removal from hot metal by injecting disperse magnesium in a gas jet. Steel in translation, 49(1), 45-49. <https://doi.org/10.3103/S0967091219010133>
8. Lindström, D., Nortier, P., Sichen, D. (2014). Functions of Mg and Mg–CaO Mixtures in Hot Metal Desulfurization. Steel Research International, 85(1), 76–88. <https://doi.org/10.1002/srin.201300071>.
9. Shevchenko, Manachin I.A., Vergun A.S., Dvoskin B.V., Kislyakov V.G., Shevchenko S.A., Ostapenko A.V. (2017). Out-of-furnace desulphurisation of cast iron in ladles. Technology, research, analysis, improvement. Publisher. Dnipro-VAL; Publication date. July 25, 2017; ISBN 978-966-8704-75-8 [in Russian]. Що це за джерело?
10. Rudenko, A. L. (2014). The analysis of patterns of interphase sulfur distribution in the injection treatment of iron with magnesium. Izvestiya. Ferrous Metallurgy, 57(8), 13-18. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2014-8-13-18> [in Russian].
11. Rudenko, A. L. (2016). Kinetics of interfacial transition of sulfur during ladle refining of iron by magnesium. Izvestiya. Ferrous Metallurgy, 59(12), 896-902.). [in Russian].
12. Frank Nicolaas Hermanus Schrama, Elisabeth Maria Beunder, Bart Van den Berg, Yongxiang Yang & Rob Boom (2017). Sulphur removal in hot metalmaking and oxygen steelmaking. Hot metalmaking & Steelmaking, 44(5), 333-343. <https://doi.org/10.1080/03019233.2017.1303914>.
13. A. M. Zborshchik, S. V. Kuberskii, G. Ya. Dovgalyuk & K. V. Vinnik. (2011). Effectiveness of fluidized lime in the desulfurization of hot metal in 300-t casting ladles. Steel Transl., 41, 741–744. <https://doi.org/10.3103/S096709121109021X>

14. Zborshchik, A. M., Kuberskii, S. V., Dovgalyuk, G. Y. & V.N. Belomerya. The Efficiency of Using Fluidized Lime for Desulfurization of Iron in 300-Ton Charging Ladles. Scientific papers of Donetsk National Technical University. Series: Metallurgy, 13(194), 53-60. <https://ea.donntu.edu.ua:8080/jspui/handle/123456789/14635>

DEVELOPMENT OF A MODEL OF THE INTERACTION PROCESS OF THE COMPONENTS OF A TWO-PHASE FLOW INTRODUCED INTO CAST IRON DURING INJECTION DESULFURIZATION

Ivan Manachyn, Volodymyr Yelisyeyev, Volodymyr Kysliakov, Mariya Rybalchenko

Abstract. *Actual results of the industrial application of out-of-furnace desulfurization indicate that practical results of the technology in many cases are not sufficiently stable. The studies were conducted on computational and "cold" physical models. Magnesium, ground lime, calcium carbide - desulfurizing reagents. Based on the actual results of physical modeling and further calculations, improved expression was formulated for calculating the depth of jet immersion depending on the parameters of the injection lance. It is shown that during injection desulfurization of cast iron, the gas component of the flow stops its directional movement in the melt up to 80 mm (actually 50-60 mm), solid particles continue to move in the cavity and hit the surface of this cavity. To assess further movement of the particle through the "gas cavity-melt" boundary, model was developed to determine the depth of immersion of reagent particles as a function of the injection velocity of the two-phase flow.*

Keywords: *reagent, particle, model, immersion, magnesium, lime.*

REFERENCE

1. Voronova, N. A. (1983). Desulfurization of Hot Metal by Magnesium; Publisher. Iron & Steel Society; Publication date. January 1, 1983. [in Russian]
2. Robey, R. And etc. (2014). Out-of-blast processing of cast iron, taking into account specific production conditions. MPT International, 1, 16-24 [in Russian].
3. Molchanov, L., Nizyaev, K., Boychenko, B., Stoyanov, A., Synehin, Ye. (2013). Ladle desulphurization of liquid iron in context of the tasks of national industry. New Materials and Technologies in Metallurgy and Mechanical Engineering, 2, 38-41 [in Ukrainian].
4. A. M. Zborshchik, S. V. Kuberskii, K. E. Pismarev, V. V. Akulov & G. Ya. Dovgalyuk (2010). Comparison of ladle technologies for hot-metal desulfurization. Steel Transl., 40, 35–37 <https://doi.org/10.3103/S0967091210010092>
5. A. F. Shevchenko, A. M. Bashmakov, A. S. Vergun, I. A. Manachin, V. G. Kislyakov, É. A. Trotsenko, Liu Dong Yie & Yang Jia Rui. (2019). Modern High-Performance Complexes of Extra-Deep Desulphurization of Cast iron by Mono-Injection of Magnesium. Metallurgist, 62, 965–973. <https://doi.org/10.1007/s11015-019-00734-w>.
6. Tovarovskii, I. G. (2014). Influence of blast-furnace parameters on coke consumption and productivity. Steel Transl., 44, 350–358. <https://doi.org/10.3103/S0967091214050155>.

7. Vergun, A. S., Shevchenko, A. F., Kislyakov, V. G., Molchanov, L. S., Dvoskin, B. V. (2019). Sulphur and gas removal from hot metal by injecting disperse magnesium in a gas jet. *Steel in translation*, 49(1), 45-49. <https://doi.org/10.3103/S0967091219010133>
8. Lindström, D., Nortier, P., Sichen, D. (2014). Functions of Mg and Mg–CaO Mixtures in Hot Metal Desulfurization. *Steel Research International*, 85(1), 76–88. <https://doi.org/10.1002/srin.201300071>.
9. Shevchenko, Manachin I.A., Vergun A.S., Dvoskin B.V., Kislyakov V.G., Shevchenko S.A., Ostapenko A.V. (2017). Out-of-furnace desulphurisation of cast iron in ladles. Technology, research, analysis, improvement. Publisher. Dnipro-VAL; Publication date. Jule 25, 2017; ISBN 978-966-8704-75-8 [in Russian]. Що це за джерело?
10. Rudenko, A. L. (2014). The analysis of patterns of interphase sulfur distribution in the injection treatment of iron with magnesium. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*, 57(8), 13-18. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2014-8-13-18> [in Russian].
11. Rudenko, A. L. (2016). Kinetics of interfacial transition of sulfur during ladle refining of iron by magnesium. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*, 59(12), 896-902.). [in Russian]..
12. Frank Nicolaas Hermanus Schrama, Elisabeth Maria Beunder, Bart Van den Berg, Yongxiang Yang & Rob Boom (2017). Sulphur removal in hot metalmaking and oxygen steelmaking. *Hot metalmaking & Steelmaking*, 44(5), 333-343. <https://doi.org/10.1080/03019233.2017.1303914>.
13. A. M. Zborshchik, S. V. Kuberskii, G. Ya. Dovgalyuk & K. V. Vinnik. (2011). Effectiveness of fluidized lime in the desulfurization of hot metal in 300-t casting ladles. *Steel Transl.*, 41, 741–744. <https://doi.org/10.3103/S096709121109021X>
14. Zborshchik, A. M., Kuberskii, S. V., Dovgalyuk, G. Y. & V.N. Belomerya. The Efficiency of Using Fluidized Lime for Desulfurization of Iron in 300-Ton Charging Ladles. *Scientific papers of Donetsk National Technical University. Series: Metallurgy*, 13(194), 53-60. <https://ea.donntu.edu.ua:8080/jspui/handle/123456789/14635>

ІНФОРМАЦІЙНО-ОБЧИСЛЮВАЛЬНИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ КІНЕМАТИКИ РОБОТА-МАНІПУЛЯТОРА

Мельникова О.Є.¹, Герасін О.С.²

¹ Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова, студент,
Україна

² Кандидат технічних наук, ²

² Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова, к.т.н., доцент,
Україна

Анотація. Швидке поширення використання роботів-маніпуляторів у різноманітних сферах життєдіяльності вимагає застосування сучасних методів моделювання для оптимізації проектування їх конструкції, розрахунку кінематики та руху, які є одними із ключових завдань робототехніки. Робота присвячена розробці інформаційно-обчислювального комплексу для дослідження кінематики триланкового маніпулятора за допомогою програмного пакету Matlab Robotics Toolbox. Представлено програмне забезпечення, яке реалізує розрахунок прямої та зворотної задачі кінематики, а також здійснює планування траєкторії руху маніпулятора. Для задання параметрів робота використано представлення Денавіта-Хартенберга, зворотню задачу кінематики розв'язано методом градієнтного спуску, а для побудови траєкторії руху застосовано метод поліноміальної інтерполяції. Розроблений інформаційно-обчислювальний комплекс дозволяє вводити та змінювати параметри маніпулятора, запускати відповідні алгоритми для планування траєкторії, визначення положення й орієнтації робочого органу, а також візуалізувати його поведінку у тривимірному просторі.

Ключові слова: інформаційно-обчислювальний комплекс, кінематика маніпулятора, пряма задача кінематики, зворотня задача кінематики, траєкторія руху, інтерфейс.

Застосування роботів і маніпуляторів у різних сферах життя стрімко зростає, охоплюючи виробництво, медицину, військову справу та науку. Ефективне проектування таких пристроїв потребує використання відповідних програмних засобів автоматизації розрахунків за сучасними методами моделювання, які дозволяють досліджувати кінематику, оптимізувати конструкцію та планувати рух.

Для комплексного дослідження та аналізу кінематики ланкових маніпуляторів необхідно послідовно розв'язати три взаємопов'язані задачі:

пряму та обернену кінематику, а також планування траєкторії у просторі узагальнених координат [1]. Вирішення цих задач є необхідною умовою для подальшого моделювання та ефективного керування рухом маніпулятора. Основними методами дослідження кінематики й динаміки маніпуляторів є геометричний [2], векторний [3, 4] і матричний методи [5]. Найбільш універсальним є метод матриць на базі представлення Денавіта-Хартенберга (ДХ-представлення), оскільки він підходить для розрахунку будь-якого маніпулятора з поступальними або обертальними кінематичними парами за допомогою ЕОМ.

Метою даної роботи є створення інформаційно-обчислюваного комплексу моделювання кінематики триланкового робота-маніпулятора для автоматизації розрахунків на ранній стадії проектування.

Для досягнення поставленої мети розроблено програмний додаток з використанням інструментів пакету Matlab Robotics Toolbox. Цей пакет надає широкий спектр функцій для моделювання як мобільних, так і маніпуляційних роботів, дозволяє програмувати алгоритми для обчислення кінематики, динаміки та побудови траєкторії роботів. Крім того, цей пакет дозволяє працювати з різними типами даних, зокрема векторами та однорідними перетвореннями, які необхідні для подальшої візуалізації та аналізу результатів [6].

Пряма задача кінематики полягає у визначенні положення та орієнтації робочого органу за заданими значеннями узагальнених координат маніпулятора [1]. Спочатку визначаються параметри та структура маніпулятора відповідно до принципів Денавіта-Хартенберга [1], після чого знаходяться координати центра захвату у вигляді матриці однорідного перетворення. У кодї програми маніпулятор представлений як набір ланок, описаних у ДХ-представленні через вектор об'єктів класу *Link* [6]:

$$L(i) = \text{Link}[\theta(i), d(i), a(i), \alpha(i), \text{offset}(i)]. \quad (1)$$

Ініціалізовані параметри окремих ланок об'єднані в єдину кінематичну структуру за допомогою класу *SerialLink*. Так формується об'єкт *Robot*, що містить усі параметри маніпулятора: кількість ланок – i , кути між

зчленуваннями – θ , зміщення – d , довжину ланок – a , кут повороту ланок – α і тип з'єднання – $offset$. Для визначення координат положення захвату застосовується функція $fkine(\theta_i)$, яка дозволяє провести необхідні обчислення і на виході отримати шукану однорідну матрицю маніпулятора.

Зворотна задача кінематики полягає у визначенні узагальнених координат $\theta_e = (\theta_1 \dots \theta_3)^T$, за яких маніпулятор досягає заданого положення та орієнтації захвату [1], за допомогою метода градієнтного спуску, що ґрунтується на пошуку мінімуму критерію оптимізації

$$J(\theta) = \frac{1}{2} \left((x_r - x(\theta))^2 + (y_r - y(\theta))^2 + (z_r - z(\theta))^2 \right) \rightarrow \min, \quad (2)$$

де $\theta = (\theta_1 \dots \theta_3)^T$ – вектор приєднаних координат, x_r, y_r, z_r – задані координати захвату, $x(\theta), y(\theta), z(\theta)$ – координати захвату, визначені в процесі розв'язання прямої задачі кінематики.

В кодї задано довільні значення початкових кутів $\theta_0 = (0 \ 0 \ 0)$, ітераційні коефіцієнти $\gamma = (1 \ 1 \ 1)$ та координати положення й орієнтації робочого органу. На основі цих значень метод ітеративно оновлює кути θ за формулою:

$$\theta = \theta - \gamma \cdot (J^T \cdot e), \quad (3)$$

де J – якобіан, e – вектор помилки між поточними та цільовими координатами. Ітерації тривають доки помилка не стане меншою за заданий поріг, після чого значення узагальнених координат $\theta_e = (\theta_1 \dots \theta_3)^T$ виводиться у вікні програми.

Для планування траєкторії захвату маніпулятора в просторі узагальнених координат необхідно визначити контрольні точки, через які він проходить, а також моменти часу їх досягнення [7]. Після визначення узагальнених координат $\theta_e = (\theta_1 \dots \theta_3)^T$ плавний перехід між початковим та кінцевим положеннями маніпулятора забезпечується методом градієнтного спуску. Для розв'язання цієї задачі в інформаційно-обчислювальному комплексі застосовується метод поліноміальної інтерполяції, реалізований у функції $jttraj(\theta_0, \theta_e, t)$. Дана функція використовує поліном 5-го порядку з нульовими граничними умовами для швидкості та прискорення. Після введення параметрів $\theta_0, \theta_e, [t_0, t_e]$ на виході формується матриця розмірністю $t \times N$, де t – число кроків за часом, а N – кількість ланок маніпулятора.

Інтерфейс розробленого додатку представлено на рис. 1. Він містить єдине головне вікно, що складається з полів для введення параметрів маніпулятора, зокрема довжин ланок (L_1 , L_2 , L_3), кутів зчленувань у градусах (Θ_1 , Θ_2 , Θ_3) та координат положення робочого органу маніпулятора (X , Y , Z). Також передбачені функціональні кнопки для обчислення прямої та зворотної кінематики. При натисненні на кнопку «Пряма кінематика» програма обчислює положення та орієнтацію захвату, відповідно до введених значень кутів Θ_1 - Θ_3 . У разі вибору кнопки «Зворотна кінематика» здійснюється обчислення кутів зчленувань, необхідних для досягнення заданої точки у просторі, а також візуалізація траєкторії руху маніпулятора.

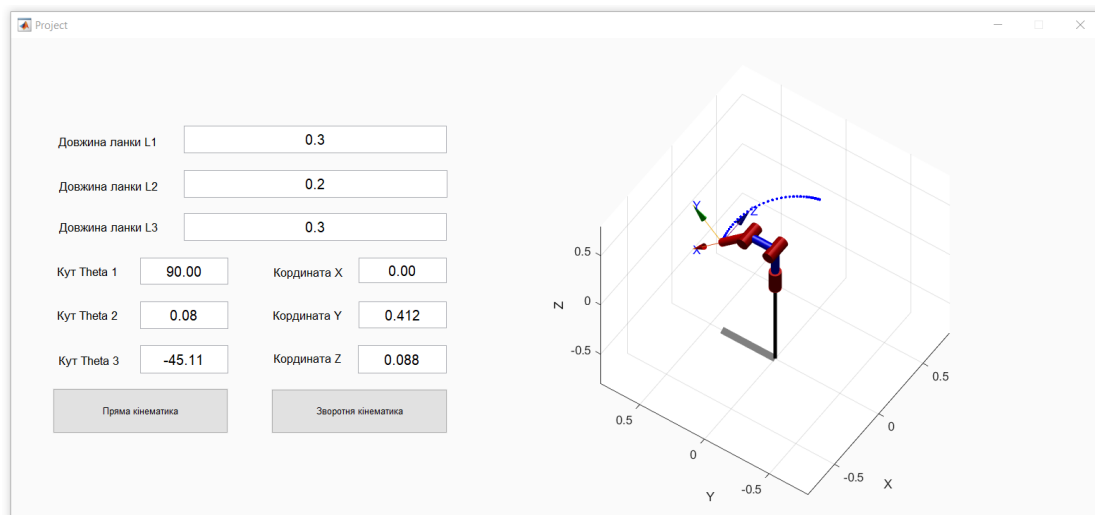


Рисунок 1 – Інтерфейс інформаційно-обчислюваного комплексу

Перевагою запропонованого програмного забезпечення є можливість тривимірної візуалізації результатів та автоматизація розрахунків. Інтерактивна 3D-модель маніпулятора відображає його поточний стан, положення кінцевого захвату, а також зміни у структурі механізму при варіюванні вхідних параметрів.

Висновки. В роботі створено інформаційно-обчислювальний комплекс з графічним інтерфейсом, який дозволяє з високим рівнем наочності моделювати кінематику триланкового робота-маніпулятора шляхом автоматизованого розв'язання прямих і зворотних задач, а також планування траєкторії на ранній стадії проектування.

ЛІТЕРАТУРА

1. Спину Г. А. Промислові роботи - 2-ге вид., перероб. та дод. – К.: Вища школа, 1991. – 311 с.
2. A Geometric Approach to Inverse Kinematics of Hyper-Redundant Manipulators for tokamaks maintenance [Електронний ресурс] / C. Lauretti, T. Grasso, E. Marchi // Mechanism and Machine Theory. – 2022. – Vol. 176. – 104967. – Режим доступу: <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2022.104967> (дата звернення: 30.03.2025).
3. Kinematic Modelling of Humanoid Robot Based on Vectorial Approach [Електронний ресурс] / N. Hadiddi, C. Mahfoudi, M. Bouaziz // ENP Engineering Science Journal. – 2024. – Vol. 4, no. 1. – P. 35-43. – Режим доступу: <https://doi.org/10.53907/enpesj.v4i1.271> (дата звернення: 30.03.2025).
4. Kinematic Modeling of Robotic Manipulators [Електронний ресурс] / A. Singh, A. Singla // Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section A: Physical Sciences. – 2016. – Vol. 87, no. 3. – P. 303-319. – Режим доступу: <https://doi.org/10.1007/s40010-016-0285-x> (дата звернення: 30.03.2025).
5. Цвіркун Л. І., Грулер Г. Робототехніка та мехатроніка: Навч. посібник. – Д.: Національний гірничий університет, 2007. – 216 с.
6. Corke P. Robotics, Vision and Control: Fundamental Algorithms in MATLAB / Peter Corke. – 73rd ed. – Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag, 2011. – 570 p.
7. Системи управління маніпуляційних роботів: Методичні вказівки до лабораторних робіт / О. О. Черно, А. П. Гуров, М. В. Покровський, О. А. Авдеева. – Миколаїв: НУК, 2023. – 41 с.

INFORMATION AND COMPUTER COMPLEX FOR MODELING THE KINEMATICS OF A MANIPULATING ROBOT

Olena Melnykova, Oleksandr Gerasin

Abstract. *The rapid spread of applying the manipulator robots in various areas of life requires the use of modern modeling methods to optimize the design of their structure, calculation of kinematics and motion, which are one of the key tasks of robotics. The work is devoted to the development of information and computing complex for studying the kinematics of a three-link manipulator using the Matlab Robotics Toolbox software package. The presented software implements the calculation of the direct and inverse kinematics problem, and also plans the manipulator motion trajectory. The Denavit-Hartenberg representation was used to specify the robot parameters, the inverse kinematics problem was solved by the gradient descent method, and the polynomial interpolation method was used to construct the motion trajectory. The developed information and computing complex allows to enter and change the manipulator parameters, run the appropriate algorithms for trajectory planning, determine the*

position and orientation of the working tool, and visualize its behavior in three-dimensional space.

Keywords: *information and computing complex, manipulator kinematics, direct problem of kinematics, inverse problem of kinematics, motion trajectory, interface.*

REFERENCE

1. Spinu G. A. Industrial robots - 2nd ed., revised and supplemented. – K.: Higher School, 1991. – 311 p. [in Ukrainian].
2. A Geometric Approach to Inverse Kinematics of Hyper-Redundant Manipulators for tokamaks maintenance [Electronic resource] / C. Lauretti, T. Grasso, E. Marchi // Mechanism and Machine Theory. – 2022. – Vol. 176. – 104967. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2022.104967> (date of access: 30.03.2025).
3. Kinematic Modelling of Humanoid Robot Based on Vectorial Approach [Electronic resource] / N. Hadiddi, C. Mahfoudi, M. Bouaziz // ENP Engineering Science Journal. – 2024. – Vol. 4, no. 1. – P. 35-43. – Mode of access: <https://doi.org/10.53907/enpesj.v4i1.271> (date of access: 30.03.2025).
4. Kinematic Modeling of Robotic Manipulators [Electronic resource] / A. Singh, A. Singla // Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section A: Physical Sciences. – 2016. – Vol. 87, no. 3. – P. 303-319. – Mode of access: <https://doi.org/10.1007/s40010-016-0285-x> (date of access: 30.03.2025).
5. Tsvirkun L. I., Gruler G. Robotics and mechatronics: Textbook. – D.: National Mining University, 2007. – 216 p. [in Ukrainian].
6. Corke P. Robotics, Vision and Control: Fundamental Algorithms in MATLAB / Peter Corke. – 73rd ed. – Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag, 2011. – 570 p.
7. Control systems for manipulation robots: Methodical instructions for laboratory work / O. O. Chernov, A. P. Gurov, M. V. Pokrovsky, O. A. Avdeeva. – Mykolaiv: NUK, 2023. – 41 p. [in Ukrainian].

МАТЕМАТИЧНИЙ ОПИС ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ЗА КВАДРАТИЧНИМ КРИТЕРІЄМ ЯКОСТІ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ШИРОТНО-ІМПУЛЬСНОЇ МОДУЛЯЦІЇ СИГНАЛІВ

Миргород В.Ф.¹, Гвоздева І.М.²

¹Національний університет “Одеська морська академія”, д.т.н, доцент, Україна

²Національний університет “Одеська морська академія”, д.т.н, професор, Україна

Анотація. Пропонується підхід до оптимізації складних цифрових систем автоматичного керування (САК), в яких застосовувано перетворення сигналів керування в послідовність імпульсів із часовою модуляцією. Вимоги щодо виконавчих пристроїв в багатьох прикладних завданнях висувають необхідність застосування такого перетворення для досягнення пропорційного регулювання вихідної величини відповідно вхідного сигналу керування. Запропонований узагальнений опис цифрових систем автоматичного керування вказаного типу та запропоновано еквівалентне перетворення дискретних рівнянь їх руху, що засновано на приведенні таких рівнянь до форми Гаммерштейна. Таке перетворення значно спрощує математичний опис цифрових САК та потребує менших ресурсів при обчислювальній реалізації. Для САК із застосуванням широтно-імпульсної модуляції сигналу керування удосконалено алгоритм синтезу. Особливістю пропонованого підходу є врахування в критерії оптимальності енергетичних витрат на керування у вигляді залежності від протяжності імпульсів керування. Отримані функціональні залежності, що встановлюють вигляд закону зміни полярності імпульсів та аналітичного опису оптимальної модуляційної характеристики широтно-імпульсного перетворювача сигналу керування за завданням квадратичним критерієм якості та параметрами незмінної безперервної частини системи.

Ключові слова. математичне моделювання, нелінійні цифрові системи, автоматичне керування, методи оптимізації, широтно-імпульсна модуляція

Постановка проблеми. Сучасний підхід на вирішення питань автоматизації складних технічних об’єктів базується на побудові ієрархічних багаторівневих інтелектуальних систем, що забезпечують вимоги щодо кількісних та якісних показників регулювання. Виконавчий рівень таких систем забезпечується локальними цифровими системами автоматичного керування (САК) змінними стану та вихідними змінними.

Існує широкий клас САК, для яких обрання виконавчих пристроїв (ВП) виходить із критерію досягнення максимальної енергетичної ефективності у

мінімальних масо-габаритних обмеженнях. Такі виконавчі пристрої є досить розповсюдженими в системах автоматизації. Зокрема, такими ВП є електроприводи постійного струму. Відмінною особливістю таких ВП із застосуванням двигунів постійного струму (ДПС) є постійне і максимальне значення амплітуди сигналу керування. Пропорційний характер середнього значення вихідного сигналу щодо вхідного забезпечується модуляцією імпульсів керування ВП: протяжністю послідовності імпульсів керування, частотою послідовності імпульсів керування або комбінованою модуляцією. Принциповою особливістю систем із застосуванням керуванням протяжністю послідовності імпульсів керування є те, що вони є суттєво нелінійними, а системи із застосуванням керуванням частотою послідовності імпульсів керування є суттєво нестационарними. Тому є актуальними є питання адекватного математичного опису руху визначеного класу САК та визначення підходів щодо синтезу оптимальних керувань за заздалегідь визначеними критеріями.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Системи автоматичного керування із застосуванням модуляції імпульсів керування протяжністю послідовності імпульсів керування, частотою послідовності імпульсів керування або комбінованою модуляцією набули широкого розповсюдження на початку застосування засобів автоматизації технологічними процесами (ТП) у минулому сторіччі. Наприклад, такими були розповсюджені та серійно виготовлені регулятори типів РПІБ, РПІК та інші. В подальшому подібні регулятори набули широкого застосування в системах паливної автоматики газотурбінних двигунів в контурі обмеження температури (регулятори температури серії РТ-12). САК електроприводами наведення багатьох існуючих зразків озброєння та військової техніки, зокрема, зенітних ракетних комплексів (ЗРК), самохідних протитанкових ракетних комплексів (ПТРК) та інших застосовують саме такий засіб керування виконавчими електричними машинами. В поточний час удосконалені за участю авторів регулятори аналогічного призначення БРТ та БРТ-25 застосовуються в дослідних та серійних зразках систем паливної автоматики газотурбінних двигунів.

Теоретичні засади математичного опису та встановлення стійкості вказаних САК розглянуті у низці праць Кунцевича В.М. та Чехового Ю.М. (ІК НАНУ). Методи синтезу нелінійних дискретних САК, що були використані в поточному дослідженні, базуються на низці праць Личака М.М. (ІК НАНУ).

Загальні підходи щодо синтезу сучасних систем автоматичного керування викладено в [1] та [2].

Метод еквівалентного перетворення рівнянь руху складних нелінійних систем до форми Гаммерштейна запропоновано в [3].

Мета роботи полягає у встановленні адекватного математичного опису нелінійних цифрових САК із застосуванням часової модуляції імпульсів керування та синтезі оптимальних, за квадратичним критерієм, керувань в зазначених САК.

Викладення основного матеріалу дослідження. У роботі для математичного опису процесів, що відбуваються у нелінійних цифрових САК із застосуванням часової модуляції імпульсів керування застосований метод простору стану.

Вважається, що САК складається із з'єднаних послідовно імпульсного перетворювача, виконавчого пристрою та об'єкту керування. Виконавчий пристрій та об'єкт керування складають безперервну лінійну частину САК з відомою передаточною функцією. За таких умов достатньо розглядати тільки рівняння зміни стану, яке в загальному випадку для САК із застосуванням часової модуляції імпульсів керування набуває наступного вигляду:

$$\vec{x}[n+1] = A[n]\vec{x}[n] + \vec{b}[n]u[n]. \quad (1)$$

де $\vec{x}$ – вектор координат стану; u – сигнал керування; A – перехідна матриця; B – матриця зміни стану (керування).

Розглянуте рівняння зміни стану є нестационарним та нелінійним навіть при лінійній частині САК. В окремому, найбільш розповсюдженному випадку застосування широтно-імпульсної модуляції (ШІМ), рівняння зміни стану залишається нелінійним, але може бути приведено до стаціонарного вигляду наступним еквівалентним перетворенням:

$$\vec{x}[n+1] = A[n](\vec{x}[n] + A^{-1}[n]\vec{b}[n]u[n]), \quad (2)$$

де перехідна матриця є матрицею з постійними коефіцієнтами і залежить тільки від періоду імпульсів управління, який також є постійним:

$$A[n] = A[T] = A. \quad (3)$$

Модифікований вектор зміни стану для САК з ШІМ є вектором з постійними компонентами і залежить тільки від тривалості імпульсів керування:

$$A^{-1}[T]\vec{b}[\tau] = \vec{\beta}[\tau]. \quad (4)$$

За умов такого опису руху за вказаним методом маємо наступні співвідношення руху САК:

$$\vec{x}[n+1] = A(\vec{x}[n] + \vec{\beta}u[n]). \quad (5)$$

Методом аналітичного конструювання оптимальних регуляторів досягається вирішення завдання синтезу для квадратичного критерію якості на основі методу динамічного програмування Беллмана, але тільки для лінійних та стаціонарних дискретних САК. Для нелінійних САК, до яких відносяться системи з ШІМ, таке рішення ще не встановлене. Тому доцільно використати підхід, який заснований на побудові нелінійних САК із гарантованими властивостями стійкості на основі методу Ляпунова.

Алгоритмічна основа пропонованого підходу складається у виконанні наступних етапів.

1. Визначення критерію оптимізації процесів в САК.
2. Визначення умов оптимізації.
3. Визначення мети синтезу.
4. Модифікація критерію якості.
5. Визначення завдання оптимізації.
6. Перевірка та верифікація властивостей отриманого рішення задачі оптимізації.

Отримані авторами співвідношення дозволяють визначити параметри цифрового регулятора з ШІМ, що відтворює оптимальну модуляційну характеристику та забезпечує оптимальне демпфування квадратичного показника якості і, тим самим, підвищення точності регулювання в САК з ШІМ. Отримана модуляційна характеристика є істотно нелінійною і визначається параметрами ВП, проте при цифровій реалізації її відтворення не представляє складнощів.

Для апробації отриманих рішень було вирішено тестове завдання. Проведений авторами комп'ютерний експеримент полягав у визначенні оптимальних керувань в обраній моделі САК у порівнянні з САК із лінійною модуляційною характеристикою.

Висновки. Обґрунтовано підхід до оптимізації складних цифрових систем автоматичного керування, в яких застосовувано перетворення сигналів керування в послідовність імпульсів із часовою модуляцією. Запропонований узагальнений опис систем вказаного типу та запропоновано еквівалентне перетворення дискретних рівнянь їх руху, що дозволяє враховувати зміну протяжності імпульсів керування при лінійній безперервній незмінній частині системи автоматичного керування. Для систем автоматичного керування із застосуванням широтно-імпульсної модуляції сигналу керування удосконалено алгоритм синтезу, а саме: закон зміни полярності імпульсів та вигляду модуляційної характеристики на основі методу Ляпунова. Отримані функціональні залежності, що встановлюють вигляд закону зміни полярності імпульсів та аналітичного опису оптимальної модуляційної характеристики широтно-імпульсного перетворювача сигналу керування за завданням квадратичним критерієм якості та параметрами незмінної безперервної частини системи.

ЛІТЕРАТУРА

1. Richard C. Dorf and Robert H. Bishop. Modern control systems. Pearson Education Limited, 2022. – 1024 p.
2. Graham C. Goodwin, Stefan F. Graebe and Mario E. Salgado. Control system design. Prentice Hall, 2000 – 908 p.
3. System technologies for modelling of complex processes / Monograph, edited by prof. A.I. Mikhalyov. – Dnipro: NMetAU –CPI “System Technologies”, 2016. – 608 p.

MATHEMATICAL DESCRIPTION AND OPTIMIZATION BY THE QUADRATIC QUALITY CRITERION OF AUTOMATIC CONTROL SYSTEMS USING PULSE WIDTH MODULATION OF SIGNALS

Myrhorod Volodymyr, Hvozdeva Iryna

Abstract. *An approach to the optimization of complex digital automatic control systems (ACS) is proposed, in which the conversion of control signals into a sequence of pulses*

with time modulation is used. The requirements for actuators in many applications necessitate the use of such a conversion to achieve proportional regulation of the output value in accordance with the input control signal. A generalized description of digital automatic control systems of the specified type and an equivalent transformation of their discrete equations of motion, which is based on the reduction of such equations to the Hammerstein form, are proposed. Such a transformation significantly simplifies the mathematical description of digital ACSs and requires fewer resources for computational implementation. For ACSs, using pulse-width modulation of the control signal, the synthesis algorithm has been improved. A feature of the proposed approach is the inclusion in the criterion of optimality of energy costs for control in the form of a dependence on the length of control pulses. Functional dependencies are obtained that establish the form of the law of pulse polarity change and analytical description of the optimal modulation characteristic of the pulse-width converter of the control signal according to the given quadratic quality criterion and parameters of the invariable continuous part of the system.

Keywords: *mathematical modeling, nonlinear digital systems, automatic control, optimization methods, pulse-width modulation*

REFERENCE

1. Richard C. Dorf and Robert H. Bishop. Modern control systems. Pearson Education Limited, 2022. – 1024 p.
2. Graham C. Goodwin, Stefan F. Graebe and Mario E. Salgado. Control system design. Prentice Hall, 2000 – 908 p.
3. System technologies for modelling of complex processes / Monograph, edited by prof. A.I. Mikhalyov. – Dnipro: NMetAU –CPI “System Technologies”, 2016. – 608 p.

МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ МОДЕЛЮВАННЯ РАФІНУВАННЯ МЕТАЛІВ

Надригайло Т.Ж.¹, Моргун Є.М.²

¹Дніпровський державний технічний університет, к.т.н., доцент, Україна

²Дніпровський державний технічний університет, аспірант, Україна

Анотація. Рафінування металу є ключовим етапом у виробництві якісних металевих матеріалів, під час якого видаляються домішки відповідно до встановлених галузевих норм. Цей процес включає складні хімічні, фізичні та термодинамічні взаємодії, що відбуваються на різних стадіях, зокрема плавленні, окисленні та відновленні. Використання ефективних технологій переробки не лише сприяє покращенню якості кінцевого продукту, а й забезпечує зниження рівня відходів, зменшення негативного впливу на довкілля і оптимізацію енергоспоживання.

Через високу складність цих процесів традиційних емпіричних методів часто недостатньо для їх оптимізації. Тому як у наукових дослідженнях, так і в промисловій практиці зростає потреба в точних прогностичних моделях. Для імітації процесів рафінування було розроблено різні методи моделювання, кожен із яких має свої переваги та обмеження. Такі моделі допомагають глибше зрозуміти поведінку металів і домішок за різних умов, що дозволяє покращити контроль над параметрами рафінування та підвищити ефективність процесу.

Дана робота містить огляд основних методів та засобів, які використовуються для моделювання процесу рафінування металу.

Ключові слова: рафінування металу, домішки, очистка, математичне моделювання, оптимізація і ефективність виробництва.

Для підвищення якості сталі її піддають рафінуванню, тобто очищенню сталі від домішок, які погіршують її якість. Очищати сталь можна в сталеварних агрегатах і поза ними. Це два шляхи рафінування сталі. Кожний із них по-різному впливає на техніко-економічні показники сталеварних агрегатів.

У процесі рафінування сталі в агрегатах продовжується час перебування розплавів у них, що спричинює збільшення собівартості сталі та зменшення продуктивності агрегатів.

Впровадження позаагрегатного рафінування сталі потребує спеціального обладнання, яке може бути різної складності: ковші, печі, установки та ін. Рафінують сталь одразу після випуску з агрегату, тобто розплавлену, або після

кристалізації, тобто тверду. У процесі рафінування розплавленої сталі її вакуумують, продувають інертними газами, перемішують із синтетичними флюсами тощо.

Тверду сталь переплавляють електрошлаковим, вакуумно-дуговим, вакуумно-індукційним способами тощо. Після закінчення варіння сталь випущена у ківш продовжує вбирати гази з довкілля. Отже, щоб ізолювати сталь від повітря, а також зменшити кількість домішок, розчинених у ній, сталь вакуумують [1].

Існує кілька методів рафінування (очищення) металів, які застосовуються залежно від типу металу та бажаного ступеня чистоти. Основними з них є:

1. Пірометалургійні методи.

Ці методи ґрунтуються на використанні високих температур для видалення домішок.

- Плавка – основний метод рафінування, де метал розплавляється, а домішки або випаровуються, або осідають в шлак.

- Окислювальна плавка – використовується для видалення домішок, таких як вуглець або сірки, за рахунок окислення у присутності кисню.

- Зонна плавка – метал повільно плавиться у певній зоні, і домішки концентруються в одній частині зливка, що дозволяє поступово їх видалити.

2. Електролітичне рафінування.

Цей метод використовується для отримання дуже чистих металів, таких як мідь чи алюміній.

- Електроліз – процес, при якому метал розчиняється на аноді та осаджується на катоді. Домішки залишаються в електроліті або утворюють анодний шлам.

3. Гідрометалургійні методи.

Засновані на розчиненні металів у рідких розчинах та подальшому осадженні чи виділенні чистого металу.

- Легування – процес розчинення руди в кислоті або лузі з наступним виділенням чистого металу через електроліз або хімічне осадження.

- Амальгамування – використання ртуті для вилучення благородних металів, таких як золото чи срібло.

4. Хімічні способи.

Використовуються для поділу металів та домішок на основі їх різної хімічної активності.

- Хлорування – метал реагує з хлором, утворюючи леткі з'єднання, які потім поділяються.

- Солянки – домішки переводять у розчин з використанням спеціальних реагентів, після чого чистий метал залишається у твердому стані.

5. Вакуумна дистиляція.

Цей метод застосовується для металів із низькою температурою кипіння, таких як цинк чи магній. Метал випаровується у вакуумі, після чого пара конденсується у чисту форму.

Кожен із цих методів може бути адаптований для конкретних типів металів та домішок, а також для вимог до їхньої чистоти.

Математичне та комп'ютерне моделювання процесу рафінування металів, зокрема сталі, є важливим інструментом для оптимізації виробництва та підвищення якості продукту. Ці методи дозволяють прогнозувати поведінку металу та домішок на різних стадіях рафінування, оцінювати вплив параметрів процесу та розробляти ефективні способи управління виробництвом.

1. Математичне моделювання.

Математичні моделі засновані на законах фізики, хімії та термодинаміки. У процесі рафінування металів моделюються такі явища, як теплопередача, дифузія домішок, реакція з киснем, фазові переходи та динаміка потоків рідини і газу [2].

Основні види математичних моделей:

- Термодинамічні моделі: дозволяють розрахувати енергетичний баланс системи та оцінити умови, за яких можливі фазові переходи (наприклад, плавлення або випаровування домішок).

- Кінетичні моделі: описують швидкості хімічних реакцій між металом та навколишнім середовищем (наприклад, киснем або шлаком), а також дифузію домішок.

- Гідродинамічні моделі: моделюють рух рідкого металу та шлаку в плавильних печах, що важливо для рівномірного розподілу температури та перемішування.

- Моделі перенесення мас: описують, як домішки видаляються з металу шляхом дифузії чи хімічних реакцій із газовою фазою.

Приклади:

- Модель плавлення сталі: враховує дифузію вуглецю, марганцю, сірки та інших домішок у розплавленій сталі, а також їхню реакцію з киснем для визначення найкращих умов плавки.

- Теплові моделі: допомагають керувати температурою на різних стадіях плавки, щоб уникнути перегріву або недостатньої температури.

2. Комп'ютерне моделювання.

Комп'ютерні моделі використовуються для симуляції реальних процесів у віртуальному середовищі. Вони дозволяють відтворювати складні системи та процеси, які неможливо повністю описати аналітичними формулами [3].

Інструменти та методи моделювання:

- Метод кінцевих елементів (FEM): використовується для моделювання теплопередачі, напруги та деформації у твердому тілі при його плавленні та кристалізації. FEM особливо корисний щодо формування структури та властивостей сталі при охолодженні.

- Метод кінцевих об'ємів (FVM): застосовується для моделювання течії рідин та газів, а також перенесення тепла та маси у розплаві. Це важливо для моделювання процесів перемішування рідкого металу та видалення домішок.

- Мультифізичні моделі: включають комбінацію різних фізичних процесів, таких як теплопередача, хімічні реакції та механіка рідини. Це дає можливість аналізувати взаємодію між ними та знаходити оптимальні параметри для рафінування сталі.

Програми для моделювання:

- ANSYS Fluent і COMSOL Multiphysics — програми, які широко використовуються для моделювання процесів теплопередачі, перебігу рідин і хімічних реакцій.

- Thermo-Calc – програма для термодинамічного моделювання фазових діаграм та вивчення стабільності фаз залежно від температури та складу.

3. Оптимізація процесу.

Моделювання дозволяє проводити віртуальні експерименти, змінюючи параметри процесу (температура, тиск, склад шлаку, кількість кисню, що вводиться і ін.) і знаходити оптимальні умови для виробництва високоякісної сталі [4].

Приклади оптимізації:

- Зниження кількості домішок: моделі показують, як зміни температури та тиску впливають на видалення сірки та фосфору, що покращує механічні властивості сталі.

- Економія ресурсів: оптимізація параметрів плавки дозволяє знизити витрати енергії, сировини та допоміжних матеріалів, таких як кисень та флюси.

- Підвищення продуктивності: правильне налаштування процесу за допомогою моделей може скоротити час плавки, прискорити видалення домішок та зменшити втрати металу.

4. Застосування штучного інтелекту.

Сучасні методи машинного навчання та штучного інтелекту (AI) також знаходять застосування у моделюванні процесів рафінування металів. AI допомагає аналізувати великі обсяги даних та прогнозувати результати експериментів або виробничих процесів.

Приклади використання AI:

- Прогнозування якості сталі: на основі даних про параметри процесу, штучні нейронні мережі можуть прогнозувати кінцеву якість продукту та пропонувати коригування в реальному часі.

- Оптимізація управління процесом: AI може автоматично регулювати параметри, такі як подача кисню та температура для досягнення найкращого результату.

Таким чином, математичне та комп'ютерне моделювання процесу рафінування стали відігравати ключову роль у покращенні якості продукції, зниженні витрат та підвищенні ефективності виробництва.

ЛІТЕРАТУРА

1. Чернега Д. Ф., Богушевський В. С., Готвянський Ю. Я. та ін. Основи металургійного виробництва металів і сплавів. К., 2006. – 503 с.
2. Смірнов О. М., Зборщик О. М. Позапічне рафінування чавуну і сталі: навчальний посібник. Донецьк :Ноулідж, 2013. – 179 с.
3. Khan, M. A. A., & Sheikh, A. K. (2018). A comparative study of simulation software for modelling metal casting processes. International Journal of Simulation Modelling, vol. 17, Iss. 2, pp. 197-209.
4. Металургія (проблеми, теорія, технологія, якість) : підручник / Харлашин П.С. та ін. Донецьк : ТОВ «Норд-комп'ютер», 2005. – 724 с

METHODS AND MEANS FOR MODELING METAL REFINING

Tetiana Nadryhailo, Yevhenii Morhun

Abstract. *Metal refining is a key stage in the production of high-quality metal materials, during which impurities are removed in accordance with established industry standards. This process involves complex chemical, physical, and thermodynamic interactions that occur at various stages, including melting, oxidation, and reduction. The use of efficient refining technologies not only improves the quality of the final product but also reduces waste levels, minimizes environmental impact, and optimizes energy consumption.*

Due to the high complexity of these processes, traditional empirical methods are often insufficient for their optimization. As a result, the demand for accurate predictive models is growing in both scientific research and industrial practice. Various modeling methods have been developed to simulate refining processes, each with its own advantages and limitations. These models provide a deeper understanding of the behavior of metals and impurities under different conditions, allowing for better control of refining parameters and improved process efficiency.

This paper presents an overview of the main methods and means used for modeling the metal refining process.

Keywords: *metal refining, impurities, cleaning, mathematical modeling, optimization and production efficiency.*

REFERENCE

1. Cherneha D. F., Bohushevs'kyi V.S., Hotvyans'kyi Yu. Ya. ta in. Osnovy metalurhiynoho vyrobnytstva metaliv i splaviv. K., 2006 . – 503 s. [inUkrainian]

2. Smirnov O.M., Zborshchuk O.M. Pozapichne rafinuvannya chavunu i stali: navchal'nyy posibnyk. Donets'k: Noulidzh, 2013. – 179 s. [inUkrainian]
3. Khan, M. A. A., & Sheikh, A. K. (2018). A comparative study of simulation software for modeling metal casting processes. International Journal of Simulation Modelling, vol. 17, iss. 2, pp. 197-209.
4. Metalurhiya (problemy, teoriya, tekhnolohiya, yakist'): pidruchnyk / Kharlashyn P.S. ta in. Donets'k: TOV «Nord-komp'uter», 2005. – 724 s. [in Ukrainian]

PHASE SPACE RECONSTRUCTION FOR BRAIN STATE CLASSIFICATION BY EEG SIGNALS

Panasenko Y. S.¹, V. Belozyorov²

¹ Oles Honchar Dnipro National University, PhD student, Ukraine

² Oles Honchar Dnipro National University, Doctor of Physical and Mathematical
Sciences, Professor, Ukraine

Abstract. *This thesis explores the classification of brain states based on EEG data, focusing on the distinction between relaxation and concentration. A classification approach using recurrence plot analysis, a method from chaos theory, is compared with traditional spectral analysis. The optimal phase space reconstruction parameters were determined: a delay equal 25 ms and an dimension of embedding space equal 4. These values align with spectral characteristics of the EEG signal, confirming their physiological relevance. The study suggests that these parameters can be used to develop differential equations describing chaotic brain activity. The findings are relevant for EEG analysis in portable devices, brain-computer interfaces, and cognitive training applications.*

Keywords. *EEG, phase space reconstruction, recurrence analysis, chaotic dynamics, brain state classification.*

Introduction. The development of portable electroencephalography (EEG) devices has increased interest in efficient brain state classification methods that can operate with limited computational resources. EEG-based classification is crucial for various applications, including brain-computer interfaces, cognitive training, and self-monitoring of mental states. This study focuses on distinguishing between two fundamental states—relaxation and concentration—by analyzing EEG signals. Additionally, the classification of open and closed eyes is considered, as eye closure is commonly associated with increased relaxation.

Traditional EEG analysis relies on spectral methods, which examine frequency components of brain activity. However, recent advances in nonlinear dynamics and chaos theory provide alternative approaches, such as recurrence plot analysis. Recurrence plots allow for the extraction of features that capture the complex temporal structure of EEG signals, potentially improving classification accuracy. This study compares recurrence-based classification with conventional spectral analysis to assess its effectiveness.

Methods and Data Processing. The study utilizes the *EEG Motor Movement/Imagery Dataset* [2], which contains over 1,500 EEG recordings from 109 participants. Each recording lasts between one and two minutes, capturing brain activity during various motor and imagery tasks. The data was collected using a 64-channel EEG system at a sampling rate of 160 Hz. For analysis, recordings corresponding to the open- and closed-eye conditions were selected, as they provide a clear contrast between relaxation and concentration states.

To improve signal quality, preprocessing was performed to remove noise. Low-frequency components below 2 Hz, which may reflect head movements and blinking, were eliminated. Additionally, 50/60 Hz powerline interference and high-frequency muscle artifacts above 50 Hz were filtered out. A Short-Time Fourier Transform (STFT) with a Hann window of 1-second segments was used for noise suppression. The signals were then normalized using Z-score normalization with 1-second overlapping windows to ensure stability and comparability across recordings.

Phase Space Reconstruction and Recurrence Analysis. Phase space reconstruction is a key method in nonlinear time series analysis, allowing the extraction of hidden dynamic structures from EEG signals. It requires two parameters: the time delay τ and the dimension of the embedding space m . The time delay was determined using the average mutual information (AMI) method, which identifies an optimal delay that preserves signal dependencies while reducing redundancy [3]. The dimension of the embedding space was estimated using the false nearest neighbors (FNN) algorithm, which ensures that the reconstructed phase space maintains the original system's geometry without artificial distortions.

Experimental results revealed that the optimal parameters for EEG signals in the closed-eye state were $\tau = 4$ samples, corresponding to 25 ms ($4 / 160 \text{ Hz} = 0.025 \text{ s}$), and $m = 4$. Figure 1 shows the computed values of τ and m for all recordings. These values were consistent across different participants and aligned with the spectral characteristics of EEG signals, where a dominant frequency of 10 Hz was observed. Since 10 Hz corresponds to a 100 ms period, the selected delay represents one-quarter of a full oscillatory cycle, ensuring an optimal reconstruction of the system's dynamics.

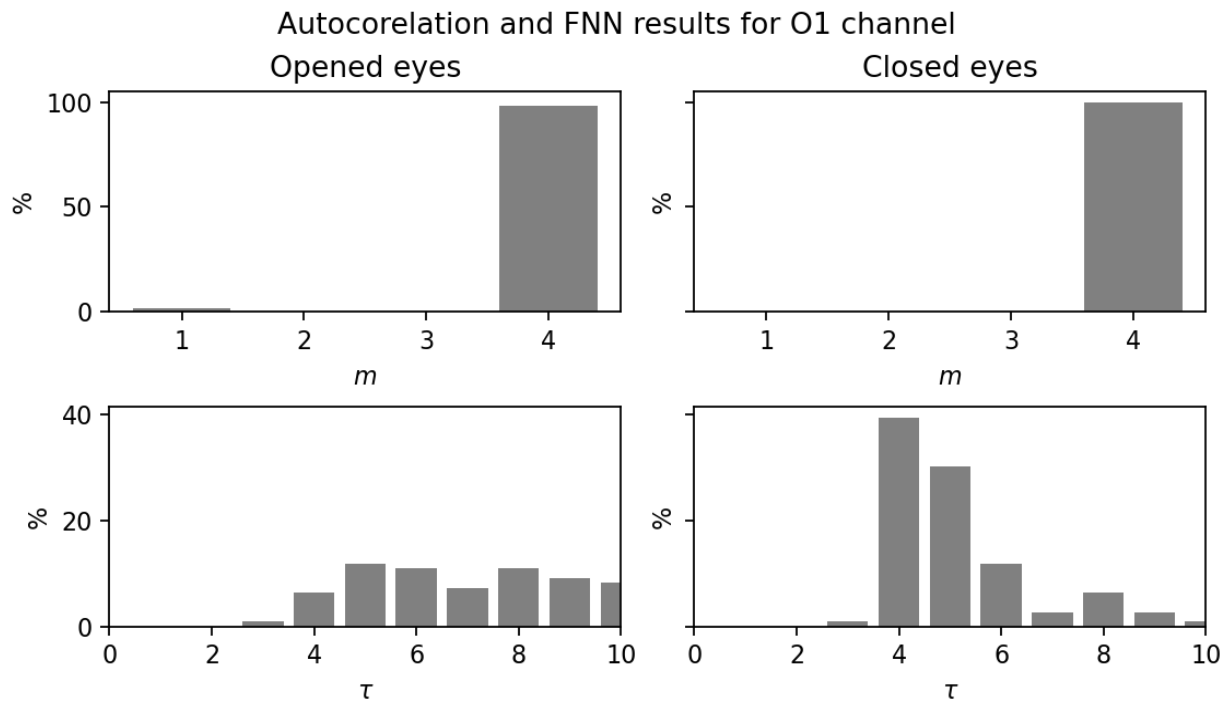


Figure 1 - Calculated τ and m for dataset recording

Conclusion. The findings confirm that EEG signals exhibit low-dimensional chaotic behavior, which can be effectively analyzed using phase space reconstruction and recurrence plots. The determined parameters ($\tau = 25$ ms, $m = 4$) align with the physiological characteristics of EEG rhythms, reinforcing their validity. These parameters provide a foundation for constructing mathematical models of brain activity based on differential equations.

Future work will focus on formulating a system of differential equations that describes the chaotic dynamics of EEG signals. Studying the attractors of such a system using the methods proposed in [1] may provide additional insights into brain states associated with relaxation and concentration. The results of this study contribute to the development of more accurate and computationally efficient EEG analysis methods for portable brain-computer interface applications.

REFERENCE

1. V. Ye. Belozyorov. On novel conditions of chaotic attractors existence in autonomous polynomial dynamical systems. *Nonlinear Dynamics*. Вип. 91, № 4. С. 2435–2452. DOI:10.1007/s11071-017-4023-y.
2. EEG Motor Movement/Imagery Dataset. URL: <https://archive.physionet.org/pn4/eegmmidb/> (accessed 02/21/2024).

3. Myers A., Khasawneh F. A. On the automatic parameter selection for permutation entropy. Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science. Vol. 30, Issue 3. P. 033130. DOI:10.1063/1.5111719.

ВІДНОВЛЕННЯ ФАЗОВОГО ПРОСТОРУ ДЛЯ КЛАСИФІКАЦІЇ СТАНІВ МОЗКУ ЗА СИГНАЛАМИ ЕЕГ

Панасенко Єгор, Білозьоров Василь

Анотація. Ця робота досліджує класифікацію станів мозку на основі даних ЕЕГ, зосереджуючись на розмежуванні станів розслаблення та концентрації. Метод класифікації, заснований на аналізі рекурентних діаграм, що є підходом теорії хаосу, порівнюється з традиційним спектральним аналізом. Визначені оптимальні параметри відновлення фазового простору: затримка 25 мс і розмірність простору вкладення 4. Ці значення узгоджуються зі спектральними характеристиками сигналу ЕЕГ, що підтверджує їхню фізіологічну обґрунтованість. Дослідження показує, що ці параметри можуть бути використані для розробки диференціальних рівнянь, які описують хаотичну активність мозку. Отримані результати є актуальними для аналізу ЕЕГ у портативних пристроях, розробки інтерфейсів “мозок-комп’ютер” та когнітивного тренування.

Ключові слова: ЕЕГ, відновлення фазового простору, рекурентний аналіз, хаотична динаміка, класифікація станів мозку.

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ КІНЕТИКИ ПРОЦЕСІВ ВІДНОВЛЕННЯ З ВЮСТИТУ ЗАЛІЗА І ЙОГО НАВУГЛЕЦЮВАННЯ ТВЕРДИМ ВУГЛЕЦЕМ

Пантейков С. П.

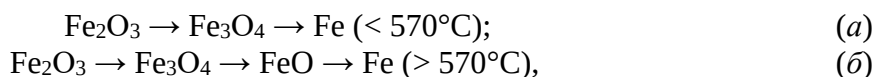
*Дніпровський державний технічний університет, канд. техн. наук, доцент,
Україна*

Анотація. Тези доповіді присвячені математичному моделюванню кінетики процесу відновлення металевого заліза з поодинокого шматка відновленої до стану вюститу залізної руди, основними ланками якого є розплавлення вюститу і відновлення з нього металевого заліза з утворенням монооксиду вуглецю. Розроблена автором математична модель передбачає вирішення задачі Стефана методом Дюзінбера для шматка відновленої руди (вюститу). Її використання дозволяє вивчати кінетику останнього етапу процесу ступінчастого відновлення заліза з його навуглецюванням при використанні як відновника твердого вуглецю при необхідних розмірах шматків залізної руди і різних температурах процесу відновлення. Розроблена математична модель може бути використана в наступному для розробки математичної моделі повного процесу отримання заліза із залізрудних матеріалів, що складається з послідовних етапів непрямого (газом CO) і прямого (твердим вуглецем) відновлення.

Ключові слова: вюстит, залізо, відновлення, твердий вуглець, кінетика, математична модель, задача Стефана, метод Дюзінбера.

Вступ. Інтерес до процесів отримання заліза безпосередньо з різноманітних залізрудних матеріалів в пічах прямого відновлення різними відновниками в останні роки різко підвищився. Пов'язано це, вірогідно, з екологічними питаннями та одночасним підвищенням ресурсозберігаючої ефективності процесів прямого отримання заліза, особливо це актуально для одностадійного одержання сталі з шихти, що містить оксиди заліза.

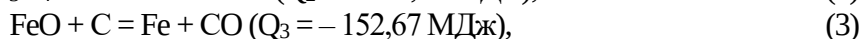
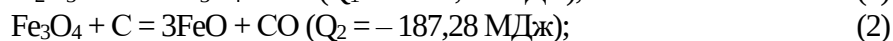
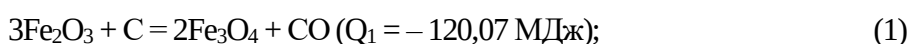
Загальновідомо, що відновлення заліза з його оксидів відбувається поетапно – за рахунок перетворення кожного вищого оксиду заліза на наступний (нижчий) оксид заліза і наприкінці – перетворення найнижчого оксиду заліза на металеве залізо. Все це відбувається за рахунок послідовного відщеплення атомів кисню від оксидів заліза за нижченаведеними схемами:



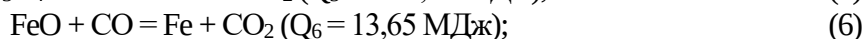
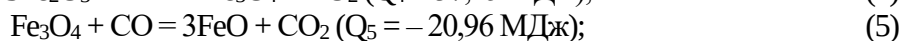
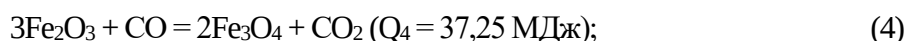
при цьому інтерес металургів, як правило, прикутий до високотемпературної схеми (б).

Процес відновлення заліза відноситься до складних фізико-хімічних процесів, термодинамічні та кінетичні умови яких безперервно змінюються в силу одночасного перебігу взаємопов'язаних фізичних явищ і хімічних перетворень, на які, в свою чергу, впливають температури процесів відновлення та їх зміна.

Вважають, що відновлення заліза з його оксидів відбувається як за реакціями прямого відновлення (твердим вуглецем) заліза:



так і за реакціями непрямого відновлення (газами-відновниками), у тому числі за допомогою відновного газу CO:



при цьому ендотермічну реакцію (3) прямого відновлення заліза чомусь всупереч положенням термодинаміки завжди замінюють екзотермічною реакцією (6) непрямого відновлення заліза газом CO у купі з ендотермічною реакцією (7) утворення CO при газифікації твердого вуглецю C, що носить назву «реакція Белла-Будуара»:



яка є важливою з точки зору забезпечення непрямого відновлення оксидів заліза у відновних печах за реальних температур процесу.

Основний матеріал

Однак, як показали термодинамічні аналізи [1, 2] хімічних реакцій (4)–(6), газ CO не може бути відновником заліза з його найнижчого оксиду (вюститу) понад певне значення температури: за даними автора роботи це значення становить 765°C, згідно з різними літературними джерелами [3–5] значення цієї температури знаходиться у діапазоні 327–777°C. Тобто непряме відновлення у відновних печах при високих температурах реального металургійного процесу може відбуватися лише за реакціями (4) і (5) [6], а залізо з вюститу при високих температурах (> 1100°C) відновлюється виключно

за рахунок твердого вуглецю С [7–9] за реакцією (3) – тобто точно так, як і марганець, який є найближчим «родичем» заліза в Періодичній системі хімічних елементів.

Це свідчить про те, що всі існуючі математичні моделі, які описують кінетику процесу ізотермічного відновлення металевого заліза з вюститом газом СО, у тому числі з наступним науглецюванням відновленого заліза, є не зовсім коректними в силу вищевикладеного наукового факту, вперше встановленого [10] автором цієї роботи, що робить актуальним розробку математичної моделі останнього етапу відновлення заліза у відновній схемі (б) твердим вуглецем С. Причому, як виявив наступний термодинамічний аналіз [11], науглецювання заліза при його відновленні з FeO також неможливе за рахунок газу СО при температурах відновлення заліза у відновних печах.

Для математичного опису останнього етапу процесу відновлення заліза за схемою (б) твердим вуглецем С вибрали зональну модель відновлення шматка залізної руди правильної геометричної форми (кулі), що складається з найнижчого оксиду заліза – вюститу (FeO).

Механізм відновлення поодинокого шматка відновленої залізної руди, основним компонентом якої є вюстит, до металевого заліза твердим вуглецем С складається з наступних послідовних і паралельних стадій:

1. Нагрівання і плавлення зони (шару) FeO на поверхні шматка руди (рис. 1).
2. Відновлення заліза з FeO за рахунок твердого вуглецю С за реакцією (3).
3. Навуглецювання відновленого заліза за рахунок твердого вуглецю С.

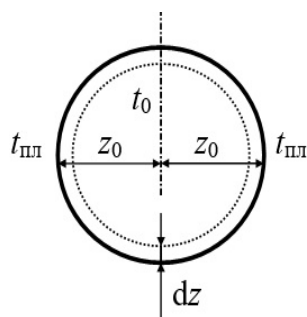


Рисунок 1 – Розрахункова область розподілу температур за радіусом шматка руди

Математичний опис процесу нагрівання шматка руди і плавлення на його поверхні шару FeO має наступний вигляд [12]:

Рівняння теплопровідності:

$$c \cdot \rho \cdot \frac{\partial t(x, \tau)}{\partial \tau} = \lambda \cdot \left(\frac{\partial^2 t(x, \tau)}{\partial x^2} + \frac{2}{x} \cdot \frac{\partial t(x, \tau)}{\partial x} \right), 0 < x < z(\tau), \tau > 0 \quad (8)$$

Початкові умови:

$$t(x, 0) = t_0, 0 < x < z(0), z(0) = z_0. \quad (9)$$

Граничні умови:

$$\frac{\partial t(0, \tau)}{\partial x} = 0, \tau > 0; \quad (10)$$

– у період нагрівання

$$-\lambda \cdot \frac{\partial t(x, \tau)}{\partial x} = \alpha \cdot (t_c - t(x, \tau)), x = z(\tau); \quad (11)$$

– у період розплавлення

$$-\rho \cdot L \cdot \frac{dz(\tau)}{d\tau} = \alpha \cdot (t_c - t(x, \tau)) - \lambda \cdot \frac{\partial t(x, \tau)}{\partial x}, x = z(\tau); t(x, \tau) = t_{пл}, \quad (12)$$

де c , ρ , λ – відповідно теплоємність, щільність і теплопровідність матеріалу шматка руди; t_0 , z_0 – відповідно початкові температура і розмір шматка руди; t_c , $t_{пл}$ – відповідно температури навколишнього середовища і плавлення матеріалу шматка руди; x – поточний розмір шматка руди; α – коефіцієнт тепловіддачі конвекцією від навколишнього середовища; L – теплота фазового переходу (прихована теплота плавлення) матеріалу шматка руди; τ – час процесу.

Для вирішення даної задачі Стефана використовуємо явну різницеву схему розрахунку із застосуванням методу Дюзінбера (Duzinberre) [12]. Температура плавлення матеріалу руди (вюститу) приймалася на підставі даних діаграми двокомпонентної системи «вюстит–кремнезем». Ступінь відновлення заліза з FeO в залежності від температури процесу відновлення приймалася на основі літературних даних. Ступінь науглецювання відновленого заліза за рахунок твердого вуглецю С приймалася на підставі даних діаграми стану сплавів «залізо–вуглець».

Розроблена математична модель разом із розробленою раніше [13] математичною моделлю кінетики ступінчастого процесу непрямого відновлення вюститу з гематиту газом CO може бути використана в наступному для розробки математичної моделі повного процесу отримання Fe за схемою (б), що складається з послідовних етапів непрямого (газом CO) і прямого (твердим вуглецем С) відновлення.

Висновки. Математична модель дозволяє вивчати кінетику етапів процесу відновлення заліза з вюститу з використанням як відновника твердого вуглецю при необхідних розмірах шматків відновленої до FeO залізної руди і різних температурах процесу відновлення.

ЛІТЕРАТУРА

1. Пантейков С. П. Розрахунок температур перебігу хімічних реакцій процесу ступінчастого відновлення заліза з гематиту газом CO і газифікації твердого вуглецю за існуючими формулами і за стандартними значеннями ентальпії та ентропії речовин. Збірник наукових праць ДДТУ (технічні науки): Кам'янське, Україна: Видавництво ДДТУ. – 2021. Вип. 2(39). С. 16–26. DOI:10.31319/2519-2884.39.2021.2.
2. Пантейков С. П. Розрахунок температур перебігу хімічних реакцій процесу ступінчастого відновлення заліза з гематиту газом CO і газифікації твердого вуглецю за мірами хімічної спорідненості речовин до кисню. International Science Journal of Engineering & Agriculture (Poland). – June 2022. Vol. 1(2). pp. 1–8. DOI:10.46299/J.ISJEA.20220102.1.
3. Panteikov S. P. O temperaturakh protekaniya reaktsyi vosstanovleniya zheleza yz hematytaz hazom CO s pozytsiyi termodinamyky: Presented at the Abstracts of the IX-th International Scientific and Practical Conference “Trends of development modern science and practice”, Stockholm, Sweden, November 16–19, 2021. pp. 568–574. DOI:10.46299/ISG.2021.II.IX [in Russian].
4. Panteikov S. P. O vliyaniy stepeny khymicheskoho srodstva veshchestv k kyslorodu na vozmozhnost protekaniya reaktsyi vosstanovleniya zheleza yz hematytaz hazom CO: Presented at the Abstracts of the X-th International Scientific and Practical Conference “Science foundations of modern science and practice”, Athens, Greece, November 23–26, 2021. pp. 640–648. DOI:10.46299/ISG.2021.II.X [in Russian].
5. Using Ellingham diagram, how to determine that in between C and CO which is better reducing agent? URL: <https://socratic.org/questions/using-ellingham-diagram-how-to-determine-that-in-between-c-and-co-which-is-bette> [in English].
6. Panteikov S. P. O priamom y kosvennom vosstanovleniy zheleza: In Monografia pokonferencyjna “Science, research, development #41. Technics and technology”, Belgrade, Republika Srbija, 30.05.2021–31.05.2021. Eds. Warszawa, Poland: Sp. z o.o. «Diamond trading tour» – 2021. pp. 37–43. URL: http://konferentsiya.com.ua/files/113_07_vi_2021.pdf [in Russian].
7. Panteikov S. P. O temperaturakh protekaniya reaktsyi vosstanovleniya zheleza yz hematytaz tvërdym uhlerodom s pozytsiyi termodinamyky: Presented at the Proceedings of the VI-th International Scientific and Practical Conference “Innovations technologies in science and practice”, Haifa, Israel, February 15–18, 2022. pp. 539–548. DOI:10.46299/ISG.2022.I.VI [in Russian].
8. Panteikov S. P. O vliyaniy stepeny khymicheskoho srodstva veshchestv k kyslorodu na vozmozhnost protekaniya reaktsyi vosstanovleniya zheleza yz hematytaz tvërdym uhlerodom: Presented at the Proceedings of the XIV-th International Scientific and Practical

Conference “Theoretical and science bases of actual tasks” Lisbon, Portugal, April 12–15, 2022. pp. 618–627. DOI:10.46299/ISG.2022.1.14 [in Russian].

9. Panteikov S. P. Opredelenye temperatur protekaniya reaktsyi vosstanovleniya zheleza yz hematyta tvërdym uhlerodom po stepeny khymicheskoho srodstva veshchestv k kyslorodu: Presented at the Proceedings of the XVIII-th International Scientific and Practical Conference “Advancing in research, practice and education”, Florence, Italy, May 10–13, 2022. pp. 634–644. DOI:10.46299/ISG.2022.1.18 [in Russian].

10. Panteikov S. P. O vozmozhnosty vosstanovleniya viustyta monooksydom uhleroda: In Monografia pokonferencyjna “Science, research, development #31. Technics and technology”, Rotterdam, Koninkrijk der Nederlanden, 30.07.2020–31.07.2020. Eds. Warszawa, Poland: Sp. z o.o. «Diamond trading tour». – 2020. pp.8–11. URL: http://konferentsyia.com.ua/files/7_viii_2020s.pdf [in Russian].

11. Пантейков С. П. Термодинамічний аналіз умов перебігу хімічних реакцій науглецювання заліза газом СО при відновленні з вюститу. Вісник Приазовського державного технічного університету: зб. наук. праць. Серія: Технічні науки. Дніпро: ДВНЗ «Приазов. держ. техн. ун-т» – 2024. Вип. 49, Том 1. С. 175–183. DOI:10.31498/2225-6733.49.1.2024.321243.

12. Пантейков С. П. Математичне моделювання технологічних та фізичних процесів в металургії: Лабораторний практикум. Кам'янське: ДДТУ. – 2022. 156 с. ISBN 978-966-175-228-2.

13. Пантейков С. П. Математичне моделювання кінетики ступінчастого процесу непрямого відновлення вюститу з гематиту газом СО // «Інформаційні технології і автоматизація – 2024»: Матеріали XVII Міжнародної науково-практичної конференції (31 жовтня – 1 листопада 2024 р., м. Одеса, Україна). – Одеса, 2024. С. 86–88. URL: <https://ontu.edu.ua/itia> <https://ontu.edu.ua/download/konfi/2024/Collection-of-abstracts-of-the-conference-ITIA-2024.pdf>.

MATHEMATICAL MODELING OF THE KINETICS OF REDUCTION PROCESSES FROM WUSTITE OF IRON AND ITS CARBONIZATION WITH SOLID CARBON

Sergei Panteikov

Abstract. *The abstract of the report is devoted to mathematical modeling of the kinetics of the process of metallic iron reduction from a single piece of iron ore reduced to the state of wustite, the main links of which are the melting of wustite and the reduction of metallic iron with the formation of carbon monoxide. The mathematical model developed by the author assumes the solution of the Stefan problem by the Duzinberre method for a piece of reduced ore (wustite). Its use allows studying the kinetics of the last stage of the process of stepwise reduction of iron with its carburization when using solid carbon as a reducing agent at the required sizes of iron ore pieces and various temperatures of the reduction process. The developed mathematical model can be used subsequently to develop a mathematical model of the complete process of obtaining iron from iron ore*

materials, consisting of successive stages of indirect (CO gas) and direct (solid carbon) reduction.

Keywords: *wustite, iron, reduction, hard carbon, kinetics, mathematical model, Stefan problem, Duzinberre method.*

REFERENCE

1. Panteikov S. P. Rozrakhunok temperatur perebihu khimichnykh reaktsii protsesu stupinchastoho vidnovlennia zaliza z hematytu hazom CO i hazyfikatsii tverdoho vuhletsiiu za isnuiuchymy formulamy i za standartnymy znachenniamy entalpii ta entropii rehovyn. Zbirnyk naukovykh prats DDTU (tekhnichni nauky): Kamianske, Ukraina: Vydavnytstvo DDTU. – 2021. Vyp. 2(39). S. 16–26. DOI:10.31319/2519-2884.39.2021.2 [in Ukrainian].
2. Panteikov S. P. Rozrakhunok temperatur perebihu khimichnykh reaktsii protsesu stupinchastoho vidnovlennia zaliza z hematytu hazom CO i hazyfikatsii tverdoho vuhletsiiu za miramy khimichnoi sporidnenosti rehovyn do kysniu. International Science Journal of Engineering & Agriculture (Poland). – June 2022. Vol. 1(2). pp. 1–8. DOI:10.46299/J.ISJEA.20220102.1 [in Ukrainian].
3. Panteikov S. P. O temperaturakh protekanyia reaktsyi vosstanovlenyia zheleza yz hematyta hazom CO s pozytsyi termodynamyky: Presented at the Abstracts of the IX-th International Scientific and Practical Conference “Trends of development modern science and practice”, Stockholm, Sweden, November 16–19, 2021. pp. 568–574. DOI:10.46299/ISG.2021.II.IX [in Russian].
4. Panteikov S. P. O vlianyy stepeny khymycheskoho srodstva veshchestv k kyslorodu na vozmozhnost protekanyia reaktsyi vosstanovlenyia zheleza yz hematyta hazom CO: Presented at the Abstracts of the the X-th International Scientific and Practical Conference “Science foundations of modern science and practice”, Athens, Greece, November 23–26, 2021. pp. 640–648. DOI:10.46299/ISG.2021.II.X [in Russian].
5. Using Ellingham diagram, how to determine that in between C and CO which is better reducing agent? URL: <https://socratic.org/questions/using-ellingham-diagram-how-to-determine-that-in-between-c-and-co-which-is-bette> [in English].
6. Panteikov S. P. O priamom y kosvennom vosstanovlenyy zheleza: In Monografia pokonferencyjna “Science, research, development #41. Technics and technology”, Belgrade, Republika Srbija, 30.05.2021–31.05.2021. Eds. Warszawa, Poland: Sp. z o.o. «Diamond trading tour» – 2021. pp. 37–43. URL: http://konferentsyia.com.ua/files/113_07_vi_2021.pdf [in Russian].
7. Panteikov S. P. O temperaturakh protekanyia reaktsyi vosstanovlenyia zheleza yz hematyta tvėrdym uhlerodom s pozytsyi termodynamyky: Presented at the Proceedings of the VI-th International Scientific and Practical Conference “Innovations technologies in science and practice”, Haifa, Israel, February 15–18, 2022. pp. 539–548. DOI:10.46299/ISG.2022.I.VI [in Russian].
8. Panteikov S. P. O vlianyy stepeny khymycheskoho srodstva veshchestv k kyslorodu na vozmozhnost protekanyia reaktsyi vosstanovlenyia zheleza yz hematyta tvėrdym uhlerodom: Presented at the Proceedings of the XIV-th International Scientific and Practical

Conference “Theoretical and science bases of actual tasks” Lisbon, Portugal, April 12–15, 2022. pp. 618–627. DOI:10.46299/ISG.2022.1.14 [in Russian].

9. Panteikov S. P. Opredelenye temperatur protekaniya reaktsyi vosstanovleniya zheleza yz hematyta tvërdym uhlerodom po stepeny khymicheskoho srodstva veshchestv k kyslorodu: Presented at the Proceedings of the XVIII-th International Scientific and Practical Conference “Advancing in research, practice and education”, Florence, Italy, May 10–13, 2022. pp. 634–644. DOI:10.46299/ISG.2022.1.18 [in Russian].

10. Panteikov S. P. O vozmozhnomy vosstanovleniya viustyta monooksydom uhleroda: In Monografia pokonferencyjna “Science, research, development #31. Technics and technology”, Rotterdam, Koninkrijk der Nederlanden, 30.07.2020–31.07.2020. Eds. Warszawa, Poland: Sp. z o.o. «Diamond trading tour». – 2020. pp.8–11. URL: http://konferentsiya.com.ua/files/7_viii_2020s.pdf [in Russian].

11. Panteikov S. P. Termodynamichniy analiz umov perebihu khimichnykh reaktsii navuhletsivannia zaliza hazom CO pry vidnovlenni z viustytu. Visnyk Pryazovskoho derzhavnoho tekhnichnoho universytetu: zb. nauk. prats. Seriya: Tekhnichni nauky. Dnipro: DVNZ «Pryazov. derzh. tekhn. un-t» – 2024. Vyp. 49, Tom 1. S. 175–183. DOI:10.31498/2225-6733.49.1.2024.321243 [in Ukrainian].

12. Panteikov S. P. Matematychni modeliuvannia tekhnolohichnykh ta fizychnykh protsesiv v metalurhii: Laboratornyi praktykum. Kamianske: DDTU. – 2022. 156 c. ISBN 978-966-175-228-2 [in Ukrainian].

13. Panteikov S. P. Matematychni modeliuvannia kinetyky stupinchastoho protsesu nepriamoho vidnovlennia viustytu z hematytu hazom CO // «Informatsiini tekhnolohii i avtomatyzatsiia – 2024»: Materialy XVII Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii (31 zhovtnia – 1 lystopada 2024 r., m. Odesa, Ukraina). – Odesa, 2024. S. 86–88. URL: <https://ontu.edu.ua/itia> <https://ontu.edu.ua/download/konfi/2024/Collection-of-abstracts-of-the-conference-ITIA-2024.pdf> [in Ukrainian].

ШЛЯХИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ШЛАКОВИХ ЧАШ: АНАЛІЗ МАТЕРІАЛІВ ТА ТЕМПЕРАТУРНИХ РЕЖИМІВ

Поворотній В. В.¹, Щербина І. В.², Дьяченко Н. К.,^{3,4} Яйчук О. О.⁴

¹Український державний університет науки та технологій, к.т.н., Україна

²Дніпровський державний аграрно-економічний університет, к. ф.-м н., доцент,
Україна

³Дніпровський державний аграрно-економічний університет, Україна

⁴Український державний університет науки та технологій, Україна

Анотація. Температурні напруження у шлакових чашах потребують дослідження для оптимізації процесів у металургійній промисловості, зокрема для зниження витрат металу та підвищення ефективності виробництва. Шлакові чаші, які використовуються для транспортування та зберігання розплавленого металу, піддаються значним термічним навантаженням, що може призвести до виникнення тріщин і дефектів у матеріалі, скорочуючи їх термін служби та збільшуючи витрати на ремонт. Основною причиною руйнувань є температурні напруження, викликані перепадами температур між різними частинами чаші під час експлуатації. Математичні моделі, що описують ці напруження, враховують механічні властивості матеріалу, які змінюються з температурою. Використання чисельних методів моделювання дозволяє точніше прогнозувати поведінку матеріалів, що допомагає знижувати витрати на експлуатацію шлакових чаш. Розробка таких моделей має важливе значення для підвищення ефективності експлуатації шлаковозів. У результаті проведених досліджень було виявлено температурні та температурно-напружені поля, а також визначено механізм утворення мікротріщин у стінках чаш через вплив гарячого шлаку. Використання матеріалів, таких як сталь 30 ХМЛ, може значно покращити експлуатаційні характеристики чаш.

Ключові слова: шлакова чаша, шлак доменного виробництва, температурні напруження, температурне поле чаші.

Основною причиною руйнувань шлакових чаш, які використовуються для транспортування та зберігання розплавленого металу, є виникнення температурних напружень, що можуть бути спричинені різким перепадом температур між різними частинами чаші під час експлуатації. Наприклад, при наливанні гарячого шлаку чи металу в чашу може виникнути різниця

температур між внутрішньою та зовнішньою поверхнею чаші, що викликає термічні деформації і сприяє розвитку тріщин.

Математичні моделі, що використовуються для опису температурних напружень, враховують механічні властивості матеріалу чаші, які можуть змінюватися залежно від температури. Розв'язок таких задач зазвичай передбачає розгляд пружної та пластичної зон, де в кожній зоні матеріал реагує на навантаження по-різному. У пружній зоні матеріал зберігає свою здатність до відновлення після деформації, тоді як у пластичній зоні деформація стає незворотною.

Однак для повноцінного моделювання температурних напружень в шлакових чашах існує кілька невизначених аспектів. Одним із них є відсутність достатньої кількості даних про розподіл температурних напружень у різних частинах чаші. Немає точної інформації про температурні умови при транспортуванні та зберіганні шлаку, а також про механізм зміни фізико-механічних властивостей матеріалу чаші при досягненні температур, при яких метал втрачає свою пружність. При високих температурах матеріал чаші може почати вести себе нелінійно, що ускладнює прогнозування точного моменту руйнування або зношування.

Одним з основних напрямів досліджень є розробка нових матеріалів для виготовлення шлакових чаш, які можуть витримувати більш високі температури та мають кращі механічні властивості при зміні температури. У цьому контексті вивчення термічних напружень допоможе оптимізувати конструкцію чаш, зменшуючи ймовірність утворення тріщин та дефектів, а також дозволить значно продовжити їх термін служби.

Застосування сучасних методів моделювання, таких як чисельні методи (наприклад, метод скінченних елементів), дає змогу більш точно прогнозувати поведінку матеріалів під термічним навантаженням, що, в свою чергу, дозволить інженерам і технологам удосконалювати конструкції шлакових чаш та знижувати витрати на їх експлуатацію.

Вивчення явищ, пов'язаних із температурними напруженнями в шлакових чашах, також має важливе значення для розробки нових методів збереження

енергії, адже правильно оптимізовані процеси виробництва можуть значно знизити енергоспоживання та зменшити витрати на обігрівання і транспортування шлаку. Це також впливає на загальну екологічну ефективність металургійних процесів, оскільки зменшення енергоспоживання дозволяє зменшити викиди шкідливих речовин в атмосферу.

В даній роботі був проведений аналіз напружено-деформованого стану чаші без урахування та з врахуванням впливу температури та знайдені напруження в опорних цапфах чаші. Визначені температурні поля, що діють на чашу при заповненні її рідким шлаком; визначені температурні напруження і відповідні деформації, що виникають в чаші. Дослідження проводились на чашах різних конструкцій, різних об'ємів та різного типу базування. Рідкий шлак, знаходячись у чаші, призводить до виникнення мікротріщин у стінках з подальшим руйнуванням.

Було проведено комп'ютерне моделювання для вивчення впливу гарячого шлаку на температуру чаші, що використовується для його транспортування. Моделювання показало, що температура всередині чаші може досягати 720 °С, тоді як стінки чаші нагріваються до 200–400 °С. В місцях з'єднання чаші з опорними цапфами температура становить 250–300 °С. Такий нагрів може спричинити розширення матеріалів, що призведе до утворення зазорів між чашею і цапфами, а це, у свою чергу, може спричинити руйнування конструкції. Отримані результати моделювання збігаються з даними, отриманими в реальних експериментах, де температуру та напруження вимірювали за допомогою тензометрії.

Аналіз напружено-деформованого стану шлакової чаші проводився з використанням двох матеріалів: сталь 25Л, з якої виготовляють шлакові чаші, і сталь 30 ХМЛ – перспективний матеріал для чаш, що має вищі граничні механічні властивості порівняно зі сталлю 25Л.

Висновки: Дослідження температурних напружень у шлакових чашах є важливим кроком у напрямку покращення ефективності металургійного виробництва. Визначення точних умов експлуатації та розробка нових матеріалів, здатних витримувати великі температурні навантаження, дозволять зменшити частоту руйнувань чаш і тим самим знизити витрати металу, що в кінцевому підсумку вплине на підвищення економічної та екологічної ефективності галузі.

ЖИТЕПАТҮПА

1. Neacșu, I.A., Scheichl, B., Rojacz, H., Vorlaufer, G., Varga, M., Schmid, H. and Heiss, J. (2016), Transient Thermal-Stress Analysis of Steel Slag Pots: Impact of the Solidifying-Slag Layer on Heat Transfer and Wear. *steel research int.*, 87: 720-732. <https://doi.org/10.1002/srin.201500203>
2. Rothenbuchner, L., Neudorfer, C., Fallmann, M., Toth, F., Schirrer, A., Hametner, C., Jakubek, S. (2024). Efficient feedforward sloshing suppression strategy for liquid transport. *Journal of Sound and Vibration*, 590, 118542. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2024.118542>

WAYS TO IMPROVE THE EFFICIENCY OF SLAG BOWLS: ANALYSIS OF MATERIALS AND TEMPERATURE REGIME

Viktor Povorotnii, Iryna Shcherbyna, Nina Diachenko, Oleksandr Yaichuk,

Abstract. *Investigating temperature stresses in slag pots is crucial for optimizing metallurgical processes, reducing metal losses, and improving efficiency. Slag pots experience significant thermal loads, leading to cracks, defects, and reduced lifespan. These failures are primarily caused by temperature gradients within the pot, requiring accurate mathematical models that account for temperature-dependent material properties. Numerical modeling enhances the prediction of material behavior, reducing operational costs. Developing such models is essential for efficient slag handling. Research has identified temperature and thermal stress fields, revealing the mechanism of microcrack formation in pot walls due to hot slag exposure. Materials like steel 30KhML can significantly enhance the slag pots' performance and lifespan. Optimizing slag pot design and material selection reduces operating costs and enhances safety.*

Keywords: *slag pot, blast furnace slag, thermal stresses, temperature, thermal resistance*

REFERENCE

1. Neacșu, I.A., Scheichl, B., Rojacz, H., Vorlaufer, G., Varga, M., Schmid, H. and Heiss, J. (2016), Transient Thermal-Stress Analysis of Steel Slag Pots: Impact of the Solidifying-Slag Layer on Heat Transfer and Wear. *steel research int.*, 87: 720-732. [in English]. <https://doi.org/10.1002/srin.201500203>
2. Rothenbuchner, L., Neudorfer, C., Fallmann, M., Toth, F., Schirrer, A., Hametner, C., Jakubek, S. (2024). Efficient feedforward sloshing suppression strategy for liquid transport. *Journal of Sound and Vibration*, 590, 118542. [in English]. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2024.118542>

ПРО ДЕЯКІ НОВІ ПІДХОДИ ДО ВИКОНАННЯ НЕМОДУЛЬНИХ ОПЕРАЦІЙ У СИСТЕМІ ЗАЛИШКОВИХ КЛАСІВ

Поліський Юрій Давидович,

НДІАчормет, канд. техн. наук, ст. науков., співробітник Україна

Анотація. Розвиток сучасних технологій, інформаційних та керуючих систем вимагає створення нових принципів, орієнтованих на представлення чисел у системі залишкових класів. Водночас реалізація нових тенденцій у системі залишкових класів потребує поряд із використанням систем взаємно простих модулів використання систем з усіма парними модулями. Причому система всіх парних модулів будується на основі системи простих модулів — базису — шляхом множення кожного модуля базису на парне число — коефіцієнт переходу. У цій роботі надано короткий огляд нових підходів, отриманих за останні п'ять років, до виконання деяких немодульних операцій. Запропоновані підходи забезпечують отримання ефективних шуканих результатів, їх доцільно розглядати як один із напрямків дослідження шляхів підвищення ефективності обчислень у системі залишкових класів.

Ключові слова: система залишкових класів, модулі, нові підходи, таблиці констант.

Вступ. Дослідження різних підходів до побудови обчислювальних структур для розробки перспективних інформаційних технологій показало, що серед багатьох числових систем найбільш високий ступень паралелізму має система залишкових класів (СЗК).

Фундаментальні дослідження СЗК виконані основоположником цього нового наукового напрямку І.Я.Акушським та його соратниками у 1960-х – 1970-х роках. Результати цих досліджень викладено у класичній роботі [1]. Підсумки подальших досліджень наведені у доповідях учасників Ювілейної Міжнародної науково-технічної конференції «50 років модулярної арифметики» 2005р. За наступні 15 років були отримані нові ефективні результати, деякі з них представлені у [2]. У даній роботі викладені деякі нові підходи до виконання складних операцій у СЗК.

Основний матеріал Дослідження щодо визначення рангу числа наведені у [3]. Підхід базується на введенні інформаційного модуля додатково до системи робочих модулів і використання різниці між реальними та реконструйованими

залишками для цього модуля. Відновлення залишку числа для даного модуля виконується за залишками цього числа для решти модулів системи. Відновлення залишку здійснюється за прискореним варіантом, в якому відповідно до основного алгоритму дії виконуються одночасно над досліджуваним числом і числом, зворотним досліджуваному. У цьому випадку шуканий залишок визначається значенням залишку від числа, для якого першим отримано результат пошуку.

Проблема визначення квадратного кореня числа по модулю досліджена [4]. Заснована на аналізі спеціальних таблиць залишків по модулю для різних значень різниці та рангу числа. Визначення конкретного кореня із цієї кількості здійснюється перевіркою на належність його одному з інтервалів, побудованих, виходячи з рангу числа.

Задача прямого перетворення чисел із позиційної системи числення в СЗК та зворотного перетворення чисел із СЗК у позиційну систему вирішується у [5] та полягає в аналізі спеціальних таблиць залишків за модулями. Пропонується алгоритм, що ґрунтується на використанні поліадичного коду числа, представленого в СЗК. Метод, що лежить в основі реалізації цих складних операцій, полягає в підсумовуванні обраних констант до шуканого значення, при цьому відповідні константи віднімаються від значень залишків до перетворення останнього на нуль.

Метою дослідження [6] є аналітичний розгляд СЗК для реалізації операції перетворення чисел з однієї СЗК в іншу. Метод використовує представлення числа як його залишками, так і в поліадичному коді, та базується на визначенні позиційних характеристик для даного модуля на основі отриманих позиційних характеристик для решти модулів вихідної системи з подальшою побудовою на їх основі залишків для модулів шуканої системи.

Новий підхід до перетворення чисел у системах із різними модулями представлено у [7]. Підхід базується на визначенні позиційних характеристик для певного модуля на основі отриманих позиційних характеристик для решти модулів вихідної системи з подальшою побудовою на їх основі залишків для модулів шуканої системи.

У [8] розглянуті позиційні характеристики при представленні чисел у прямому та зворотному кодах у СЗК при попарно взаємно простих модулях та в системах залишкових класів при всіх парних модулях.

Складна операція визначення належності числа до верхньої або нижньої половини інтервалу чисел в СЗК з усіма парними модулями досліджена у [9]. Парні модулі вибираються на підставі базисної системи попарно взаємно простих модулів. Алгоритм заснований на ітераційній процедурі перевірки кратності числа, що іспитується, деякому коефіцієнту для переходу до базисної системи модулів.

Дослідження операції ділення на два в СЗК з усіма парними модулями виконане у [10]. За запропонованим підходом до розв'язання задачі виконується ділення на два залишків за модулями системи. Складається модульне рівняння, за результатами якого визначаються два значення залишку для кожного модуля, розташованих у різних інтервалах чисел і маючих протилежні парності. Оскільки в парній системі модулів всі залишки або парні, або непарні, формуємо набір з усіх парних залишків і набір з усіх непарних залишків. При діленні на два числа переводяться в нижню половину інтервалу чисел, тому виконуємо порівняння цих наборів на менший з них.

Висновки. У цій роботі виконано короткий огляд деяких нових підходів, які забезпечують ефективне виконання проблемних операцій СЗК.

ЛІТЕРАТУРА

- 1.Акушский И.Я., Юдицкий Д.И . Машинная арифметика в остаточных классах. М.: Советское радио. 1968. 440 с.
- 2.Поліський Ю.Д. Про деякі нові рішення в системі залишкових класів / Ю.Д. Поліський // Проблеми математичного моделювання: матеріали Всеукр. наук.-метод. конф., 26-28 трав. 2021 р. - м.Кам'янське: ДДТУ. - 2021. - С. 67-69.
- 3.Поліський Ю.Д. Про один алгоритмічний підхід до визначення рангу числа в системі залишкових класів / Ю. Д. Поліський // Математичне моделювання.- 2021.- № 1(44). – С.17-22.
- 4.Поліський Ю.Д. Про квадратне коріння в системі залишкових класів / Ю. Д. Поліський // Математичне моделювання.- 2021.- № 2(45). – С.24-28.
- 5.Поліський Ю.Д. Алгоритми прямого перетворення позиційного числа до системи залишкових класів та його зворотного перетворення / «Системні технології» 4 (141) 2022 «System technologies»- С.143-150

6. Поліський Ю.Д. Перетворення у системі залишкових класів числа з однієї системи модулів в іншу // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 3(146). – Дніпро, 2023. – С.109 – 117.
7. Поліський Ю.Д. Про один підхід до перетворення чисел у системах залишкових класів із різними модулями /Ю.Д.Поліський // Международная научная конференция «Информационные технологии в металлургии и машиностроении ITMM'2023 P.161-163.
8. Поліський Ю.Д. Про позиційну характеристику у системі залишкових класів /Ю.Д.Поліський // Ways of Science Development in Modern Crisis Conditions: Proceedings of the 4th International Scientific and Practical Internet Conference, June 8-9, 2023. FOP Marenichenko V.V., Dnipro, Ukraine, P.351-352.
9. Поліський Ю.Д. Дослідження операції визначення належності числа до даної половини інтервалу чисел в системі залишкових класів з усіма парними модулями / Ю.Д. Поліський // Математичне моделювання.- 2023.- № 2(49). – С.9-15.
10. Поліський Ю.Д. Дослідження операції ділення на два в системі залишкових класів з усіма парними модулями // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 6(155). – Дніпро, 2024. – С.218 – 222.

ON SOME NEW APPROACHES TO PERFORMING NON-MODULAR OPERATIONS IN THE RESIDUAL CLASS SYSTEM

Polissky Yury

Abstract. *The development of modern technologies, information and control systems requires the creation of new principles focused on the representation of numbers in the system of residual classes. At the same time, the implementation of new trends in the system of residual classes requires, along with the use of systems of mutually simple modules, the use of systems with all even modules. Moreover, the system of all even modules is built on the basis of a system of simple modules — the basis — by multiplying each module of the basis by an even number — the transition coefficient. This paper provides a brief overview of new approaches obtained over the past five years to the performance of some non-modular operations. The proposed approaches ensure the effective obtaining of the desired results, and it is advisable to consider them as one of the directions of research into ways to increase the efficiency of calculations in the system of residual classes.*

Keywords: *residual class system, modules, new approaches, constant tables.*

REFERENCE

1. Akushskiy I.Ya., Yuditskiy D.I. Mashinnaya arifmetika v ostatochnykh klassakh. M.: Sovetskoye radio. 1968. 440 p.
2. Polissky Yu.D. Pro deyaki novi rishennya u systemi zalyshkovykh klasiv / Yu.D. Polissky // Problemy matematychnoho modelyuvannya: materialy Vseukr. nauk.-metod. konf., 26-28 trav. 2021 nar. - m.Kam'yans'k: DDTU. – 2021. – p. 67-69.

3. Polissky Yu.D. Pro odyn alhorytmichnyy pidkhid do vyznachennya ranhu chysla u systemi zalyshkovykh klasiv / Yu.D. Polissky Matematychni modelyuvannya.- 2021.- № 1(44). - p.17-22.
4. Polissky Yu.D. Pro kvadratne korinnya u systemi zalyshkovykh klasiv / Yu.D. Polissky // Matematychni modelyuvannya.- 2021.- № 2(45). - p.24-28.
5. Polissky Yu.D. Alhorytmy pryamoho peretvorennya pozytsiynoho chysla do systemi zalyshkovykh klasiv ta yoho zvorotnoho peretvorennya / «Systemni tekhnolohiyi» 4 (141) 2022 «System technologies»- p.143-150
6. Polissky Yu.D. Peretvorennya v systemi zalyshkovykh klasiv chysla z odniyeyi systemy moduliv na inshu // Systemni tekhnolohiyi. Rehional'nyy mizhvuzivs'kyi zbirnyk naukovykh prats'. - Vypusk 3 (146). - Dnipro, 2023. - p.109 - 117.
7. Polissky Yu.D. Pro odyn pidkhid do peretvorennya chysel u systemakh zalyshkovykh klasiv iz riznymi modulyamy / Yu.D. Polissky Mizhnarodna naukova konferentsiya «Informatsiyni tekhnolohiyi u metalurhiyi ta mashynobuduvanni ITMM"2023 - p.161-163.
8. Polissky Yu.D. Pro pozytsiynu kharakterystyku v systemi zalyshkovykh klasiv / Yu.D. Polissky // Ways of Science Development in Modern Crisis Conditions: Provedennya 4th International Scientific and Practical Internet Conference, June 8-9, 2023. FOP Marenichenko V.V., Dnipro, Ukraine, p. 351-352.
9. Polissky Yu.D. Doslidzhennya operatsiyi vyznachennya nalezhnosti chysla do tsiyeyi polovyny intervalu chysel u systemi zalyshkovykh klasiv zi vsima parnymi modulyamy / Yu.D. Polissky // Matematychni modelyuvannya.- 2023.- № 2(49). - p.9-15.
10. Polissky Yu.D. Doslidzhennya operatsiyi dilennya na dva u systemi zalyshkovykh klasiv zi vsima parnymi modulyamy // Systemni tekhnolohiyi. Rehional'nyy mizhvuzivs'kyi zbirnyk naukovykh prats'. - Vypusk 6 (155). - Dnipro, 2024. - p.218 - 222.

МОДЕЛІ ТА МЕТОДИ ОБРОБКИ ДАНИХ АГРОІНФОРМАЦІЇ

Полонська А.Є.

Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, асистент, Україна

Анотація. *Наводиться огляд моделей, які використовуються при обробці відеоінформації з невеликих літальних апаратів, пов'язаних з дослідженням стану сільськогосподарських угідь. У якості основних виділені: вегетаційні індекси для прогнозування врожайності, машинне навчання та нейронні мережі для виявлення хвороб та якості схожості посівів, моделі прогнозування врожайності на основі біофізичних, статистичних, поліноміальних та нечітких методів. Біофізичні моделі росту рослин симулюють процеси росту та розвитку культур, статистичні моделі використовують історичні дані про врожайність у поєднанні з різними предикторами, алгоритми машинного навчання застосовуються для виявлення закономірностей та створення прогностичних моделей. Поліноміальні моделі використовуються для побудови прогнозу врожайності, нечіткі когнітивні карти дозволяють враховувати експертні знання та описувати ступінь взаємного впливу факторів.*

Ключові слова: *обробка відеоінформації, машинне навчання, біофізичні моделі, нейронні мережі, нечіткі когнітивні карти.*

Агродрони широко застосовуються для аналізу сільськогосподарських угідь, використовуючи різноманітні математичні моделі та методи обробки даних. Основні підходи включають:

Вегетаційні індекси. Ці індекси, такі як NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), використовуються для оцінки стану рослинності. Наприклад, дослідження, проведене в Київській області, застосовувало мультиспектральний сенсорний комплекс SlantRange для розрахунку індексів Stress та Vegetation Fraction, що дозволило прогнозувати врожайність пшениці озимої з високою точністю.

Машинне навчання та нейронні мережі. Алгоритми машинного навчання використовуються для аналізу зображень, отриманих з дронів, з метою виявлення хвороб, шкідників та оцінки схожості посівів. Широко застосовуються нейронні мережі, зокрема згорткові нейронні мережі (CNN), для аналізу зображень, отриманих з дронів. Вони чудово справляються з розпізнаванням, класифікацією та сегментацією зображень. Завдяки стійкості

до шуму та здатності враховувати просторові взаємозв'язки, ці моделі ідеально підходять для вирішення візуальних завдань. Мають високу ефективність при обробці великих масивів даних, представлених у вигляді сітки та здатні зменшити кількість параметрів і знизити обчислювальні витрати. Наприклад, цифрова платформа Taranis використовує штучний інтелект для автоматичного пошуку захворювань, шкідників, бур'янів та дефіциту елементів живлення на основі фотографій, зроблених дроном. Ще одним з прикладів використання є дослідження, проведене в Національному університеті «Києво-Могилянська академія», що описує розробку моделі нейронної мережі для розпізнавання хвороб рослин за зображенням їхніх листків. Модель демонструє високу точність і швидкість передбачення, що сприяє ефективному моніторингу стану посівів.

Моделі прогнозування врожайності. Існує декілька підходів до прогнозування, які базуються на різних методах та технологіях.

1. Біофізичні моделі росту рослин. Ці моделі симулюють процеси росту та розвитку культур, враховуючи фактори, такі як погодні умови, характеристики ґрунту, агротехнічні заходи та генетичні особливості сортів.

2. Статистичні моделі. Використовують історичні дані про врожайність у поєднанні з різними предикторами, такими як опади, температура, вологість та тип ґрунту. Алгоритми машинного навчання, зокрема лінійна регресія, Random Forest, XGBoost та інші, застосовуються для виявлення закономірностей та створення прогностичних моделей. Налаштування цих моделей відповідно до специфіки культури та регіону сприяє підвищенню точності прогнозів.

3. Поліноміальні моделі використовуються для прогнозування врожайності на основі залежності між врожайністю та різними агрометеорологічними показниками.

4. Нечіткі когнітивні карти (Fuzzy Cognitive Maps) базуються на створенні моделей, які відображають взаємозв'язки між різними факторами, що впливають на врожайність. Нечіткі когнітивні карти дозволяють враховувати

експертні знання та описувати ступінь впливу одних факторів на інші, що є корисним для прогнозування врожайності в умовах невизначеності.

Висновок. Застосування цих моделей та методів дозволяє аграріям отримувати більш точні прогнози врожайності, що сприяє ефективному плануванню та управлінню сільськогосподарським виробництвом.

ЛІТЕРАТУРА

1. Юн Г. М., Мединський Д.В. Застосування безпілотних літальних апаратів у сільському господарстві. Наукоємні технології № 4 (36) – 2017. С. 335–341.

OPTIMIZATION OF SERVER CACHING USING ADAPTIVE TTL BASED ON MACHINE LEARNING

Polonska A.

Abstract. *An overview of models used in processing video information from small aircraft related to the study of the state of agricultural lands is given. The main ones are: vegetation indices for predicting yield, machine learning and neural networks for detecting diseases and the quality of crop germination, yield forecasting models based on biophysical, statistical, polynomial and fuzzy methods. Biophysical plant growth models simulate the processes of growth and development of crops. Statistical models use historical yield data in combination with various predictors, machine learning algorithms are used to identify patterns and create predictive models. Polynomial models are used to build a yield forecast, fuzzy cognitive maps allow taking into account expert knowledge and describe the degree of mutual influence of factors.*

Keywords: *video information processing, machine learning, biophysical models, neural networks, fuzzy cognitive maps.*

REFERENCE

1. Yun H. M., Medynskyi D.V. Zastosuvannia bezpilotnykh litalnykh aparativ u silskomu hospodarstvi. Naukoiemni tekhnolohii № 4 (36) – 2017. S. 335–341. [in Ukrainian].

**ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВЗАЄМОДІЇ СТРИБКА УЩІЛЬНЕННЯ З
НАДЗВУКОВИМ ЛАМІНАРНИМ ПРИМЕЖОВИМ ШАРОМ ЗА НАЯВНІСТЮ
ТЕПЛОМАСООБМІНУ З ПОВЕРХНЕЮ**

Польовий О.Б.¹, Редчиць Д.О.²

¹Інститут транспортних систем і технологій НАН України, канд.физ.-мат.
наук., Україна

²Інститут транспортних систем і технологій НАН України, доктор физ.-
мат.наук., с.н.с., Україна

Анотація. Наведено результати параметричних численних експериментів по впливу тепло- та масообміну на відрив потоку при взаємодії косого стрибка ущільнення з ламінарним примежовим шаром. Реалізовано неявний кінцево-об'ємний алгоритм розв'язку рівнянь Нав'є-Стокса, заснований на схемі Рое, із застосуванням обмежувача потоку Jameson. На основі аналізу просторових розподілів тиску, профілів щільності, динамічного коефіцієнта в'язкості, поздовжніх компонент швидкості і кількості руху в примежових ламінарних шарах виявлено основні чинники, що визначають зміни структури відривного взаємодії в умовах тепло- та масообміну з поверхнею, що обтікається. Показано, що незважаючи на різну фізичну природу впливу, тепло-і масообмін з поверхнею надає подібну результуючу дію на розміри та структуру надзвукової відривної зони. Виявлено, що за допомогою тепло- та масообміну можливо запобігання виникненню відривної зони у двовимірних надзвукових течіях.

Ключові слова. Чисельне моделювання, стрибок ущільнення, ламінарний примежовий шар, тепломасообмін.

Чисельне моделювання впливу тепло- і масообміну на відрив надзвукового ламінарного примежового шару проводилося для умов базових експериментів Hakkinen [1]. Схему течії наведено на рис. 1. Використовувався неявний кінцево-об'ємний алгоритм розв'язку рівнянь Нав'є-Стокса, заснований на схемі Рое, із застосуванням обмежувача потоку Jameson [2].

Відстань L від носика пластини до точки падіння косого стрибка по нев'язкій течії становила 0.0495 м (1.95 дюйма). Число Рейнольдса, визначене на даній відстані, дорівнювало $Re_L=2.96 \cdot 10^5$. Розглядалося значення кута падаючого стрибка $\beta=32.6^\circ$ при числі Маха $M_\infty=2$ незбуреного потоку.

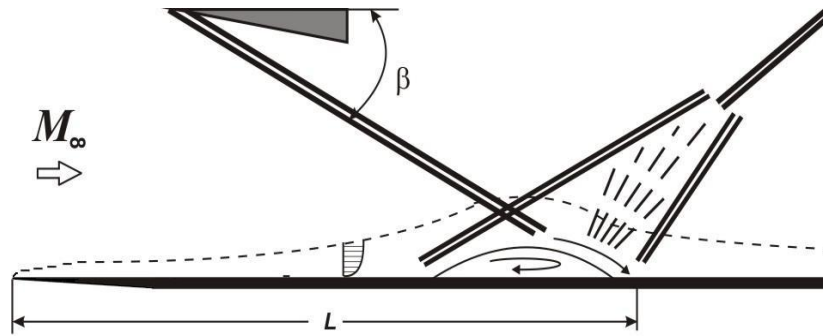


Рисунок 1 – Схема взаємодії косого стрибка ущільнення з ламінарним примежовим шаром на плоскій пластині

Умови теплообміну визначались відношенням T_w / T_r в діапазоні від 0.4 до 1.6. Тут T_w – температура поверхні, $T_r = T_\infty \left(1 + r \frac{(\gamma - 1)}{2} M_\infty^2 \right)$ – температура відновлення з коефіцієнтом відновлення $r=0.851$ для ламінарних течій.

При моделюванні масообміну пориста ділянка знаходилася в інтервалі $0.12 \leq x/L \leq 1.38$. Інтенсивність масообміну через пористу ділянку пластини визначалась безрозмірним параметром $\lambda = (\rho v)_{\text{вд}} / (\rho U)_\infty$.

У зовнішньому надзвуковому потоці від генератора стрибка ущільнення, що є плоскою пластиною з гострою передньою кромкою, виникає ударна хвиля, що поширюється під кутом до незбуреного потоку, що набігає. Інтенсивність падаючого косого стрибка стиску досить велика, щоб викликати відрив ламінарного примежового шару на пластині. Загальний перепад тиску за відбитим стрибком стиску становив $p_2/p_\infty=1.41$. При падінні стрибка стиску на плоску пластину з наростаючим ламінарним примежовим шаром, виникає віяло хвиль стиснення поблизу точки відриву, віяло хвиль розрідження над відривною зоною і подальше віяло хвиль стиснення, що зливається у стрибок приєднання в зоні зовнішньої течії (рис. 2).

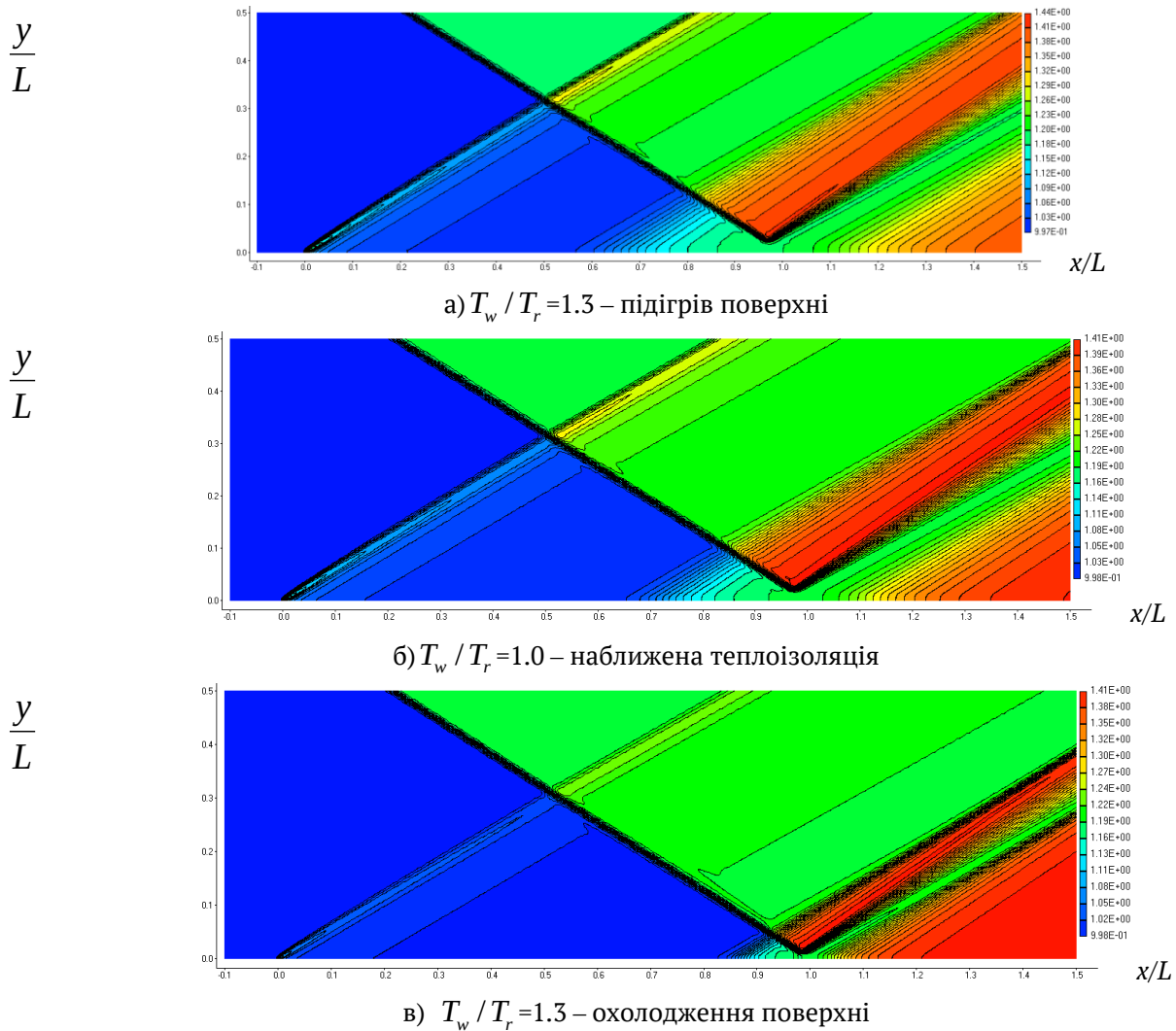


Рисунок 2 – Вплив температури поверхні на структуру взаємодії косого стрибка стиску з ламінарним примежовим шаром

Загальна структура взаємодії, положення точок відриву та приєднання, зона впливу вгору по потоку істотно залежать від теплообміну з поверхнею, що обтікається. Зменшення температури пластини призводить до зменшення області взаємодії, зближення точок відриву та приєднання, меншої передачі збурень вгору за потоком.

Видалення загальмованих частинок примежового шару при масообміні призводить до значного зменшення зони зворотної течії, що досліджується. Стрибки відриву та приєднання зближуються між собою, утворюючи при $\lambda = -0.003$ фактично регулярне відображення падаючого стрибка. При значенні $\lambda = -0.002$ течія стає безвідривною, а «плато» тиску повністю зникає.

Висновки. Проведено параметричні численні експерименти по впливу тепло- та масообміну на відрив потоку при взаємодії косого стрибка

ущільнення з ламінарним примежовим шаром. Виявлено, що за допомогою тепло- та масообміну можливо запобігання виникненню відривної зони у двовимірних надзвукових течіях.

ЛІТЕРАТУРА

1. Hakkinen R.L., Greber I., Trilling L., Arbanel S.S. The interaction of an oblique wave with a laminar boundary layer. – NASA Memo 2-18-59 W. 1959. 49 p.
2. Pylypenko A. O., Polevoy O. B., Prykhodko O. A. Numerical simulation of Mach number and angle of attack influence on regimes of transonic turbulent flows over airfoils. TsAGI Science Journal, – 2012. Vol.43, No.1. P. 1–36.

NUMERICAL SIMULATION OF THE INTERACTION OF A SHOCK WAVE WITH A SUPERSONIC LAMINAR BOUNDARY LAYER IN THE PRESENCE OF HEAT AND MASS EXCHANGE WITH THE SURFACE

Oleg B. Polevoy, Dmytro O. Redchyts

Abstract. *The results of parametric numerical experiments on the influence of heat and mass transfer on flow separation during the interaction of an oblique shock wave with a laminar boundary layer are presented. An implicit finite-volume algorithm for solving the Navier-Stokes equations, based on the Roe scheme, using the Jameson flow limiter, is implemented. Based on the analysis of spatial distributions of pressure, density profiles, dynamic viscosity coefficient, longitudinal components of velocity and momentum in the boundary layers, the main factors determining changes in the structure of the separation interaction are revealed. It is shown that despite the different physical nature of the influence, heat and mass transfer with the surface has a similar resulting effect on the size of the supersonic separation zone. It was found that by means of heat and mass transfer it is possible to prevent the occurrence of a separation zone in two-dimensional supersonic flows.*

Keywords. *Numerical simulation, shock wave, laminar boundary layer, heat and mass transfer.*

REFERENCE

1. Hakkinen R.L., Greber I., Trilling L., Arbanel S.S. The interaction of an oblique wave with a laminar boundary layer. – NASA Memo 2-18-59 W. 1959. 49 p.
2. Pylypenko A. O., Polevoy O. B., Prykhodko O. A. Numerical simulation of Mach number and angle of attack influence on regimes of transonic turbulent flows over airfoils. TsAGI Science Journal, – 2012. Vol.43, No.1. P. 1–36.

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАДІЙНОСТІ ЕРГАТИЧНОЇ СИСТЕМИ ПРИ ТЕХНІЧНОМУ ОБСЛУГОВУВАННІ

В.П.Пошивалов,

*Інститут технічної механіки НАН України и ДКА України доктор технічних наук,
професор, Україна. Член-кореспондент НАН України,*

Анотація. У роботі розглянуті загальні принципи забезпечення надійності ергатичної системи, що складається з оператора, програмного забезпечення та технічної системи при технічному обслуговуванні. Ступінь надійності програмного забезпечення характеризується ймовірністю роботи програмного продукту без відмови протягом певного періоду часу. Методи забезпечення надійності технічної складової розбиваються на два класи: загальнотехнічні та спеціальні. Розглянуті розв'язки задачі для чотирьох випадків, коли елемент технічної складової замінюють при відмові, коли елемент відновлюють при відмові, коли елемент замінюють при відмові або досягненні напрацювання певного значення, коли елемент відновлюють при відмові або досягненні напрацювання. Отримано вираз для напрацювання на відмову при профілактичному обслуговуванні технічної складової залежно від вартості робіт, пов'язаних з розбиранням, пошуком відмови, складанням технічної складової, відновленням елемента при відмові, відновлення елемента при профілактичному обслуговуванні.

Ключові слова: ергатична система, принципи забезпечення надійності, технічне обслуговування

Проблема надійності умовно складається з двох напрямків: розрахунок надійності та її забезпечення. Перший напрямок ґрунтується в основному на застосуванні спеціальних математичних методів, а другий пов'язаний з вирішенням традиційних конструкторських та технологічних задач щодо створення високоякісних систем та правильної їх експлуатації [1]. У процесі становлення науки і практики у сфері надійності складних систем стало зрозуміло, що окремо взятими розрахунковими, конструкторськими чи одними організаційними методами проблему надійності не вирішити. Тому поступово ситуація змінилася на користь розумного поєднання методів розрахунку надійності та організаційно-технічного забезпечення надійності систем за допомогою нормування, конструкторських рішень та експериментального відпрацювання.

Розглянемо загальні принципи забезпечення надійності ергатичної системи (ЕС), що складається з оператора, програмного забезпечення (ПЗ) та технічної системи.

Проблема забезпечення надійності діяльності операторів має досить опрацьовані теоретичні засади та практичні результати. Водночас проблему не можна вважати вирішеною через збільшення складності ЕС, ускладненням комплексів управління, що зумовило зростання інтенсивності праці операторів у різних галузях промисловості. Все це потребує нових підходів щодо забезпечення надійності операторів.

Ступінь надійності ПЗ характеризується ймовірністю роботи програмного продукту без відмови протягом певного періоду часу [2-4].

Проблеми із забезпеченням надійності ПЗ пов'язані з тим, що досі немає загальноприйнятої міри надійності комп'ютерних програм. Однак, судячи з наявних публікацій, питання забезпечення надійності програм вважається важливішим, ніж питання її оцінки. Слід зазначити, що гарантувати повну відсутність помилок ПЗ не можна, але в рамках цього підходу можна досягти прийняттого рівня надійності ПЗ.

Інші три підходи пов'язані з організацією самих продуктів технології – програм. Вони враховують можливість помилки у самих програмах. Самовиявлення помилки у програмі означає, що програма містить засоби виявлення відмови у її виконанні. Самовиправлення помилки у програмі дозволяє не тільки знаходити відмову в процесі її виконання, а й виправляти наслідки цієї відмови, для чого у програмі мають бути відповідні засоби. Забезпечення стійкості програми до помилок залежить від того, що у програмі містяться засоби, які дозволяють локалізувати область впливу відмови програми, чи зменшити його неприємні наслідки, інколи ж запобігти катастрофічних наслідків відмови. Однак ці підходи використовуються дуже рідко, відносно частіше використовується підхід забезпечення стійкості до помилок. Пов'язано це з тим, що багато простих методів, що використовуються в техніці в рамках цих підходів, не застосовуються в програмуванні, наприклад, дублювання окремих блоків і пристроїв (виконання двох копій

однієї програми завжди буде призводити до однакового ефекту - правильного або неправильного). Також необхідно враховувати, що додавання до програми додаткових засобів призводить до її ускладнення, іноді значного, що певною мірою заважає методам попередження помилок.

Задачею забезпечення надійності технічної складової є складання переліку робіт та заходів, що проводяться на всіх стадіях створення та експлуатації. Вона є найбільш розробленою частиною ЕС.

Методи забезпечення надійності технічної складової можна розбити на два класи: загальнотехнічні та спеціальні. Такий поділ досить умовний, як і умовно розбиття всіх методів на групи. Це зроблено з метою кращого оволодіння методами і повнішого їх поетапного використання. Застосування кожного їх окремо у тому чи іншою мірою сприяє підвищенню надійності, але сукупність різних методів забезпечує ефективне підвищення надійності, тобто досягнення необхідного значення при мінімальних витратах.

До загальнотехнічного класу методів віднесено такі, які можуть використовуватися у всіх випадках проектування систем, незалежно від того, сформульовані замовником або не сформульовані вимоги щодо надійності до даної системи. Застосування цих методів не призводить до значного збільшення вартості системи, її габаритів, ваги, споживання нею енергії тощо. Однак можуть при їх застосуванні забезпечити необхідний рівень надійності при невеликих додаткових витратах при проектуванні та виготовленні (монтажі).

До загальнотехнічних методів, передусім, належить група організаційних методів, які реалізуються на початкових етапах розробки та охоплюють питання, які стосуються системи загалом. Усі вони необхідні розробнику системи під час упорядкування чи погодженні технічного завдання (ТЗ), складеного проектувальником – замовником системи. Спеціальні методи застосовуються в тому випадку, якщо використані загальнотехнічні методи не забезпечили пред'явлені вимоги до надійності або ці методи вказані в ТЗ на розробку системи як обов'язкові для застосування. Перелік усіх заходів, що

проводяться на етапі розробки, зазначається у спеціальному документі – програмі забезпечення надійності.

Основним завданням програми забезпечення надійності ЕС є складання переліку робіт та заходів, що проводяться на всіх стадіях створення та експлуатації пристрою з метою досягнення необхідного рівня надійності.

Одним із важливих питань забезпечення надійності на етапі експлуатації технічної складової є технічне обслуговування. Воно дозволяє підвищити перебування системи у працездатному стані і цим вирішити завдання забезпечення заданого рівня надійності функціонування системи.

Одним з параметрів технічного обслуговування є періодичність обслуговування, під яким розуміється інтервал часу або напрацювання між даним видом технічного обслуговування і наступним видом або іншим більшої складності.

Загалом завдання визначення періодичності технічного обслуговування можна сформулювати так: знайти оптимальне значення, виходячи з мінімуму витрат на відновлення або заміну елемента на одиницю напрацювання

$$C_t = M(C / t), \quad (1)$$

де - M - символ математичного очікування;

C - витрати на відновлення або заміну елемента;

t - напрацювання елемента.

При постійному значенні C

$$C_t = C \int_0^{\infty} \frac{g(t)}{t} dt, \quad (2)$$

де $g(t)$ – функція щільності розподілу напрацювання до відмови.

Можна розглядати розв'язання цієї задачі для чотирьох випадків: елемент замінюють при відмові; елемент відновлюють при відмові; елемент замінюють при відмові або досягненні напрацювання певного значення; елемент відновлюють при відмові або досягненні напрацювання $T_{оп}$.

Запишемо вираз (2) для останнього випадку

$$C_t = C_{OBO} \int_0^{T_0} \frac{g(t)}{t} dt + \frac{C_{ОВП}}{T_{ОП}} \int_0^{T_0} 1 - G(T_{ОП}) dt, \quad (3)$$

де $C_{OBO} = C_O + C_{BO}$; $C_{ОВП} = C_O + C_{ВП}$; $C_O, C_{BO}, C_{ВП}$ – відповідно вартості робіт, пов'язаних з розбиранням, пошуком відмови та складанням технічної складової; відновленням елемента при відмові; відновлення елемента при профілактичному обслуговуванні.

Нехай щільність розподілу напрацювання технічної складової має вигляд

$$g(t) = n\alpha \exp(-\alpha t) \int_0^t 1 - \exp(-\alpha \tau) \tau^{n-1} d\tau, \quad (4)$$

де α і n – параметри розподілу.

Тоді при $n = 2$, продиференціюємо вираз (3) і, прирівнявши похідну нулю, знаходимо співвідношення для визначення оптимального значення $T_{ОП}$

$$T_{ОП} = \frac{C_{ОВП} \int_0^{T_{ОП}} 1 - \exp(-\alpha \tau) \tau d\tau}{2\alpha (C_{BO} - C_{ВП}) \int_0^{T_{ОП}} 1 - \exp(-\alpha \tau) \tau d\tau}. \quad (5)$$

При стратегії обслуговування, коли складова частина замінюється при відмові, а при профілактичному обслуговуванні відбувається її відновлення, оптимальне значення визначиться з виразу

$$T_{ОП} = \frac{C_{ОВП} \int_0^{T_{ОП}} 1 - \exp(-\alpha \tau) \tau d\tau}{2\alpha (C_3 - C_{ВП}) \int_0^{T_{ОП}} 1 - \exp(-\alpha \tau) \tau d\tau} \quad (6)$$

Висновки. Наведено загальні принципи забезпечення надійності ергатичних систем при технічному обслуговуванні. Розглянуті розв'язки задачі для чотирьох випадків, коли елемент технічної складової замінюють при відмові, коли елемент відновлюють при відмові, коли елемент замінюють при відмові або досягненні напрацювання певного значення, коли елемент відновлюють при відмові або досягненні напрацювання. Отримано вираз для напрацювання на відмову при профілактичному обслуговуванні технічної складової залежно від вартості робіт, пов'язаних з розбиранням, пошуком відмови, складанням технічної складової; відновленням елемента при відмові, відновлення елемента при профілактичному обслуговуванні.

ЛІТЕРАТУРА

1. Острейковський В. А. Теорія надійності/В. А. Острейковський. - М.: Вища школа, 2003. 463с.
2. Пошивалов В. П. Оцінка працездатності складних ергатичних систем / В. П. Пошивалов, Ю. Ф. Данієв // Вісник Академії митної служби України. – Дніпропетровськ, 2009. – №1(41). – С. 32–37.
3. Пошивалов В. П. Визначення комплексних показників надійності ергатичних систем / В. П. Пошивалов, Ю. Ф. Данієв // Вісник митної служби України. – Дніпропетровськ: – 2010. – №1(43). – С. 111-119.
4. Данієв Ю. Ф. Системний підхід до забезпечення надійності складних систем /Ю.Ф.Данієв, В.П.Пошивалов, Л.В.Резніченко //Системні технології : Регіональний міжвуз. сб. наук. праць. – Дніпро : НМАУ, 2017. – Вип. 2 (109). – С. 27 – 34.

ENSURING THE RELIABILITY OF THE ERGATICAL SYSTEM DURING TECHNICAL MAINTENANCE

Volodymyr Poshyvalov

Abstract. *The paper considers the general principles of ensuring the reliability of an ergatic system consisting of an operator, software and a technical system during maintenance. The degree of software reliability is characterized by the probability of the software product operating without failure for a certain period of time. Methods for ensuring the reliability of a technical component are divided into two classes: general technical and special. Solutions to the problem are considered for four cases: when an element of a technical component is replaced upon failure, when an element is restored upon failure, when an element is replaced upon failure or reaching a certain value of operating time, when an element is restored upon failure or reaching an operating time. An expression for the operating time to failure during preventive maintenance of a technical component is obtained depending on the cost of work related to disassembly, failure search, assembly of a technical component, restoration of an element upon failure, restoration of an element during preventive maintenance.*

Keywords: *energy system, reliability principles, maintenance*

REFERENCE

1. Ostreikovsky V. A. Theory of reliability/V. A. Ostreikovsky. - M.: Higher School, 2003. 463p.
2. Poshyvalov V. P. Assessment of the performance of complex ergatic systems / V. P. Poshyvalov, Yu. F. Daniev // Bulletin of the Academy of the Customs Service of Ukraine. – Dnipropetrovsk, 2009. – No. 1(41). – P. 32–37.
3. Poshyvalov V. P. Determination of complex indicators of reliability of ergatic systems / V. P. Poshyvalov, Yu. F. Daniev // Bulletin of the Customs Service of Ukraine. – Dnipropetrovsk: – 2010. – No. 1(43). – P. 111-119.
4. Daniev Yu. F. System approach to ensuring the reliability of complex systems /Yu.F.Daniev, V.P.Poshyvalov, L.V.Reznichenko //System technologies: Regional interuniversity collection of scientific works – Dnipro: NMAU, 2017. – Issue 2 (109). – P. 27 - 34.

ДЕЯКІ АКТУАЛЬНІ ПИТАННЯ ФОРМАЛІЗАЦІЇ КОГНІТИВНОЇ НАУКИ

Прокопчук Ю.О.

Інститут технічної механіки НАН України, д,т,н, доцент, Україна

Анотація. Відомі закони природи у фізичних науках добре виражені мовою математики. Останнім часом значно пожвавилася дискусія з приводу меж застосування математики для моделювання біологічних систем. Біологічні системи принципово опираються математичній формалізації. Автори роботи *"The Reasonable Ineffectiveness of Mathematics in the Biological Sciences"* (Seymour Garte, Perry Marshall, Stuart Kauffman) вважають, що творчість природи виходить за рамки математичного формалізму і необхідний пошук нових нередуктивних формалізмів. Мова йде навіть про необхідність «Третього великого парадигмального переходу» після Ньютона і квантової механіки. Для рішення проблеми автори пропонують концепцію біоматематики. Ситуація з формалізацією значно ускладнюється для біологічних когнітивних систем високого рівня. Автор дослідження за допомогою власних моделей демонструє границі математичного моделювання агентивної поведінки. Обговорюються деякі базові елементи інтелектуальної математики.

Ключові слова: Біоматематика, Математика автономії, Інтелектуальна математика, Простір можливостей, Живі «розумні» структури, Парадигма граничних узагальнень

Вступ. Відомі закони природи у фізичних науках добре виражені мовою математики, що змусило Нобелівського лауреата Юджина Вігнера в 1960 році задуматися про «необґрунтовану ефективність» математичних концепцій пояснення фізичних явищ [1]. Останнім часом значно пожвавилася дискусія з приводу меж застосування математики для моделювання біологічних систем. Біологічні системи принципово опираються математичній формалізації. Автори роботи [2] вважають, що загальна неефективність математики в біології ("The Reasonable Ineffectiveness") - це запрошення розширити межі науки і побачити, що творчість природи виходить за рамки математичного формалізму. На їхню думку, необхідний пошук нових нередуктивних формалізмів для опису біологічної реальності з використанням або без використання строго математичних підходів. Ця ситуація нагадує фундаментальну кризу математики на початку XX століття [3].

Теореми про неповноту Курта Геделя виявили фундаментальні обмеження у формальних математичних системах, продемонструвавши, що деякі істини залишаються недоведеними (Self-Reference, Incompleteness) [3]. Неповнота - це не помилка, а властивість формальної логіки - неминучий результат дозволу самореферентності всередині структурованої системи. Багато проблем теорії інформації ґрунтуються на рекурсивних, самореферентних структурах, наприклад: межі стиснення (Chaitin's incompleteness in algorithmic information theory); логічні парадокси у самореферентних обчисленнях (Turing's halting problem).

Першою науковою парадигмою була ньютонівська парадигма – механістичний «Всесвіт, як годинниковий механізм». Друга прийшла з квантовою механікою та її імовірнісною природою. Суть третьої парадигмальної революції (Science's Third Great Transition: biomathematics concept [4]) у визнанні принципової неформалізованості біології в математичних термінах [2]: організми безупинно вибирають з безлічі можливостей, виявляючи агентність – творчу непередбачуваність життя – та когнітивні здібності. Біологія не працює у рівновазі, як фізика; вона постійно створює, адаптує та винаходить нові можливості, які не могли б закодувати жодне рівняння. Біоматематика оперує не рівностями, а можливостями, не передбаченнями, а потенціалами.

Когнітивні системи є біологічними системами (поки що). Автори дослідження [5] стверджують, що вся біологія пов'язана з когнітивною обробкою інформації. Ми значно звузимо «діапазон» - будемо мати на увазі лише людиноподібних агентів та і то переважно феноменологічний рівень розгляду (приклад [6]). Однак це ніяк не обмежує застосування світогляду [5].

Багато когнітивних теорій надають обчислювальні описи (приклад – «Обчислювальний Розум»), але прогалини та розриви в нашому розумінні передбачають необхідність постійного обговорення між дослідниками з різних дисциплін. Біоматематика і теорія обчислюваності включають пошук природних прикладів необчислюваних об'єктів, пов'язаних з пізнанням [3].

Джон фон Нейман, який стояв біля основ кібернетики та обчислювальних машин, з 60-х років минулого століття вже передбачав, що «не виключена можливість того, що для розуміння центральної нервової системи логіка змушена буде зазнати метаморфози і перетворитися на неврологію набагато більшою мірою, чим неврологія - у розділ логіки» (Нейман Дж. Теорія самовідтворювальних автоматів, 1971). У 1957 р. Дж. фон Нейман висунув гіпотезу про існування Первинної мови людського мозку (The Primary Language). Він припустив, що зовнішня мова (включаючи безліч природних і штучних мов), яку ми використовуємо у спілкуванні один з одним, може сильно відрізнитися від внутрішньої мови, яка використовується для обчислень людським мозком. Він стверджував, що ми досі не знаємо про природу Первинної мови мисленних обчислень ("What is the structure of thought?" is as central a question as any in cognitive science). Автори [2] вважають, що біоматематика являє собою ту саму первинну, базову, «первісну мову» (біологія не просто підпорядковується математиці; вона створює математику).

Якщо ми не можемо звести біологію до рівнянь, як досягнемо прогресу? Третя парадигма пропонує відповідь [4] і вона не в більшій кількості даних, а в постановці складніших питань та виборі більш елегантних моделей.

Основний матеріал. Прикладом пошуку подібного за цілями концептуально-метафоричного начерку формалізму може бути Парадигма граничних узагальнень (ПГУ) [7]. Всі сутності ПГУ – це «живі розумні структури» (Mathematics Becomes a Living Structure). Загалом, будь який образ або розвинена теорія – це відкрита сукупність начерків – мережа начерків (точних, грубих, емпіричних спостережень, інтерпретацій тощо). Мережі начерків об'єднуються в мережу мереж начерків (Unity through Diversity; A universal knowledge model). ПГУ поєднує в ціле багатоедність, нескінченність, конкурентність, комплементарність (мультифізичність), багатомасштабність, динамічність, самоорганізацію, емоційність, цілеспрямованість. Одні з важливих знахідок – це розширена компліментарність та узагальнена заплутаність мереж начерків, яка забезпечує сильну зв'язність або цілісність ментальної сфери (на базі суб'єктивного досвіду; Meaning as Wholeness

Experienced; Wholeness and the implicate order; Cognitive Consistency). ПГУ пропонує можливі схеми вибору «більш елегантних моделей», зокрема, «критичних начерків».

Відомий вислів: «Все геніальне – просто. Але зробити просто – дуже складно» Найпотужніші наукові інструменти – це не великі набори даних, а геніальні евристики, які вимагають, щоб ми мудро вибирали дуже маленькі набори даних та добре поставлені питання для вирішення конкретних проблем [2], [4]. Саме так виникають евристики у задачах розрізнення ПГУ (завдяки інкубації) [7].

За словами Ейнштейна: «Теорія має бути простою настільки, наскільки це можливо, але не простіше». Критичність виступає як один із фундаментальних природних механізмів універсального творчого процесу – прагнення до краси, досконалості (ПГУ концепти «критичних начерків», «стріл пізнання», «цілісності»). Критерій краси: Модель краще, якщо вона може пояснити більше з меншими витратами (Chaitin's 'compression is comprehension'). В ПГУ за це «відповідають» критичні начерки в мережах начерків образів (Optimal complexity: the "edge of chaos").

Еволюція сильно обмежує область потенційних принципів проектування. Під «тиском складності» передовий ШІ дозволяє подолати фундаментальні обмеження "логіки живих систем" (Space of Minds; "Going Beyond").

Ось лише деякі проблеми необчислюваності / невиводимості / невизначеності в когнітивних системах (з точки зору формалізму ПГУ): в загальному випадку, невизначені і необчислювані начерки чогось; неможливо побудувати (обчислити) повну мережу нарисів образу; необчислювані «когнітивні числа» і багатомасштабні фазові простори когнітивних динамічних систем, що розширюються; у загальному випадку, неможливо обчислити критичні нариси (вимагає визначення алгоритмічної складності); необчислювані та невизначені повні простори можливостей у патернах/мислedah, зокрема, у завданнях розрізнення; невичислимі емоції в подіях і, отже, «духовних мережах начерків». Необчислима задача побудови повної мережі мереж начерків (ментальної сфери, суб'єктивної дійсності).

Необчислима задача виміру/декогеренції квантово-подібних станів мережі мереж начерків (проблема усвідомлення). Однак саме ці проблеми дозволяють сформулювати дуже глибокі інтуїції стосовно Розуму, свідомості, обдарованості тощо.

Відкритий простір можливостей Pos-Space у кожного патерна та кожній задачі розрізнення та оператор Creative Max. "Можливі варіанти використання X для досягнення Y" - це "можливості". Кількість варіантів використання X невизначена (або невідома), різні варіанти використання не впорядковані, не перераховуються та не виводяться один з одного. Агент / організм діє у своєму світі і знаходить можливості використання X для досягнення Y. Можливості, що надаються можливостями, потім актуалізуються як нові адаптації. Ключову роль в розширенні просторів можливостей грає суб'єктивний досвід агента/соціуму [7]. Проблема полягає в тому, що повністю формалізувати дію агентивного оператора Creative Max неможливо (Limits of Mathematical Modeling of Affordances).

На думку фон Фёрстера, наша автономія передбачає, що справжня свобода приймати рішення проявляється тоді, коли питання є «не вирішуваним». Імператив фон Фёрстера: «Дій так, щоб множити кількість можливостей для вибору!» Агентивна поведінка включає безперервний творчий акт створення потенціалів / можливостей у рамках будь-якого патерну f (Ineffable Creativity of Life: Spontaneous innovation; the dynamics of the system "brain-body-landscape of affordances"):

$$\forall t, f \text{ } | \text{Pos-Space}|_t \rightarrow \text{Creative Max.}$$

Під час реалізації патернів і розв'язання задач розрізнення агенти проявляють активність, роблячи вибір із невизначеного набору можливостей. Цей вибір не може бути зведений до алгоритмів. Когнітивна система, що еволюціонує, витягує нові прояви з невизначеності. Взаємодіючі моделі готовності до дії в різних просторово-часових масштабах сприяють вибірковій відкритості організму відповідним можливостям.

Для всіх компонентів досвіду та для 'Space of Thought Flows' (досвід рішення задач розрізнення), зокрема, ключовим з точки зору розвитку інтелекту, інтуїції є механізм виявлення шаблонів або дистиляції (General

Theory of Intelligence: The principle of exaptation). Цей процес відбувається шарами зростаючої складності шляхом виділення шаблонів разом з механізмами виконання (Pattern Discovery or ‘Distillation’ Mechanism: distilling patterns-of-patterns and then patterns of those patterns; Layering of Pattern Matching; radical expansion of the transfer of the scheme to new situations). Механізм вилучення та нашарування шаблонів є одним із стовпів розвитку розуму.

Схема розрізнення «континуум задач» з когнітивною пенетрацією [7] реалізує динамічний конкурентний механізм миттєвого ухвалення рішень, завдання якого - забезпечити виживання в агресивному та невизначеному середовищі (Dynamic Competition Mechanism of Instant Decision; Instant Decision Based on Speed Competition). Саме використання втілених евристик «тонкого зрізу» (автоматизмів-радикалів) суттєво впливає на швидкість ухвалення рішення та економність самого процесу прийняття рішення. Такі рішення актуальні, наприклад, у медицині та на транспорті з підтримкою ШІ.

Висновки. Фрактальна, багатомасштабна природа фізіологічних сигналів робить традиційну оптимізацію математично безглуздою - немає чітко визначених мінімумів чи максимумів у фрактальних ландшафтах (приклад – рішення задач розрізнення; мережі потоків думок) [7]. Формалізм потрібен, щоб виявити загальні принципи розвитку розумової діяльності, які потрібні для освіти та формування успішних команд. ПГУ може слугувати прикладом системно-цілісного формалізму.

В прикладних застосуваннях ПГУ може служити основою деяких начерків математики автономії [8], інтелектуальної математики [9], або математики распливчатості.

ЛІТЕРАТУРА / REFERENCE

1. Wigner, E. (1960). The unreasonable effectiveness of mathematics in the natural sciences. Commun. Pure Appl. Math. 13, 1–14.
2. Garte, S., Marshall, P., Kauffman, S. (2025). The Reasonable Ineffectiveness of Mathematics in the Biological Sciences. Entropy. 27. 280. 10.3390/e27030280.
3. Robic, B. (2020). The Foundations of Computability Theory, Second Edition. Berlin: Springer.

4. Kauffman, S.A., Roli, A. (2023). A third transition in science? Interface Focus, 13, 20220063.
5. Miller WB, Jr., Baluska F, Reber AS. (2023). A revised central dogma for the 21st century: all biology is cognitive information processing. Prog Biophys Mol Biol.182:34-48
6. Prentner, R. (2025). Mathematized phenomenology and the science of consciousness. Phenom Cogn Sci <https://doi.org/10.1007/s11097-025-10060-z>
7. Prokopchuk Y. (2022). Intuition: The Experience of Formal Research. Dnepr, Ukraine : PSACEA Press. 724 p. (in RU)
8. Ivancevic V.G., Reid D.J., Pilling M.J. (2017). Mathematics of autonomy: Mathematical methods for cyber-physical-cognitive systems. World Scientific Publishing.
9. Prokopchuk Y., Nosov P., Ben A. (2024). Problems of Meaning, Understanding, Computability and Adaptability in Artificial Cognitive Systems. Proceedings of the 16th Conference «Modern Information and Innovative Technologies in Transport» (May 29-30, 2024, Odesa). Odesa, Ukraine: Kherson State Maritime Academy. P. 19 – 25.

SOME TOPICAL ISSUES OF OF FORMALIZATION OF COGNITIVE SCIENCE

Prokopchuk Yurii

Abstract. *The known laws of nature in the physical sciences are well expressed in the language of mathematics. Recently, the discussion on the limits of application of mathematics for modeling biological systems has been considerably revived. Biological systems principally resist mathematical formalization. The authors of the work "The Reasonable Ineffectiveness of Mathematics in the Biological Sciences" (Seymour Garte, Perry Marshall, Stuart Kauffman) believe that the creativity of nature goes beyond the framework of mathematical formalism and that a search for new non-reductive formalisms is necessary. Scientists even talk about the need for a "third great paradigmatic transition" after Newton and quantum mechanics. To solve the problem, the authors propose the concept of biomathematics. The problem of formalization is significantly more complicated for high-level biological cognitive systems. The author of the study, using his own models, demonstrates the limits of agentive behavior modeling. Some basic elements of intelligent mathematics are discussed.*

Keywords: *Biomathematics, Mathematics of Autonomy, Intelligent Mathematics, Possibility Spaces, Living Smart/Cog-Structure, Paradigm of Limiting Generalizations*

ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЛАМІНАРНО-ТУРБУЛЕНТНОГО ПЕРЕХОДУ В ЗАДАЧАХ ЗОВНІШНЬОЇ АЕРОДИНАМІКИ

Редчиць Д.О.¹, Зінченко А.В.², Моїсеєнко С.В.³, Акіменко О.В.⁴

¹Інститут транспортних систем і технологій НАН України, д.ф.-м.н., ст. наук.
співр. Україна. Дніпровський державний технічний університет, Україна

²Інститут транспортних систем і технологій НАН України, к.ф.-м.н., Україна

³Херсонський національний технічний університет, ³к.т.н., доцент, Україна

⁴Інститут транспортних систем і технологій НАН України, Україна

Анотація. Проведено порівняння результатів розрахунків обтікання плоскої пластини, кругового циліндра та аеродинамічного профілю на основі чисельного розв'язку нестационарних рівнянь Нав'є-Стокса нестисливої рідини з використанням різних моделей турбулентності (SA, SARC і SALSA) і γ - Re_θ моделі ламінарно-турбулентного переходу. Система вихідних рівнянь, записувалася щодо довільної криволінійної системи координат. Узгодження полів тиску і швидкості здійснювалося за допомогою методу штучної стисливості, модифікованого для розрахунку нестационарних задач. Інтегрування системи вихідних рівнянь проводилося чисельно з використанням методу контрольованого об'єму. Для конвективних потоків використовувалася протипотокова апроксимація Rogers-Kwak, заснована на схемі Рунге третього порядку точності. У моделях турбулентності для апроксимації конвективних складових застосовувалася схема TVD з обмежувачем потоків ISNAB третього порядку. Показано, що застосування диференціальної γ - Re_θ моделі ламінарно-турбулентного переходу якісно і кількісно покращує результати чисельного моделювання.

Ключові слова: чисельне моделювання, рівняння Нав'є-Стокса, моделі турбулентності, моделі ламінарно-турбулентного переходу

На сьогоднішній день однією з проблем обчислювальної аеродинаміки є моделювання турбулентності та врахування ламінарно-турбулентного переходу. Ламінарно-турбулентний перехід має велике значення в різних галузях промисловості при розробці сучасних літаків, вертольотів, безпілотників, роторів вітроенергетичних установок, кораблів, підводних човнів, реактивних двигунів та інших пристроїв.

У роботі для моделювання руху суцільного в'язкого середовища використовувалися нестационарні осереднені за Рейнольдсом рівняння Нав'є-Стокса нестисливої рідини разом з диференціальними моделями

турбулентності Spalart-Allmaras (SA) [1] та її модифікаціями SARC [2], SALSA [3]. Моделювання ламінарно-турбулентного переходу описувалось за допомогою диференціальної γ - Re_θ моделі [4].

Розглянуто обтікання плоскої пластини, кругового циліндра та аеродинамічного профілю, які дозволяють дослідити та верифікувати моделі турбулентності щодо їх можливостей відтворювати властивості переходу ламінарної течії у турбулентну для найрозповсюдженіших типових геометричних конфігурацій обтічних поверхонь.

Дослідження ламінарно-турбулентного переходу на плоскій пластині при різних параметрах потоку, що набігає, проведено фірмою Rolls-Royce і відомі за назвою T3 серія експериментів. У роботі розглядаються три режими обтікання плоскої пластини T3A-, T3A, T3B при різному рівні інтенсивності турбулентності в потоці, що набігає. Представлено розподіли коефіцієнтів тертя по поверхні плоскої пластини для різних режимів обтікання (рис. 1), які отримано за допомогою моделей турбулентності SA і SALSA і порівнюються з експериментальними даними та результатами чисельного моделювання з використанням моделі турбулентності SST Menter.

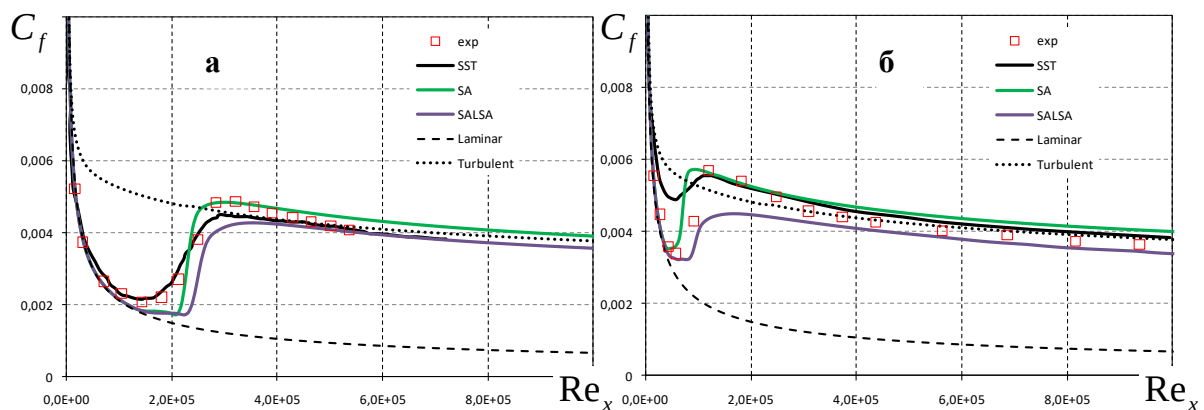


Рисунок 1 – Розподіл коефіцієнтів тертя по поверхні пластини для режиму обтікання T3A (а) та T3B (б): exp [Savill (1993)], SST [Langtry (2009)], SA, SALSA, Laminar, Turbulent

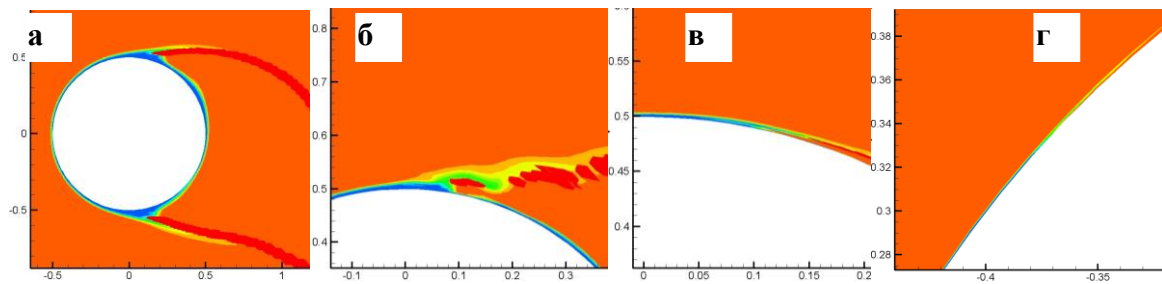


Рисунок 2 – Конттури переміжності при обтіканні циліндра: а – $Re = 10^4$, б – $Re = 10^5$,
в – $Re = 10^6$, г – $Re = 10^7$

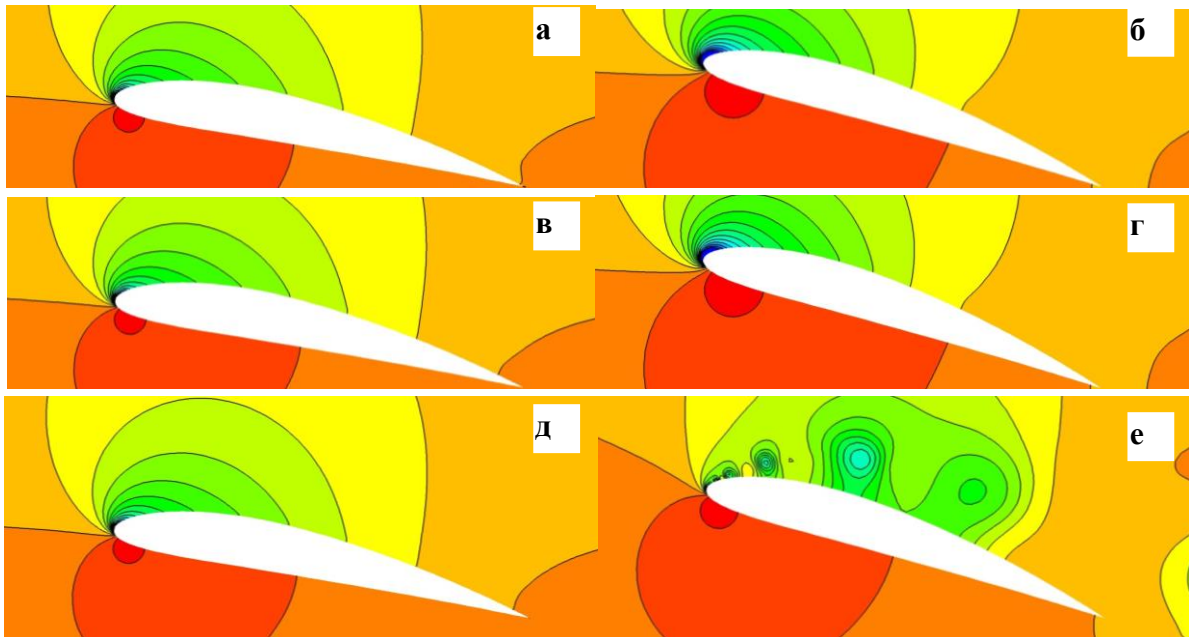


Рисунок 3 – Ізобари при обтіканні профілю NACA 4412 для кута атаки 12° (а, в, д) та 18° (б, г, е): а, б – SA; в, г – SA+ $\gamma-Re_\theta$; д, е – SARC+ $\gamma-Re_\theta$

Проведено порівняння результатів розрахунків обтікання циліндра з використанням моделі $\gamma-Re_\theta$ ламінарно-турбулентного переходу і без неї. На рис. 2 представлено зміну зони переміжності та характеру ламінарно-турбулентного переходу від числа Рейнольдса. Зі збільшенням числа Рейнольдса зона ламінарно-турбулентного переходу зміщується вгору по потоку та змінюється характер переходу від відривного до природнього. Показано, що при низьких числах Рейнольдса, коли обтікання циліндра носить ламінарний характер, а слід турбулентний, використання моделі турбулентності SA і SARC призводить до розвитку турбулентного примежового шару на циліндрі і, як наслідок, до зміни розташування точки відриву. Неправильне розташування точки відриву впливає на розподіл тиску в донній частини циліндра і на інтегральні аеродинамічні характеристики.

Ще однієї задачею, на якій проводилося тестування $\gamma-Re_\theta$ моделі ламінарно-турбулентного переходу спільно з моделями турбулентності SA і SARC, було докритичне та закритичне обтікання аеродинамічного профілю NACA 4412 турбулентним потоком (рис. 3). Встановлено, що застосування моделі переходу дозволяє адекватно відтворити ламінарний відрив поблизу передньої крайки профілю NACA 4412 з подальшим його приєднанням. Показано, що застосування диференціальної $\gamma-Re_\theta$ моделі ламінарно-турбулентного переходу якісно і кількісно покращує результати чисельного моделювання.

Висновки. Перевага використання $\gamma-Re_\theta$ моделі переходу була продемонстрована на задачах про обтікання плоскої пластини, кругового циліндра та аеродинамічного профілю. Показано, що при низьких числах Рейнольдса, коли обтікання циліндра носить ламінарний характер, а турбулентний слід використання моделі турбулентності Spalart-Allmaras призводить до розвитку турбулентного прикордонного шару на циліндрі і, як наслідок, до зміни положення точки відриву. Неправильне положення точки відриву впливає на розподіл тиску в донній частині циліндра та на інтегральні аеродинамічні характеристики. Застосування моделі переходу дозволяє адекватно відтворити ламінарний відрив поблизу передньої кромки профілю з подальшим приєднанням. Застосування однієї моделі Spalart-Allmaras призводить до зайвої генерації турбулентної в'язкості. Отримані результати чисельного моделювання обтікання плоскої пластини, кругового циліндра та аеродинамічного профілю добре узгоджуються з експериментальними даними у широкому діапазоні чисел Рейнольдса.

ЛІТЕРАТУРА

1. Spalart, P. R., Allmaras, S. R. (1992) A one-equation turbulence model for aerodynamic flow. AIAA Paper, 112, 28.
2. Spalart, P. R., Shur, M. (1997) On the sensitization of turbulence models to rotation and curvature. Aerospace science and technology journal, 1, 5, 297–366.
3. Rung, T., Bunge, U., Schatz, M., Thiele, F. (2003) Restatement of the Spalart-Allmaras eddy-viscosity model in strain-adaptive formulation. AIAA Journal, 4, 7, 1396–1399.

4. Langtry, R. B., Menter, F. R. (2009) Correlation-Based Transition Modeling for Unstructured Parallelized Computational Fluid Dynamics Codes. AIAA Journal, 47, 2984–2906.

NUMERICAL SIMULATION OF THE LAMINAR-TURBULENT TRANSITION IN EXTERNAL AERODYNAMICS PROBLEMS

Dmytro Redchyts, Andrii Zinchenko, Svitlana Moiseienko, Oksana Akimenko

Abstract. *The results of calculations of flow around a flat plate, circular cylinder and aerodynamic profile based on the numerical solution of the Navier-Stokes equations using different turbulence models (SA, SARC and SALSA) and the γ - Re_θ model of the laminar-turbulent transition are compared. The system of initial equations was written with respect to an arbitrary curvilinear coordinate system. The coordination of the pressure and velocity fields was carried out using the method of artificial compressibility modified to calculate non-stationary problems. The integration of initial equations system was carried out numerically using the control volume method. For convective flows, a countercurrent Rogers-Kwak approximation was used based on the third-order Roe scheme. In turbulence models, the TVD scheme with third-order ISNAS flow limiter was used to approximate convective terms. It is shown that the use of the differential γ - Re_θ model of the laminar-turbulent transition qualitatively and quantitatively improves the results of numerical modeling.*

Keywords: *numerical simulation, Navier-Stokes equations, turbulence models, laminar-turbulent transition models*

REFERENCES

1. Spalart, P. R., Allmaras, S. R. (1992) A one-equation turbulence model for aerodynamic flow. AIAA Paper, 112, 28.
2. Spalart, P. R., Shur, M. (1997) On the sensitization of turbulence models to rotation and curvature. Aerospace science and technology journal, 1, 5, 297–366.
3. Rung, T., Bunge, U., Schatz, M., Thiele, F. (2003) Restatement of the Spalart-Allmaras eddy-viscosity model in strain-adaptive formulation. AIAA Journal, 4, 7, 1396–1399.
4. Langtry, R. B., Menter, F. R. (2009) Correlation-Based Transition Modeling for Unstructured Parallelized Computational Fluid Dynamics Codes. AIAA Journal, 47, 2984–2906.

ДОСЛІДЖЕННЯ ВАНТАЖОПІДІЙМАЛЬНОЇ СИЛИ МАГНІТНИХ ЛОВИЛЬНИХ ПРИСТРОЇВ

Романишин Т. Л.

*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, к.т.н.,
доцент, Україна*

Анотація. Аварійні ситуації, що виникають під час буріння нафтових і газових свердловин, обумовлюють необхідність застосування магнітних ловильних пристроїв. Одним із недоліків існуючих пристроїв з постійними магнітами є наявність плоскої робочої поверхні магнітної системи, що обмежує ефективність взаємодії з об'єктами складної геометрії та знижує силу притягання. Для підвищення ефективності вилучення із свердловин феромагнітних предметів неправильної форми розроблено нову конструкцію ловильного пристрою з рухомими магнітними системами. Для підтвердження працездатності пристрою виконано теоретичні дослідження із застосуванням методу скінченних елементів. Розрахунки вантажопідіймальної сили при взаємодії магнітних систем із шарошкою бурового долота та самим долотом засвідчили ефективність пристрою при роботі з об'єктами складної форми. Використання розробленого ловильного пристрою дозволить вилучати із свердловини феромагнітні предмети незалежно від їхньої маси та форми.

Ключові слова: ловильний пристрій, магнітна система, постійний магніт, вантажопідіймальна сила, бурове долото.

Вступ. Під час буріння нафтогазових свердловин можуть виникати аварійні ситуації, що призводять до залишення на вибої металевих предметів [1]. Процес спорудження шахтних стовбурів також супроводжується ускладненнями, які суттєво впливають на техніко-економічні показники бурових робіт. Встановлено [2], що найефективнішими засобами для вилучення феромагнітних уламків із свердловин є ловильні пристрої, що використовують постійні магніти. Проте, більшість сучасних магнітних уловлювачів оснащені системами з плоскими робочими поверхнями. Це обмежує площу контакту аварійних уламків із полюсами магнітної системи, що особливо актуально для габаритних предметів складної геометричної форми.

Основний матеріал. З метою підвищення ефективності вилучення із нафтогазових свердловин предметів складної геометричної форми розроблено

конструкцію магнітного ловильного пристрою з рухомими магнітними системами [3]. Пристрій складається з перехідника, корпусу, всередині якого розміщені магнітні системи, та фрезерної коронки. Магнітні системи містять центральний та зовнішній магнітопроводи циліндричної форми, між якими встановлені сегментні радіально намагнічені постійні магніти. Периферійні магнітні системи встановлені впритул по колу, причому їхня полярність змінюється по чергово. Завдяки взаємодії магнітних полів суміжних систем відбувається їх взаємне утримання у будь-якому положенні. Під дією осьового зусилля магнітні системи переміщуються та повторюють форму уловлювального предмета, що сприяє збільшенню площі контакту з об'єктами складної геометрії.

Основним показником призначення магнітних ловильних пристроїв є вантажопідіймальна сила, що характеризує магнітну енергію в робочому зазорі. Для встановлення уловлювальної здатності розробленого пристрою як досліджуваній об'єкт обрано шарошку бурового долота. Даний об'єкт володіє складною геометричною формою та часто залишається на вибої свердловин. Також можливе залишення в свердловині цілого долота внаслідок порушення правил кріплення або спуску. Тому, досліджено взаємодію магнітних систем з цілим тришарошковим долотом діаметром $11\frac{5}{8}$ " (IADC Code 415).

Тривимірні моделі шарошки, долота та магнітної системи створено в середовищі SolidWorks. При цьому враховувалося, що шарошка на вибої може займати будь-яке положення. Відтак змодельовано найімовірніші варіанти розташування систем під час уловлення шарошки та долота (рис. 1). Розрахунок зусилля притягання досліджуваних об'єктів до магнітної системи проведено в програмному комплексі ANSYS Electronics Desktop.

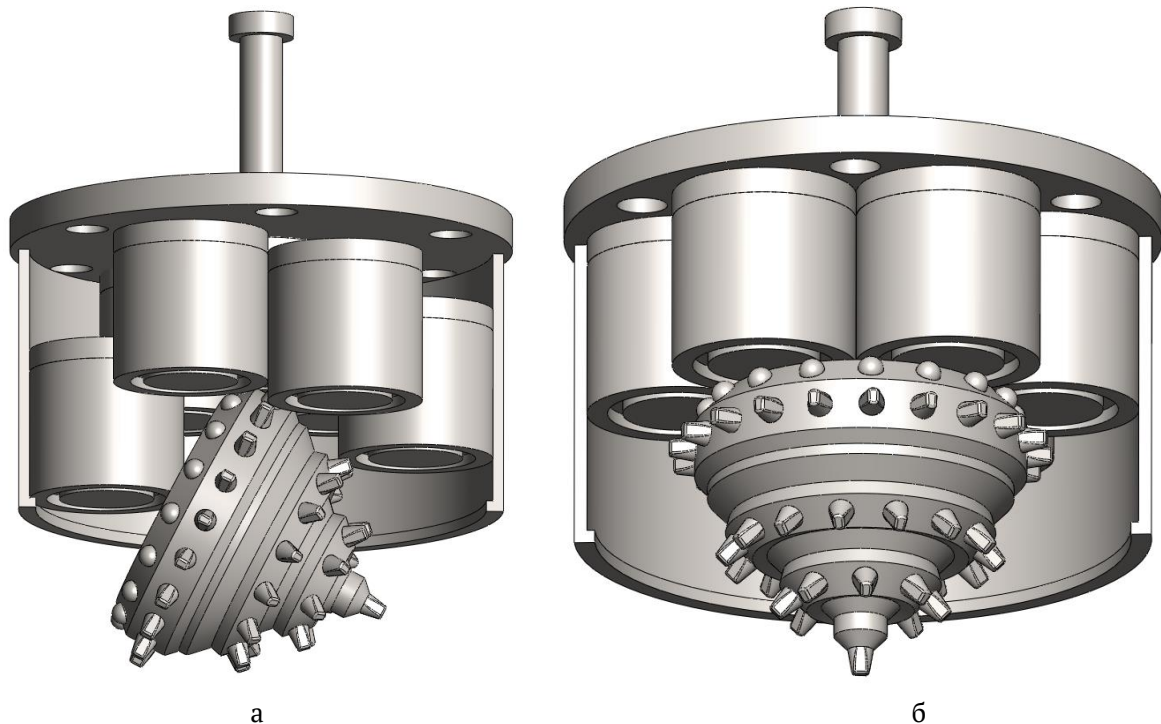


Рисунок 1 – Тривимірні моделі магнітних систем та шарошки долота:
а - контакт систем по конусних поверхнях; б – контакт систем по торцевій поверхні

Теоретичні дослідження дозволили встановити значення вантажопідіймальної сили під час уловлення шарошки в різних положеннях. На рис. 1, а зображено типове розташування залишеної в свердловині шарошки. Одна із магнітних систем перебуває в крайньому нижньому положенні, оскільки не контактує з шарошкою, тоді як інші системи відтворюють форму уловлюваного предмету. У цьому випадку, вантажопідіймальна сила складає лише 528 Н, що пояснюється точковим контактом магнітних систем з шарошкою долота. Якщо уловлення відбувається за торець (рис. 1, б) сила притягання зростає до 2016 Н. Це пояснюється суттєвим збільшенням площі контакту магнітопроводів з торцевою поверхнею шарошки.

У разі притягання до тришарошкового долота вантажопідіймальна сила становить 2759 Н. Варто зазначити, що вага досліджуваного долота рівна 880 Н. В досліджуваній моделі контакт відбувається між робочими полюсами магнітопроводів магнітних систем і торцевою поверхнею ніпельної частини долота. Долото утримується чотирма магнітними системами, три інші системи перебувають в крайньому нижньому положенні, контактуючи з уловлюваним

предметом лише боковими поверхнями. Незважаючи на це, зберігається взаємна фіксація всіх систем між собою, а також їх утримання в робочому положенні.

Висновки. Проведені теоретичні дослідження дозволили визначити основні силові параметри магнітного ловильного пристрою під час взаємодії з предметами складної геометричної форми. Встановлено, що вантажопідіймальна сила перевищує вагу шарошки у 6 та 23 рази, залежно від її положення на вибої свердловини. У разі взаємодії з тришарошковим буровим долотом зусилля притягання більш ніж утричі перевищує його вагу. Отримані результати підтверджують здатність розробленого магнітного пристрою вилучати предмети складної геометричної форми незалежно від їхнього розташування на вибої.

ЛІТЕРАТУРА

1. Specialized Tools for Wellbore Debris Recovery / B. Coll, G. Laws, J. Jenpert, M. Sportelli, C. Svoboda, M. Trimble. *Oilfield Review*. 2012. Vol. 24, Issue 4. P. 4-13.
2. DeGeare J. The Guide to Oilwell Fishing Operations: Tools, Techniques, and Rules of Thumb. Gulf Professional Publishing, second ed. 2014. P. 213.
3. Магнітний ловильний пристрій: пат. 117421 Україна, МПК E21B 31/06 / Т. Л. Романишин, Л. І. Романишин, П. Є. Фещенко. № a201704411; заявл. 03.05.2017; опубл. 25.07.2018, Бюл. № 14. 5 с.

STUDY OF THE HOISTING CAPACITY OF THE MAGNETIC FISHING TOOLS

Taras Romanyshyn

Abstract. *Accidents which happen during the construction of oil and gas wells causes the widespread use of magnetic fishing tools. One of the main drawbacks of existing tools based on permanent magnets is the flat working surface of the magnetic system, which limits effective interaction with objects of complex geometry and reduces the lifting force. To improve the efficiency of extracting ferromagnetic objects with irregular shapes from wells, a new design of a fishing tool with the moving magnetic systems has been proposed. In order to determine the working capacity of the designed tool, theoretical studies were carried out using the finite element method. The calculated hoisting capacity during interaction between the magnetic systems and both the roller cone bit and the drill bit confirmed the effectiveness of the tool in fishing irregularly shaped objects. The application of the developed fishing tool allows to remove the ferromagnetic objects from the well regardless of their weight and shape.*

Keywords: *fishing tool, magnetic system, permanent magnet, hoisting capacity, drill bit.*

REFERENCE

1. Specialized Tools for Wellbore Debris Recovery / B. Coll, G. Laws, J. Jenpert, M. Sportelli, C. Svoboda, M. Trimble. Oilfield Review. 2012. Vol. 24, Issue 4. P. 4-13.
2. DeGeare J. The Guide to Oilwell Fishing Operations: Tools, Techniques, and Rules of Thumb. Gulf Professional Publishing, second ed. 2014. P. 213.
3. Mahnitnyi lovylnyi prystrii: pat. 117421 Ukraina, MPK E21B 31/06 / T. L. Romanyshyn, L. I. Romanyshyn, P. Ye. Feshchenko. № a201704411; zaiavl. 03.05.2017; opubl. 25.07.2018, Biul. № 14. 5 p. [in Ukrainian]

АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ ТА ПАЛИВА ДЛЯ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

Н.П. Сироткіна¹, С.С. Василів², Л.В.Музика³.

¹Інституту технічної механіки НАН України і ДКА України, молодший науковий
співробітник, Україна

²Інституту технічної механіки НАН України і ДКА України, старший науковий
співробітник, к.т.н., Україна

³Інституту технічної механіки НАН України і ДКА України, науковий
співробітник, к.т.н., Україна

Анотація. Актуальність роботи визначається в дослідженні безпілотних літальних апаратів та палива для безпілотних літальних апаратів. Показано, що минуле десятиліття продемонструвало бурхливе зростання авіаційних безпілотних технологій. На сьогоднішній день науково-дослідницькими інститутами і авіабудівними підприємствами провідних країн світу інтенсивно ведуться розробки безпілотних літальних апаратів різного призначення, пошук нових сценаріїв застосування, нових проєктно-конструкторських рішень і методів керування, що забезпечують підвищення ефективності застосування безпілотних літальних апаратів. Мета дослідження – аналіз сучасного стану безпілотних літальних апаратів та палива для безпілотних літальних апаратів. Розглянуто сучасні функціональні методи класифікації, використовувані зарубіжними військовими аналітиками, що ґрунтуються на первинній різниці між бойовими безпілотними літальними апаратами і безпілотними літальними апаратами забезпечення. Показана класифікація безпілотних літальних апаратів за організаційними ознаками та технічними ознаками. Розглянуто розподіл палив на гомогенні і гетерогенні та показано, що класифікацію палив за структурою поділяють на: нітроцелюлозні, сумішеві, модифіковані.

Ключові слова: безпілотні літальні апарати, класифікація, гомогенні палива, гетерогенні палива, сумішеві палива.

Вступ. З початком XX ст. почався стрімкий розвиток ракетної техніки, який дозволив вирішити цілу низку задач освоєння космічного простору. Для військових цілей були створені унікальні міжконтинентальні твердопаливні ракети. Але вартість палива досить суттєво обмежує їх застосування. Минуле десятиліття продемонструвало бурхливе зростання авіаційних безпілотних технологій.

Основний матеріал. Безпілотний літальний апарат (БПЛА) – це літальний апарат багаторазового або умовно-багаторазового використання, який не має на борту людини-пілота і здатний самостійно цілеспрямовано переміщатися у повітрі для виконання різних функцій в автономному режимі за допомогою власної керуючої програми або за допомогою дистанційного керування, яке здійснюється людиною-оператором зі стаціонарного чи мобільного пульта керування.

У кінці 1950-х років створюються безпілотні розвідники, а в 70-х роках починають проводитися науково-дослідні розробки в області бойових БПЛА, а також безпілотних літаків з великою висотою і тривалістю польоту, призначених для тривалого спостереження, збору і передачі розвідувальної інформації супротивника.

Перші цивільні БПЛА з'явилися лише в 2000 році. Однак, темпи роста ринка цивільних БПЛА, комплектуючих і сервісів для них мають дуже високі показники. Ринок послуг і систем для БПЛА великий і перспективний, але через велику різноманітність видів БПЛА створювати універсальні рішення вкрай складно. Тому необхідно класифікувати БПЛА за різними параметрами, які дозволять далі виділяти цільові сегменти ринку для нових перспективних супутніх розробок.

Яким би не був БПЛА за цільовим призначенням, розмірам, аеродинамічній компоновці, його льотно-тактичні характеристики (діапазон висот і швидкостей польоту, дальність і тривалість) багато в чому визначають ефективність силової установки. При проектуванні БПЛА особлива увага приділяється вибору двигуна, і часом відсутність цього компонента з необхідними технічними параметрами ставе під загрозу створення всього безпілотного комплексу [1].

Існують три характерні особливості розвідувальних і ударно-розвідувальних БПЛА, які відрізняють їх від пілотованих літальних апаратів (ЛА) з аналогічним функціональним призначенням [2]: тривалість польоту БПЛА може бути набагато вище, ніж у класичного ЛА, так як відсутнє обмеження тривалості екіпажу; сценарій застосування БПЛА може включати в

себе тривалий період консервування, що обумовлює ряд характерних особливостей, і зниження ресурсу відносно пілотованого ЛА аналогічного призначення; підвищений відбір потужності від силової установки на потреби систем ЛА.

Сучасні функціональні методи класифікації, використовувані зарубіжними військовими аналітиками, ґрунтуються на первинній різниці між бойовими БПЛА (спеціалізовані ударні багаторазового використання, ударні одноразового використання) і БПЛА забезпечення (розвідувальні, транспортні, цільові). Найбільша увага при розробці бойових ударних БПЛА приділяється спеціалізованим ударним апаратам багаторазового застосування, які за своїми тактико-технічними характеристиками наближаються до сучасних тактичних винищувачів [3].

Існує також класифікація БПЛА [3] за організаційними та технічними ознаками.

По класифікації за організаційними ознаками БПЛА розподіляють: за масштабами застосування (стратегічні, оперативні, тактичні), за приналежністю (сухопутні війська, військово-повітряні сили, військово-морські сили, міністерство внутрішніх справ, прикордонні війська), за можливістю повторного застосування (багаторазові, одноразові), за способом управління (управління оператором по каналам управління, управління автоматично, комбінована система управління).

По класифікації за технічними ознаками БПЛА розподіляють: за габаритно-ваговими характеристиками (мініатюрні, надмалі, малі, середні, великі), за аеродинамічною схемою (літакового та гелікоптерного типу), за способом startу (катапультного типу, що запускається з руки, запускаються із злітної смуги), за способом посадки (літаковим способом, що спускаються на парашуті, уловлювані різними пристосуваннями), за часом отримання зібраної інформації (в масштабі реального часу, періодично в ході сеансів зв'язку, після посадки), по вигляду базування пускової установки (наземні, повітряні, морські), по висоті застосування (надмалі висоти, малі, середні висоти,

висотні), по дальності дії (надмалої, малої, середньої, великої дальності), за тривалістю польоту (малої, середньої, великої).

Суттєву роль для БПЛА відіграють палива. Палива поділяють на гомогенні та гетерогенні. В гомогенному паливі молекули в своєму складі мають горючі і окислюючі елементи, а в гетерогенному – це різні речовини, змішані механічно. Частіше класифікацію палив за структурою поділяють на: нітроцелюлозні (одноосновні, двоосновні), сумішеві, модифіковані (нітрозольні).

Основою нітроцелюлозного палива є нітроцелюлоза, в склад палива ще входить пластифікатор-розчинник (нітрогліцерин), на який в сумі припадає понад 90 % вмісту. Решта припадає на добавки – каталізатори тощо.

Сумішеві палива мають в своєму складі окремо неорганічний окислювач у вигляді порошку, зв'язуючого полімерного компоненту (каучук чи ін.) та зазвичай металічну енергетичну добавку.

Модифіковане тверде паливо – це гетерогенна система, яка містить неорганічний окислювач, складне активне пальне-зв'язуюче і металічну енергетичну добавку у вигляді мікродисперсного порошку алюмінію. Це паливо не поступаючись технологічним перевагам сумішевих палив, перевищує їх за енергетичними характеристиками.

Для порівняння ефективності ракетних двигунів використовують різні критерії, але один з головних – питома тяга. Балістичні ракетні палива мають питому тягу від 180 с до 240 с. Сумішеві тверді ракетні палива мають питому тягу від 200 с до 280 с. Таким чином, перевагою сумішевих твердих ракетних палив є більш широкий діапазон і вищий рівень питомої тяги.

Швидкість горіння також є важливим параметром при виборі палива. Вимоги до твердих ракетних палив можна підрозділити на експлуатаційно-технічні, техніко-економічні та екологічні.

Висновки. У роботі було досліджено безпілотні літальні апарати та палива для безпілотних літальних апаратів. Розглянуто сучасні функціональні методи класифікації, використовувані зарубіжними військовими аналітиками, що ґрунтуються на первинній різниці між бойовими безпілотними літальними

апаратами і безпілотними літальними апаратами забезпечення. Показана класифікація безпілотних літальних апаратів за організаційними ознаками та технічними ознаками. Розглянуто розподіл палив на гомогенні і гетерогенні. Показано, що класифікацію палив за структурою поділяють на: нітроцелюлозні (одноосновні, двохосновні), сумішеві, модифіковані (нітрозольні). Наведено переваги сумішевих твердих ракетних палив в порівнянні з баліститними ракетними паливами та вимоги до твердих ракетних палив.

ЛІТЕРАТУРА

1. Точна інформація про ринок і консультації. Precise market intelligence and advisory. <https://www.mordorintelligence.com>.
2. Zhang B, Song Z, Zhao F, Liu C. Overview of Propulsion Systems for Unmanned Aerial Vehicles. *Energies*. 2022; 15(2):455. <https://doi.org/10.3390/en15020455>
3. Valavanis, K.P.; Vachtsevanos, G.J. *Handbook of Unmanned Aerial Vehicles*; Springer: Dordrecht, Netherlands, 2015; Volume 2077

ANALYSIS OF THE CONDITIONAL STANDARD OF UNMANNED FLYING VEHICLES AND FILLING FOR UNMANNED FLYING VEHICLES

Syrotkina Nataliya Petrivna, Vasylyv Stepan Stepanovych,
Muzyka Lev Volodimirovich

Abstract. *The work relevance is indicated in the research of unmanned vehicles and fuel for them. It is shown that the past decade has demonstrated the rapid growth of unmanned aviation technologies. Today, scientific and research institutes and aviation enterprises in the leading regions of the world are intensively developing drones for various purposes. New stagnation scenarios, new design solutions and treatment methods that ensure increased stagnation efficiency of unmanned aerial vehicles are shown. The current functional methods of classification, developed by foreign military analysts, are reviewed, which are based on the primary difference between military unmanned vehicles and unmanned aircraft safety. The classification of drones is shown with organizational and technical marks. The division of fuel into homogeneous and heterogeneous ones is examined and it is shown that the classification of fuel based on structure is divided into nitrocellulose, mixture, modified ones.*

Keywords: *unmanned vehicle, drone, classification, homogeneous burning, heterogeneous burning, mixture fuel.*

REFERENCES

1. Accurate market information and consultations. Precise market intelligence and advisory. <https://www.mordorintelligence.com>.
2. Zhang B, Song Z, Zhao F, Liu C. Overview of Propulsion Systems for Unmanned Aerial Vehicles. *Energies*. 2022; 15(2):455. <https://doi.org/10.3390/en15020455>
3. Valavanis, K.P.; Vachtsevanos, G.J. *Handbook of Unmanned Aerial Vehicles*; Springer: Dordrecht, Netherlands, 2015; Volume 2077

ОПТИМІЗАЦІЯ СЕРВЕРНОГО-КЕШУВАННЯ ЗА ДОПОМОГОЮ АДАПТИВНОГО TTL НА ОСНОВІ МАШИННОГО НАВЧАННЯ

Сімакін С.К.¹, Божуха Л.М.²

¹Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, аспірант, Україна

²Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, кандидат
фізико-математичних наук, доцент, Україна

Анотація. Статичне визначення часу життя (TTL) кешованих даних на сервері часто призводить до неефективного використання ресурсів або подачі застарілої інформації. Запропоновано підхід до оптимізації кешування шляхом динамічного визначення TTL за допомогою машинного навчання. Розглядаються два основні методи: пакетне навчання моделі (наприклад, градієнтний бустинг) на основі історичних даних про частоту змін джерела, патерни доступу та характеристики даних; та онлайн-навчання, зокрема з використанням навчання з підкріпленням (RL), яке дозволяє системі безперервно адаптуватися до поточних умов. RL-агент навчається обирати оптимальний TTL, аналізуючи позитивні (влучання в кеш) та негативні (промахи, застарілі дані) результати своїх дій. Очікується, що адаптивний TTL підвищить cache hit rate, зменшить затримки та навантаження на базу даних, забезпечуючи при цьому вищу актуальність даних.

Ключові слова: кешування, time-to-live (TTL), оптимізація продуктивності, машинне навчання, адаптивне керування, вебдодатки, серверне кешування, навчання з підкріпленням.

Серверне кешування є невід'ємною частиною сучасних вебдодатків, дозволяючи підвищити швидкість відгуку та зменшити навантаження на джерела даних. Ключовим параметром є час життя (TTL) кешованих даних. Традиційний підхід із фіксованим TTL часто є неефективним: занадто короткий TTL – знижує користь від кешу, а занадто довгий – підвищує ризик подачі застарілих даних. Налаштування оптимального статичного TTL є складною задачею.

Для вирішення цієї проблеми пропонується концепція адаптивного TTL, що використовує машинне навчання (ML) для динамічного визначення часу життя кешу. Метою цього дослідження є представлення та аналіз ML-підходів для реалізації адаптивного TTL у системах серверного кешування [1].

Одним з недоліків статичного TTL є фіксований час життя кешу, який погано адаптується до динамічної природи вебданих. Основними проблемами цього підходу є неефективне використання кешу (занизький TTL), ризик подачі неактуальних даних (зависокий TTL), складність ручного налаштування та підтримки оптимальних значень для різних типів контенту.

Для вирішення цієї проблеми можна використовувати адаптивний TTL на основі машинного навчання. Ідея полягає в автоматичному визначенні TTL для кожного елемента кешу за допомогою ML-моделей, що аналізують характеристики даних та патерни їх використання.

Підходи до реалізації. Розглянуто пакетне навчання (Batch Learning), що має такі властивості, як:

- модель (наприклад, градієнтний бустинг) навчається офлайн на історичних даних;
- вхідні дані (ознаки): частота доступу до елемента, частота його змін у джерелі, тип даних, поточне навантаження системи тощо;
- вихідні дані: прогнозоване значення TTL;
- використання моделі: офлайн-прогноз, TTL розраховуються заздалегідь для багатьох ключів і зберігаються. При кешуванні береться готове значення (швидко). Онлайн-прогноз, TTL розраховується моделлю безпосередньо в момент кешування (точніше враховує поточний стан, але додає затримку).

Запропоновано на розгляд, як альтернативу, - онлайн-навчання (Online Learning), зокрема Навчання з Підкріпленням (RL) з наступними властивостями:

- система навчається безперервно, адаптуючись до змін у реальному часі;
- RL-підхід: Агент (система вибору TTL) виконує дію (встановлює певний TTL) в залежності від поточного стану (ознаки кешованого елемента та системи). Потім агент отримує зворотний зв'язок – "винагороду" (позитивну за вдалі дії, як-от cache hit) або "штраф" (негативний за невдалі дії, як-от cache miss або подачу застарілих даних). На основі цього зворотного зв'язку агент коригує свою стратегію вибору TTL, прагнучи максимізувати позитивні результати в довгостроковій перспективі.

Реалізація потребує компонентів для збору даних (логи доступу, зміни джерел), обробки ознак, роботи ML-моделі (як сервісу або вбудованої логіки) та інтеграції з існуючою системою кешування.

Перевагами на цьому етапі адаптивного підходу є потенційне підвищення ефективності кешування (hit rate), краща актуальність даних та автоматизація налаштувань. Але в порівнянні з онлайн-навчанням недоліком є збільшення

складності системи, додаткові витрати ресурсів на ML, необхідність ретельного проектування та налаштування.

Висновки. Адаптивний підхід до визначення TTL у серверному кешуванні на основі машинного навчання є перспективною альтернативою статичним методам. Розглянуті підходи (пакетне та онлайн/RL навчання) дозволяють динамічно керувати часом життя кешу, потенційно покращуючи баланс між продуктивністю та актуальністю даних. Хоча реалізація таких систем є складнішою, очікувані переваги виправдовують подальші дослідження, розробку та експериментальну перевірку ефективності цих методів у реальних умовах експлуатації вебдодатків.

ЛІТЕРАТУРА

1. Мельник А. В. Оптимізація ефективності кешування в інформаційно-орієнтованих мережах за допомогою аналізу трафіку і використання адаптивних алгоритмів. Комп'ютерні системи та мережні технології. – 2023. С. 115–116.

OPTIMIZATION OF SERVER CACHING USING ADAPTIVE TTL BASED ON MACHINE LEARNING

Simakin S., Bozhukha L.

Abstract. *Static definition of time-to-live (TTL) for cached server data often leads to inefficient resource usage or serving stale information. An approach for caching optimization through dynamic TTL determination using machine learning is proposed. Two main methods are considered: batch training of a model (e.g., gradient boosting) based on historical data about source change frequency, access patterns, and data characteristics; and online learning, particularly using reinforcement learning (RL), which allows the system to continuously adapt to current conditions. The RL agent learns to select the optimal TTL by analyzing positive (cache hits) and negative (misses, stale data) outcomes of its actions. Adaptive TTL is expected to increase the cache hit rate, reduce latency and database load, while ensuring higher data freshness.*

Keywords: *caching, time-to-live (TTL), performance optimization, machine learning, adaptive control, web applications, server caching, reinforcement learning.*

REFERENCE

1. Melnyk A. V. Optyimizatsiia efektyvnosti keshuvannia v informatsiino-oriietovanykh merezhakh za dopomohoiu analizu trafiku i vykorystannia adaptivnykh alhorytmiv. Komp'iuterni systemy ta merezhni tekhnolohii. – 2023. P. 115–116. [in Ukrainian].

СТРУКТУРНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ МОДЕЛІ ДВИГУНА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ В ПРОГРАМНОМУ ЗАБЕЗПЕЧЕННІ MATLAB R2024A

Стьопкін В.В.¹, Трунов Д.Є.²

¹ Український державний університет науки і технологій, к. т. н, доцент, Україна

² Український державний університет науки і технологій, Україна

Анотація. Досліджена структура математичної моделі двигуна постійного струму в програмному забезпеченні MATLAB v.R2024a. Особливістю є відсутність заборони наростання швидкості двигуна при значеннях електромагнітного моменту меншого за реактивний момент, що слід враховувати. Дослідження режимів роботи двигуна виконано за механічною характеристикою у динамічному режимі, яка знята за допомогою блоку XY Graph і яка охоплює усі можливі режими роботи крім динамічного гальмування. Також паралельно виконаний аналіз перехідних процесів за осцилограмами струмів, швидкості та моменту. В даній моделі враховано завдання довільної навантажувальної діаграми у часі за допомогою блоку Stair Generator. Розглянута структура моделі двигуна постійного струму може легко інтегруватися з системами керування, поєднуватися з ПІД-регуляторами, алгоритмами керування, використанням ШІМ-модуляції для керування. Для коректного моделювання необхідно мати точні параметри двигуна.

Ключові слова: двигун постійного струму, режими роботи, електромагнітний момент, пусковий струм, датчик струму якоря, кероване джерело напруги, динамічна характеристика

Вступ. В даній роботі виконано структурне дослідження математичної моделі двигуна постійного струму з врахуванням можливостей програмного забезпечення MATLAB R2024a, отримані механічні характеристики в динаміці. Досліджена робота двигуна під навантаження у всіх чотирьох квадрантах динамічної механічної характеристики за допомогою блоку XY Graph MATLAB.

Основний матеріал. Двигун постійного струму DC Machine знаходиться в бібліотеці Simscape у розділі Electrical підрозділі Specialized Power System, підрозділі Electrical Machines. Дана модель двигуна була доступною ще у версіях MATLAB 7 у бібліотеці Sim Power System у розділі Machines. На рисунку 1, а наведене умовне позначення двигуна постійного струму. Введення параметрів двигуна здійснюється через діалогове вікно (графічний інтерфейс), яке наведено на рисунку 1, б.

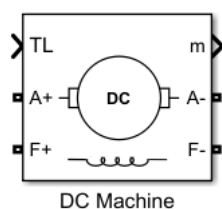
Виводи F+ та F- необхідні для підключення напруги збудження для створення магнітного потоку в двигуні. Виводи A+ та A- використовуються для підключення обмотки якоря на силове джерело живлення. Активне навантаження на двигун вводиться через віртуальний вхід TL. Вихідними параметрами двигуна є: частота обертання ω , струм обмотки якоря I_a , струм збудження I_f та електромагнітний момент T_e . Перелічені вихідні параметри формуються на мультиплексорній шині m. На першому (верхньому) виході m діє частота обертання, на другому – струм обмотки якоря, на третьому – струм збудження і на четвертому – електромагнітний момент двигуна.

При відсутності (рис.1, б) сумарного опору кола якоря двигуна R_a , індуктивності L_a , їх значення можна розрахувати за формулами:

$$R_a = 0,5 \cdot (1 - \eta_n) \cdot (I_n / U_n), \quad (1)$$

$$L_a = (\gamma \cdot U_n) / (p \cdot \omega_n \cdot I_n), \quad (2)$$

тут U_n – номінальна напруга обмотки якоря; I_n – номінальний струм обмотки якоря; ω_n – номінальна частота обертання якоря; p – кількість пар полюсів двигуна; $\gamma = 0,6$ – коефіцієнт для некомпенсованих двигунів.



а)

б)

Рисунок 1 - Умовне позначення двигуна постійного струму (а)
та графічний інтерфейс введення параметрів двигуна (б)

На рис.1, б необхідними для введення є також: R_f – активний опір обмотки збудження двигуна; L_f – індуктивність обмотки збудження двигуна; L_{af} – взаємна індуктивність обмоток збудження і якоря двигуна; J – зведений до валу двигуна момент інерції, який включає момент інерції двигуна та момент інерції виробничого механізму; B_m – коефіцієнт, за допомогою якого вводиться на вал двигуна реактивний момент опору $T_f = B_m \cdot \omega$; T_f – реактивний момент опору.

На рисунку 2 наведена структура моделі двигуна постійного струму. Дана структура включає датчик струму обмотки якоря i_A та датчик струму обмотки збудження i_F . Елементи i_A , i_F , R_a , L_a , FCEM (керування джерело напруги, через яке вводиться в коло якоря проти ЕРС двигуна), R_f , L_f . Інші блоки на рис.3 реалізовані на елементах бібліотеки Simulink.

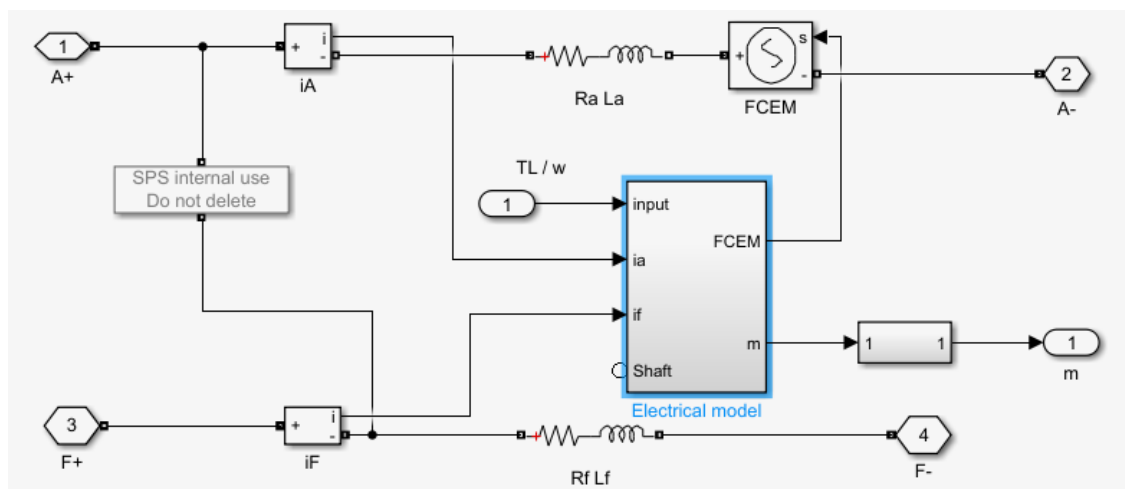


Рисунок.2 - Структура моделі двигуна постійного струму

На рисунку 3 наведена структура блоку механіки Electrical model.



На рисунку 4 наведений блок Coulomb (T_f) & Viscous ($B_m \cdot \omega$) Friction Torques.



406

На рисунку 5 наведена математична модель двигуна постійного струму. Обмеження пускового струму досягається введенням резистора у коло обмотки якоря (блок Series RLC Branch на рис.5). Регульовані джерела живлення обмоток збудження і якоря (Controlled Voltage Source) дозволяють реверсувати або змінювати величину постійної напруги за допомогою блоку Step в будь який момент часу. На виходах демультіплексора m діють сигнали кутової швидкості, струму якоря, струму збудження та електромагнітного моменту. Блок Scope фіксує зміну сигналів на його входах та будує осцилограми. Блок powergui використовується для завдання способу моделювання.

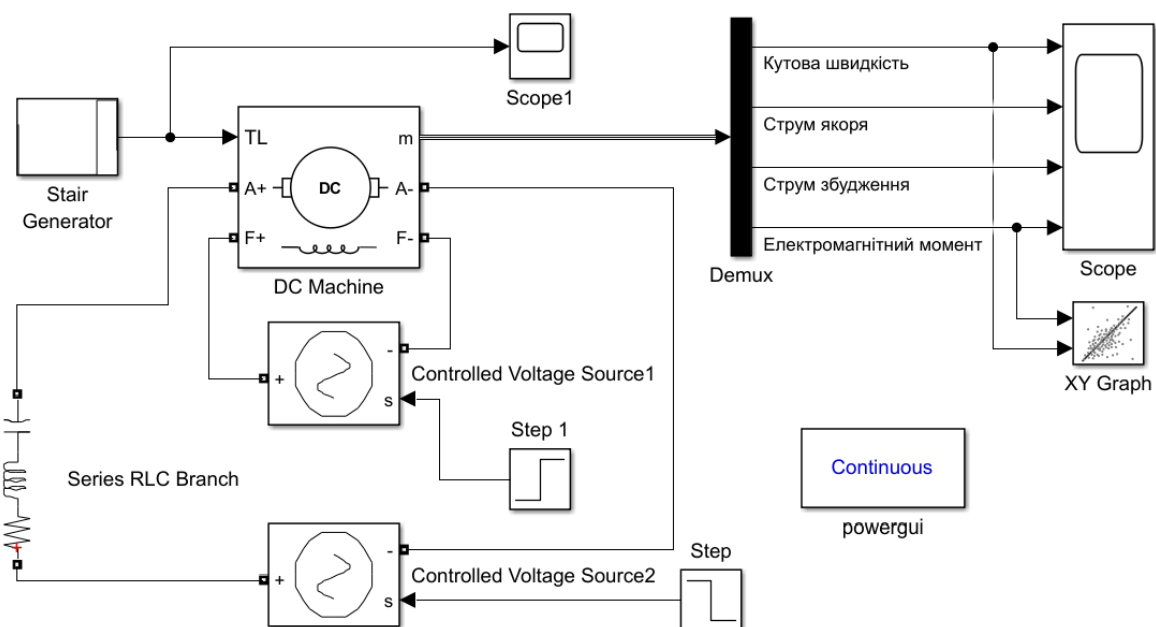


Рисунок 5 - Математична модель двигуна постійного струму

Напруга на обмотці збудження задається 150 В. Напруга на якорі двигуна задається 240 В і через 2 с реверсується (змінює полярність). Навантаження на валу двигуна задається блоком Stair Generator та приймає додатні і від'ємні значення. Навантаження водиться через вхід TL двигуна і це відповідає активному характеру навантаження. Блок XY Graph формує механічну характеристику двигуна за динамічними характеристиками частоти обертання та моменту. Блок Step задає напругу на обмотці якоря двигуна «+240 В» за часом 0-2 с та «-240 В» за часом 2-4 с.

На рисунку 6 наведена осцилограма пуску та реверсу двигуна.

В момент часу 2 с виконаний реверс двигуна, шляхом зміни полярності на обмотці якоря. Струм і момент двигуна змінюють знак на протилежний і збільшуються до значень -50 А та -60 Нм. Розпочинається процес інтенсивного гальмування до нульової швидкості. Після чого двигун розганяється в двигунному режимі до швидкості -200 рад/с при активному навантаженні 5 Нм. Струм двигун досягає -6 А. В момент часу 3 с з'являється навантаження 10 Нм. Струм двигуна падає до нуля і зростає, до позитивного значення 5 А. Це свідчить про те, що момент навантаження, діючий на вал двигуна, має активний характер і переводить двигун в режим генераторного гальмування.

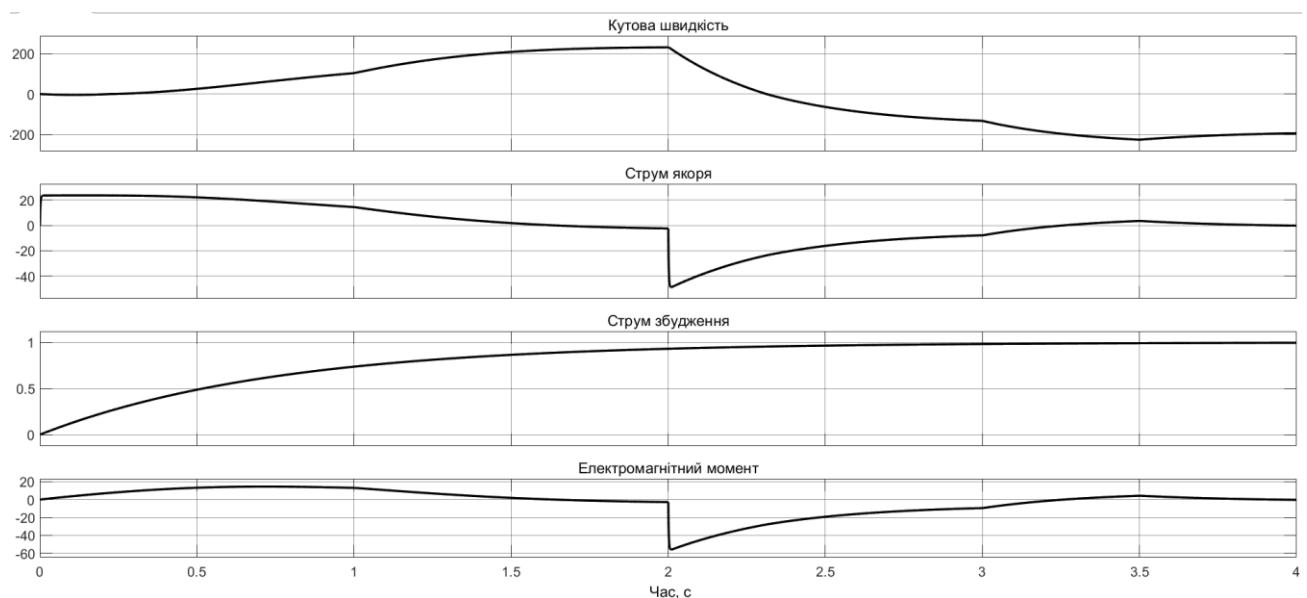


Рисунок 6 - Осцилограма пуску та реверсу двигуна

Механічні характеристик, зняті в динамічному режимі, наведені на рисунку 7. Ділянка 1-2 має нелінійний характер. При формуванні цієї ділянки характеристики нарастали струм збудження та момент двигуна. Лінійна частина механічної характеристики в двигунному режимі наведена на ділянці 2-3. Ділянка 3-4 відповідає переходу двигуна на роботу в режим протиструмного гальмування. Тут швидкість двигуна зменшилась з $230,63$ рад/с до $221,66$ рад/с. Максимальний момент у точці 4 склав $-55,87$ Нм. Двигун увімкнений на напрям обертання «назад», але обертається ще «вперед». Ділянка протиструмного гальмування 4-5 закінчується при нульовій швидкості. Ділянка 5-6 відповідає роботі двигуна «назад». Момент короткого замикання складає $27,72$ Нм, швидкість ідеального холостого ходу $-197,67$ рад/с. Ділянка 6-

7 є відрізком генераторного гальмування, швидкість тут складає $-225,39$ рад/с і є більшою за швидкість холостого ходу $-197,67$ рад/с. Двигун працює у режимі генератора та віддає енергію. Таким чином, отримана на рис.7 характеристика двигуна охоплює усі можливі режими роботи (крім динамічного гальмування).

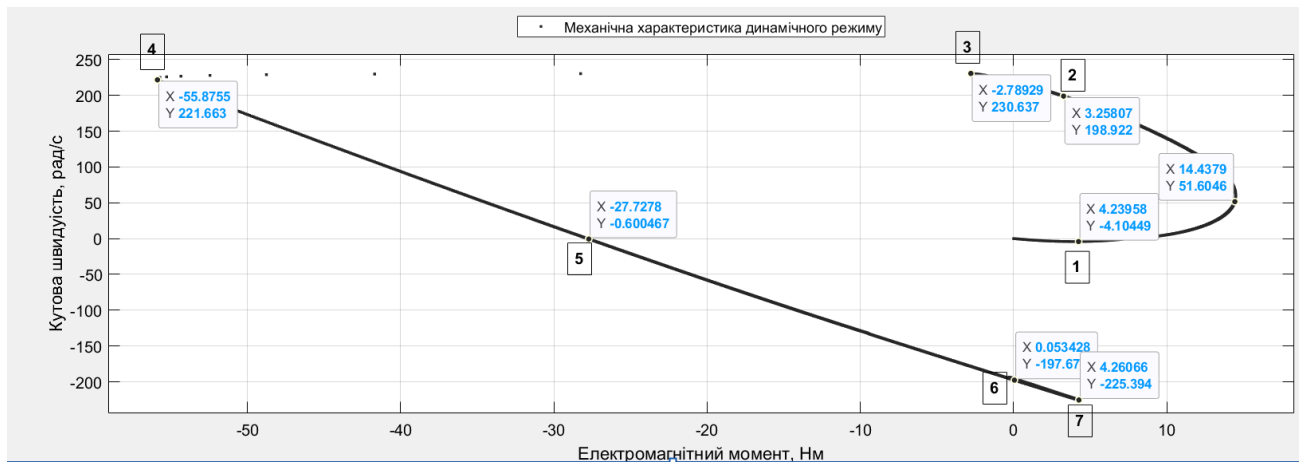


Рисунок 7 - Механічні характеристик, зняті в динамічному режимі

В роботі досліджена структура моделі двигуна постійного струму, виявлений недолік моделювання реактивного моменту.

Висновки. Досліджена математична модель двигуна постійного струму, виявлений типовий недолік, пов'язаний з моделюванням реактивного моменту. Виконано дослідження усіх режимів роботи двигуна за механічними характеристиками, знятими в динамічному режимі. Розглянута математична модель може бути інтегрованою до складних систем керування електроприводами.

ЛІТЕРАТУРА/ REFERENCE

1. Electrical machine fundamentals with numerical simulation using MATLAB/SIMULINK by Iqbal, Atif; Moinoddin, Shaikh; Reddy, Bhimireddy Prathap 2021, 1
2. Implement wound-field or permanent magnet DC machine. URL: https://www.mathworks.com/help/sps/powersys/ref/dcmachine.html?searchHighlight=DC%20Machine&s_tid=srchtitle_support_results_1_DC%20Machine (date of access: 03.04.2025).
3. Variable torque on DC Machine URL: https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/81723-variable-torque-on-dc-machine?s_tid=srchtitle_support_results_3_DC%20Machine (date of access: 03.04.2025).
4. DC Motor Control URL: <https://www.mathworks.com/help/control/ug/dc-motor-control.html> (date of access: 03.04.2025).

Structural study of a DC motor model in MATLAB R2024a software

Stepkin V.V., Trunov D.E.

Abstract. *The structure of the mathematical model of a DC motor in the MATLAB v.R2024a software is studied. A feature is the absence of a ban on increasing the motor speed at values of the electromagnetic torque less than the reactive torque, which should be taken into account. The study of the motor operating modes was performed according to the mechanical characteristic in dynamic mode, which was taken using the XY Graph block and which covers all possible operating modes except dynamic braking. Also, a transient analysis was performed in parallel using the oscillograms of currents, speed and torque. This model takes into account the task of an arbitrary load diagram in time using the Stair Generator block. The considered structure of the DC motor model can be easily integrated with control systems, combined with PID controllers, control algorithms, and using PWM modulation for control. For correct modeling, it is necessary to have accurate motor parameters.*

Keywords: *DC motor, operating modes, electromagnetic torque, starting current, armature current sensor, controlled voltage source, dynamic characteristic*

ОБРОБКА ДАНИХ ТА ГЕНЕРУВАННЯ РЕКОМЕНДАЦІЙ В МАРКЕТИНГОВОМУ ТЕСТУВАННІ

Танасієнко Д.О¹., Андрющенко В.О².

¹Український Державний університет науки і технологій, PhD студент, України

²Український Державний університет науки і технологій, к.т.н., доцент, України

Анотація: У цій науковій статті досліджується структурна модель обчислювальних процесів, які є ключовими для ефективної обробки даних та формування точних рекомендацій у контексті маркетингового тестування. Увага приділяється застосуванню цих процесів в умовах нестабільного хмарного середовища, що додає значної складності до управління та оптимізації. Запропонована модель описує систему як сукупність взаємопов'язаних задач, що виконуються на регулярній періодичній основі, забезпечуючи безперервний цикл аналізу та прогнозування. Центральним аспектом дослідження є розробка інноваційних методів управління цими обчислювальними процесами. Зокрема, стаття зосереджується на критично важливій проблемі мінімізації запізнень щодо встановлених директивних термінів виконання задач. Крім того, значна увага приділяється оптимізації використання доступних обчислювальних ресурсів, що дозволяє підвищити ефективність системи та знизити витрати. У статті також детально аналізуються важливі характеристики задач, такі як їх ідемпотентність, класифікація за пріоритетом виконання та за обсягом споживаних ними обчислювальних ресурсів. Нарешті, стаття пропонує моделювання функціонування системи в умовах нестабільності хмарного середовища.

Ключові слова: граф задач, ідемпотентність, хмарні обчислювальні процеси, моделювання, програмне забезпечення, інформаційні технології.

У сучасних умовах маркетингове тестування часто здійснюється в хмарних обчислювальних середовищах. Це створює виклики для ефективного управління обчислювальними процесами, які повинні виконуватися вчасно та з оптимальним використанням ресурсів. Задачі можуть мати директивні терміни, вимагати різних обчислювальних ресурсів та завершуватися невдачами через зовнішні фактори[1]. Таким чином, постає проблема розробки структурної моделі, яка дозволить ефективно управляти цими процесами, мінімізуючи запізнення та оптимізуючи використання ресурсів.

Метою даного дослідження є розробка структурної моделі обчислювальних процесів для маркетингового тестування в нестабільному хмарному середовищі. Це включає в себе створення методів управління, які дозволять мінімізувати запізнення щодо директивних термінів, прогнозувати необхідну кількість обчислювальних ресурсів та забезпечити ідемпотентність задач.

Є система, яка складеться з множини різнотипних задач з наступними властивостями:

- на множені задач існує відношення часткового порядку;
- кожна задача виконується на періодичній основі (кожен день, певні дні тижня);
- кожен запуск задачі потребує певних обчислювальних ресурсів RAM, CPU;
- є окремий SQL кластер, де виконуються запити над великими даними, всі запити в цьому кластері використовують абстрактний ресурс – SQL Slots;
- кожна задача може завершитися невдачею та її потрібно перезапустити;
- деякі задачі мають директивні терміни.

Позначимо цю множину задач як Ψ . Є глобальна задача керування виконанням множиною задач (порядок виконання, виділення ресурсів) та керування ресурсами RAM, CPU та SQL. В данному дослідженні будемо розглядати тільки структуру множини задач та самі задачі.

У випадку курування задачами маємо три задачі:

1. задача розкладів з директивними термінами. Мета: мінімізувати запізнення щодо директивних термінів;
2. задача прогнозування тривалості кожної задачі. Мета: мінімізувати неточність у прогнозах тривалості;
3. задача прогнозування затрат ресурсів для кожної задачі. Мета: Мінімізувати неточність у прогнозах затрат ресурсів. Опис моделі задач. Будемо називати задачі з множини Ψ як EngineTasks. Тоді маємо такі визначення.

EngineTask – ідемпотентна одиниця роботи у системі Ψ . Тобто завдання, яке при повторному виконанні дає той самий результат, навіть якщо попередній запуск був перерваний на середині виконання

Далі в тексті будемо позначати EngineTask як ET для стислості. ET – програмний код на мові Python, оформлений у вигляді модулів [2] і який запускається через CLI (Command Line Interface) [3].

Класифікація за пріоритетом виконання. За пріоритетом виконання завдання можна розділити на два підмножини:

- primary – основні завдання, час виконання яких безпосередньо пов'язаний з директивними термінами. Тобто або ET має директивний термін завершення, або одне з наступних завдань має директивний термін.

- service – завдання, які не мають директивних термінів.

Класифікація за типом ресурсів, які використовує ET. Є 3 типи обчислювальних ресурсів, які використовує ET:

- CPU (англ. central processing unit) – обчислювальні ядра процесора. Приймає речові значення з кроком 0.5. 1 означає одне логічне ядро центрального процесора. Приймає значення від 0,5 до 220.

- RAM (англ. random-access memory) – оперативна пам'ять, яка доступна процесору. Приймає речові значення з кроком 0.25. 1 означає один гігабайт пам'яті. Набуває значення від 1 до 800.

- SQL Slots – абстрактна одиниця обчислення, яка використовується при запитах у Google BigQuery [4]. Приймає речові значення з кроком 1. Набуває значення від 1.

ET за ресурсами ділиться на дві групи:

- які використовують CPU+RAM. Будемо позначати їх як $(CR)^{ET}$, де CR – аббревіатура перших букв ресурсів, які вони використовують;

- які використовують CPU+RAM+SQL Slots. Будемо позначати їх як $(CRS)^{ET}$, де CRS – аббревіатура перших букв ресурсів, які вони використовують.

Граф задач. Представимо множину завдань як ациклічний граф. Тоді набір завдань, які пов'язані між собою, можна записати як

$$DAG_i = \{V_i, E_i\} \quad (1)$$

де V_i – це одна з задач ET , а E_i – це спрямований зв'язок між двома задачами.

У такому разі всю систему Ψ в момент часу t можна записати як:

$$\Psi_t = \{DAG_i\}, i = 1 \dots n_t \quad (2)$$

де n_t – кількість ациклічних графів в момент часу.

Приклади завдань із прикладами послідовності виконання. Для наочності наведемо приклад реального графу задач на рис.1, рис. 2.

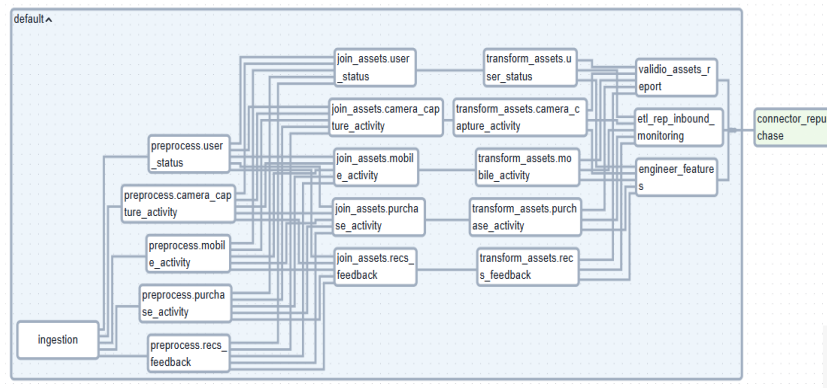


Рисунок 1 – Перша частина графу задач

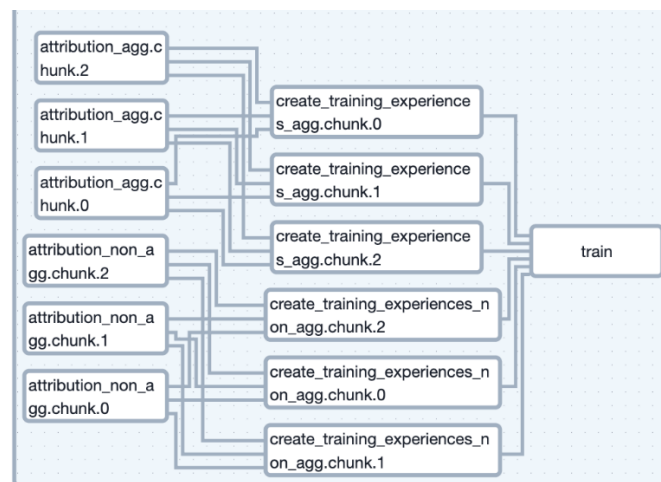


Рисунок 2 – Друга частина графу задач

Важливо відзначити, деякі завдання виконуються паралельно, наприклад Train і Predict. Це пов'язано з тим, що в межах одного дня їх результати не залежать один від одного. Predict використовує модель, що згенерувала через Train за минулий день, а не за поточний.

Висновки. Запропонована в статті структурна модель обчислювальних процесів для маркетингового тестування в нестабільному хмарному середовищі демонструє потенціал для мінімізації затримок виконання задач та оптимізації обчислювальних ресурсів. Важливу увагу приділено забезпеченню ідемпотентності задач, що підвищує стійкість до збоїв. Класифікація задач за пріоритетом і ресурсом дає змогу ефективніше керувати їхнім виконанням відповідно до директивних термінів та доступності ресурсів. Розроблені методи прогнозування термінів виконання та витрат ресурсів дозволяють зменшити неточності. Перспективним напрямком є подальший розвиток цієї

моделі, зокрема інтеграція автоматизованих систем управління обчислювальними процесами в широкій сфері додатків, включаючи інші галузі, що потребують аналогічного підходу до управління ресурсами в хмарних середовищах.

ЛІТЕРАТУРА

1. Танасієнко Д.О., Андрющенко В.О. Обчислювальні процеси у хмарному середовищі. Сучасні інформаційні та комунікаційні технології на транспорті, в промисловості і освіті – 2024. С. 132.
2. Parnas D. L. On the criteria to be used in decomposing systems into modules. Communications of the ACM. – 1972. № 15(12). P. 1053-1058.
3. Richard Blum, Christine Bresnahan. Linux Command Line and Shell Scripting BIBLE. John Wiley & Sons, Inc., Indianapolis, Indiana – 2015. P. 818
4. Melnik S. et al. Dremel: interactive analysis of web-scale datasets. Proceedings of the VLDB Endowment. – 2010. №. 3(12). P. 330-339.

PROCESSING DATA AND GENERATING RECOMMENDATIONS IN MARKETING TESTING

Tanasienko Dmytro, Andriushchenko Vadym

Abstract: *This scientific article explores a structural model of computational processes that are crucial for the effective processing of data and the generation of accurate recommendations in the context of marketing testing. Attention is paid to the application of these processes in unstable cloud environments, which adds significant complexity to management and optimization. The proposed model describes a system as a set of interconnected tasks that are performed on a regular periodic basis, ensuring a continuous cycle of analysis and forecasting. A central aspect of the research is the development of innovative methods for managing these computational processes. In particular, the article focuses on the critically important problem of minimizing delays concerning established deadlines for task execution. Furthermore, significant attention is given to optimizing the use of available computational resources, which allows for increasing system efficiency and reducing costs. The article also analyzes in detail important characteristics of tasks, such as their idempotency, classification by execution priority, and by the volume of computational resources consumed. Finally, the article proposes a simulation of the system's functioning under conditions of cloud environment instability*

Keywords: *tasks graph, idempotence, cloud computing, modeling, software, information technology.*

REFERENCE

1. Tanasienko D.O., Andriushchenko V.O. Obchislyuvalni protsesi u khmarnomu seredovishchi. Cuchasni informatsiini ta komunikatsiini tekhnologii na transporti, v promislovosti i osviti – 2024. S. 132. [in Ukrainian]
2. Parnas D. L. On the criteria to be used in decomposing systems into modules. Communications of the ACM. – 1972. № 15(12). P. 1053-1058.
3. Richard Blum, Christine Bresnahan. Linux Command Line and Shell Scripting BIBLE. John Wiley & Sons, Inc., Indianapolis, Indiana – 2015. P. 818
4. Melnik S. et al. Dremel: interactive analysis of web-scale datasets. Proceedings of the VLDB Endowment. – 2010. №. 3(12). P. 330-339.

МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІЧНИХ АЛГОРИТМІВ РОЗПОДІЛУ НАВАНТАЖЕННЯ НА КАНАЛИ СТАБІЛІЗАЦІЇ ВІТРОВОЇ ТУРБІНИ

С.В. Тарасов¹, О.Н. Молотков²

¹Інститут транспортних систем та технологій НАН України, к.т.н.,
ст.наук.спів. Україна

²Інститут транспортних систем та технологій НАН України, к.т.н., доц.,
Україна

Анотація. В роботі розглядається функціонування системи стабілізації обертання ротора вертикально-осьової вітроенергетичної установки (ВЕУ) із ротором Дар'є, керованим сумісними змінами довжини лопатей і траверс. В такій системі стабілізації значні зміни довжини траверс призводять до змін моменту інерції ротора, що суттєво ускладнює синтез працездатних стійких алгоритмів формування зворотних зв'язків. Для зменшення цього пропонується використання змінних в часі алгоритмів перерозподілу навантаження на канали стабілізації. Доведено, що застосування запропонованих алгоритмів суттєво покращує динаміку системи стабілізації – дозволяє значно зменшити зміни відхилень довжини траверс ротору від їх номінальних значень. Методами вирішення задачі є методи класичної теорії автоматичного управління і математичного моделювання. Новизна отриманих результатів полягає в розповсюдженні концепції регулювання шляхом зміни площі, що омітається, на вертикально-осьові ВЕУ із ротором Дар'є, що керується сумісними змінами довжини лопатей і траверс.

Ключові слова: вертикально-осьові турбіни, стабілізація обертання, моделювання, перехідні функції, динамічні алгоритми

Вступ. В сучасному світі вітроенергетичні установки вертикально-осьового типу набули широкого розповсюдження [1]. Для роботи ВЕУ поблизу оптимальних режимів використовують системи стабілізації обертання ротору з різноманітними алгоритмами формування зворотних зв'язків [2]. В роботі [3] обґрунтовано алгоритми розподілу навантаження на канали стабілізації швидкості обертання ротору ω вертикально- осьових ВЕУ із H -ротором Дар'є, керованого шляхом сумісних змін довжини лопатей і траверс згідно співвідношень

$$\frac{d\Delta\omega}{dt} = (k_1\Delta V + k_{2h}\Delta H + k_{2r}\Delta R - \Delta\omega) / T ,$$

$$\begin{aligned}\frac{d\Delta H}{dt} &= (k_{2h}K_2\Delta H + ((K_1T - K_2)\Delta\omega + k_1K_2\Delta V)(1-a))/T, \\ \frac{d\Delta R}{dt} &= (k_{2r}K_2\Delta R + ((K_1T - K_2)\Delta\omega + k_1K_2\Delta V)a)/T,\end{aligned}\quad (1)$$

де $\Delta\omega$ – відхилення швидкості обертів ротора змінної конфігурації, K_1, K_2 – коефіцієнти зворотних зв'язків каналів стабілізації, T, k_1, k_{2h}, k_{2r} – коефіцієнти лінеаризації, обчислені за конструктивними параметрами ВЕУ, ΔV зміна швидкості вітру, $a \in [0,1]$ – безрозмірний параметр перерозподілу навантаження на канали стабілізації. Чисельне значення a обирається таким, щоб забезпечити менше навантаження на канал змін довжини траверс і, як слідство, зробити практично незмінним момент інерції ротора. Недоліком такого алгоритму є незмінність a протягом всього часу функціонування системи. Більш доцільно було б змінювати a в залежності від часу або параметрів процесів стабілізації, що могло б покращити динамічні властивості системи.

Викладення основного матеріалу

В якості найбільш простого алгоритму динамічної зміни параметру перерозподілу a в залежності від часу може бути використаний, наприклад, скачко-подібний алгоритм

$$a(t) = \begin{cases} 1/2, & \text{якщо } |\Delta R / R_o| < 0,05 \\ 1/5, & \text{якщо } |\Delta R / R_o| \geq 0,05 \end{cases}, \quad (2)$$

де R_o – номінальне значення довжини траверс. Тоді система (1) розпадається на дві підсистеми із значеннями параметру a 1/2 і 1/5, що стикаються одна з одною в момент часу, коли $|\Delta R| / R_o$ досягає значення 0,05.

Більш привабливими, безумовно, є алгоритми з неперервними змінами параметру перерозподілу, наприклад алгоритм

$$a(t) = a_o + \Delta R(t), \quad (3)$$

де a_o – деяке незмінне початкове значення a з інтервалу $[0, 1]$.

З метою оцінки працездатності і порівняння ефективності запропонованих алгоритмів проведено моделювання роботи системи стабілізації обертання ВЕУ із конструктивними параметрами близькими до параметрів ВЕУ-0420, наведеними в табл. 2 роботи [3]. При цьому вважалось що: номінальне значення швидкості вітру $V_o = 13$ м/с; довготривалі зміни

швидкості вітру V моделюються одиничною ступеневою функцією $\Delta V(t) = 1(t)$; номінальна швидкість обертів ротора $\omega_0 = 2,8$ рад/с.

Обчислені значення перехідних функцій для алгоритмів (1)-(3) наведені на рис. 1, 2. Цифрою 1 позначені перехідні функції системи (1) при незмінному $a=1/5$, цифрою 2 – системи (1) із скачко-подібним алгоритмом (2), цифрою 3 – системи (1) із неперервним алгоритмом (3).

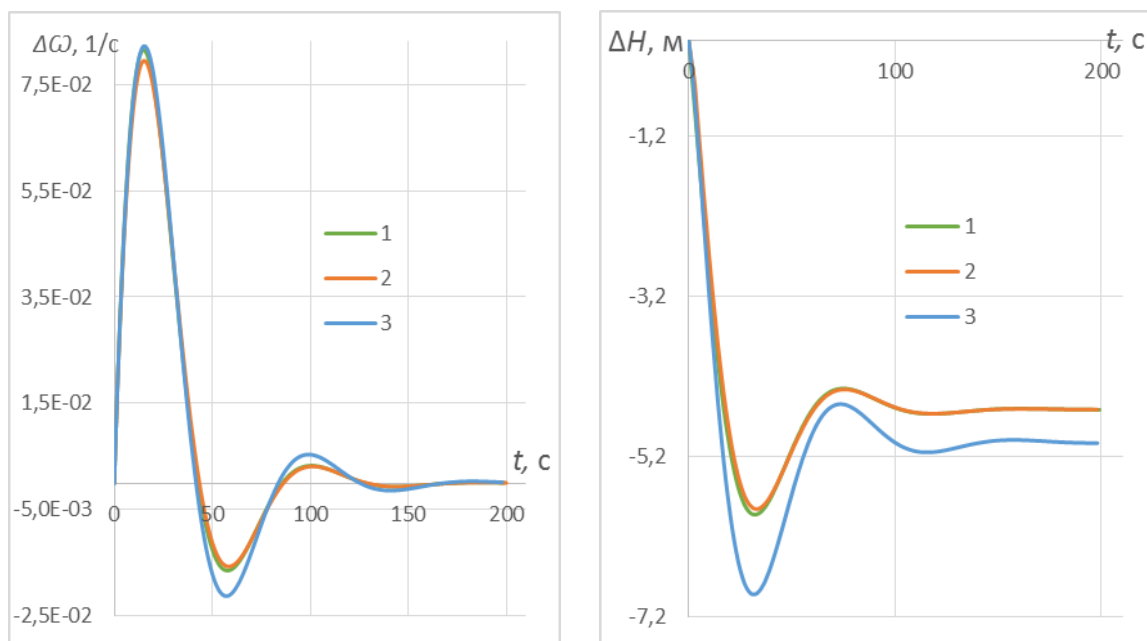


Рисунок 1 – Залежності $\Delta\omega$, 1/с і ΔH , м від часу t , с

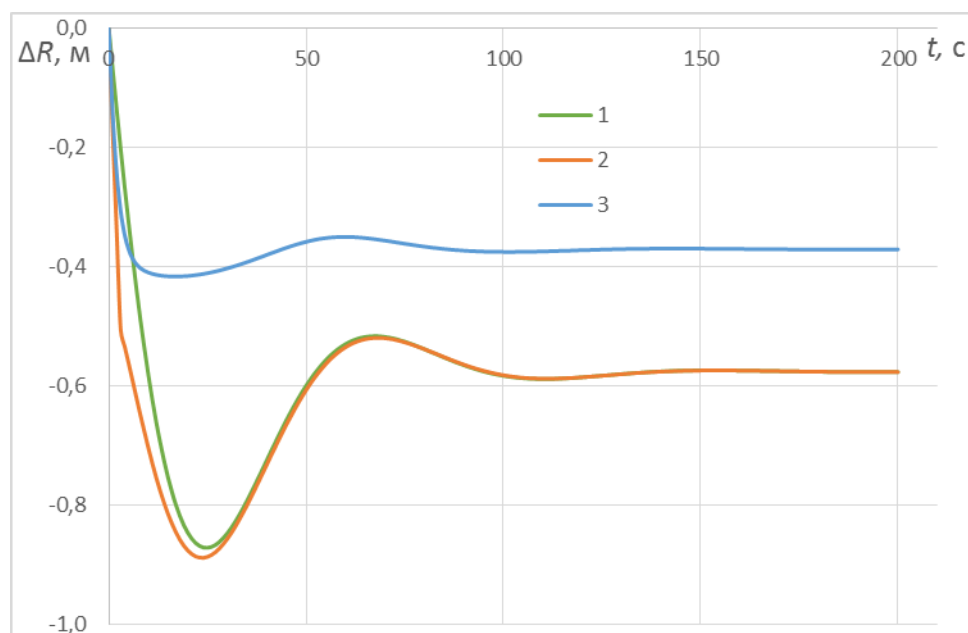


Рисунок 2 – Залежності ΔR , м від часу t , с

Аналіз наведених перехідних функцій дозволив зробити наступні висновки:

- пікові значення залежностей $\Delta\omega$ від часу не набувають значних змін;
- кінцеві значення $\Delta\omega$, що встановлюються при скачко-подібному та неперервно змінному параметрі a , дорівнюють нулю – статична помилка відсутня;
- пікові та кінцеві значення ΔH і ΔR суттєво змінюються, а саме – значення ΔR зменшуються, що і потрібно, а значення ΔH узгоджено зростають;
- пікові значення ΔR при застосуванні алгоритму (3) зменшуються практично в два рази у порівнянні з алгоритмами (1) і (2);
- залежності від часу $\Delta\omega$, ΔH і ΔR для алгоритму (3) гладкі та неперервні;
- неперервний за часом алгоритм (3) усуває недолік скачко-подібного алгоритму (2) – ударні зміни перехідних процесів в системі стабілізації;
- динамічна зміна параметру a згідно неперервної залежності (3) суттєво покращує динаміку системи стабілізації – дозволяє значно зменшити зміни відхилень ΔR довжини траверс ротору від їх номінальних значень і, як слідство, вважати практично незмінним момент інерції ротора ВЕУ.

Висновки. Проведене моделювання роботи ВЕУ із ротором Дар'є, керованим сумісними змінами довжини лопатей і траверс, із використанням змінних за часом алгоритмів формування зворотних зв'язків довело суттєве покращення динаміки системи стабілізації – забезпечило зменшення зміни відхилень довжини траверс ротору від їх номінальних значень і, як слідство, незмінність моменту інерції ротора ВЕУ, що спрощує розв'язок задач проектування таких систем.

ЛІТЕРАТУРА

1. Основи вітроенергетики: підручник / Г. Півняк, Ф. Шкрабець, Н. Нойбергер, Д. Ципленков: М-во освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т. – Д.: НГУ, 2015. – 335 с.
2. Тарасов С. В., Молотков О. Н. Алгоритми стабілізації швидкості обертів ротора Дар'є вітроенергетичної установки, керованого змінами довжини лопатей / С. В. Тарасов, О. Н. Молотков - Технічна механіка - 2023, № 4, с. 50 - 59. <https://doi.org/10.15407/itm2023.04.050>.
3. Тарасов С. В., Молотков О. Н. Стабілізація обертання ротора Дар'є сумісними змінами довжини лопатей і траверс / С. В. Тарасов, О. Н. Молотков - Технічна механіка - 2024, № 2, с. 92 - 105. <https://doi.org/10.15407/itm2024.02.092>

SIMULATION OF DYNAMIC ALGORITHMS FOR LOAD DISTRIBUTION TO WIND TURBINE STABILIZATION CHANNELS

Tarasov Serhii

Abstract. *This paper considers the functioning of the rotor rotation stabilization system of a vertical-axis wind turbine (WTG) with a Darrieus rotor controlled by joint changes in the length of blades and traverses. In such a stabilization system, significant changes in the length of the traverses lead to changes in the rotor's moment of inertia, which significantly complicates the synthesis of workable stable feedback algorithms. To reduce this, it is proposed to use time-varying algorithms for redistributing the load to the stabilization channels. It is proved that the use of the proposed algorithms significantly improves the dynamics of the stabilization system, which allows to significantly reduce the changes in the deviations of the rotor traverse lengths from their nominal values. The methods used to solve the problem are those of the classical theory of automatic control and mathematical modeling. The novelty of the obtained results lies in the extension of the concept of control by changing the swept area to vertical-axis wind turbines with a Darrieus rotor, which is controlled by joint changes in the length of blades and traverses.*

Keywords: *vertical-axis turbines, rotation stabilization, modeling, transient functions, dynamic algorithms*

REFERENCE

1. Osnovy vitroenerhetyky: pidruchnyk / H. Pivniak, F. Shkrabets, N. Noiberher, D. Tsyplenkov: M-vo osvity i nauky Ukrainy, Nats. hirn. un-t. – D.: NHU, 2015. – 335 s.
2. Tarasov S.V., Molotkov O.N. Alhorytmy stabilizatsiyi shvydkosti obertiv rotora Dar'ye vitroenerhetychnoyi ustanovky, kerovanoyi zminamy dovzhyny lopatey / S.V. Tarasov, O.N. Molotkov - Tekhnichna mekhanika - 2023, № 4, s. 50 - 59. <https://doi.org/10.15407/itm2023.04.050>.
3. Tarasov S.V., Molotkov O.N. Stabilizatsiia obertannia rotora Darie sumisnymy zminamy dovzhyny lopatei i travers / S.V. Tarasov, O.N. Molotkov - Tekhnichna mekhanika – 2024, № 2, s. 92–105. <https://doi.org/10.15407/itm2024.02.092>.

**МЕТОДИКА ПОБУДОВИ КОМПЛЕКСНИХ ПОКАЗНИКІВ ДЛЯ ОПИСУ
ПРОЦЕСІВ ВЗАЄМОДІЇ У СИСТЕМІ "МЕТАПЛ-ШЛАК" ПРИ ДОВЕДЕННІ
СТАЛІ НА УКП З ВИКОРИСТАННЯМ ФУНКЦІЇ БАЖАНОСТІ ХАРРІНГТОНА**

Тогобицька Д.М.¹, Белькова А.І.²

Інститут чорної металургії ім.. З.І. Некрасова Національної академії наук

України, д.т.н., професор, Україна

Інститут чорної металургії ім.. З.І. Некрасова Національної академії наук

України, д.т.н. Україна

Анотація. Розроблено методику побудови комплексних показників для опису фізико-хімічної взаємодії компонентів у системі «метал-шлак» при позапичній обробці сталі на основі концепції спрямованого хімічного зв'язку та аналітичного апарату функції бажаності Харрінгтона. Методика передбачає обґрунтування та генерацію структури комплексних показників систем «метал-шлак» (F_{ms}) та «метал-добавки» (F_{md}) з урахуванням їх хімічного складу і фізико-хімічних властивостей, а також параметрів технологічного режиму (F_t). Розроблено аналітичні залежності для розрахунку коефіцієнтів розподілу сірки, кремнію, марганцю та алюмінію у вигляді: $L_{ел} = A \cdot F_{ms}^{\alpha_1} \cdot F_{md}^{\alpha_2} \cdot F_t^{\alpha_3}$, де коефіцієнти A , α_1 , α_2 , α_3 визначаються для конкретної марки сталі. Запропонований підхід є основою прогнозування хімічного складу кінцевих розплавів обробки сталі на УКП для вибору оптимального складу шлакових сумішей, легуючих і мікролеуючих добавок, які підвищують ефективність та вдосконалення технології доведення сталі на установці ківш-піч.

Ключові слова: система «метал-шлак», параметри міжатомної взаємодії в розплавах, коефіцієнти розподілу сірки, кремнію, марганцю та алюмінію, комплексні показники, функція бажаності Харрінгтона.

Вступ. Сучасні технології металургійного виробництва висувають високі вимоги до якості сталі, що зумовлює необхідність оптимізації процесів її доведення. Одним з найважливіших аспектів у цьому напрямі є системне вивчення та опис процесів фізико-хімічної взаємодії компонентів у системі «метал-шлак», що визначають кінцеві властивості розплаву. У традиційних підходах до аналізу цих процесів основна увага приділяється експериментальному вивченню термодинамічних та кінетичних характеристик, проте важливим кроком є впровадження сучасних методів

математичного моделювання, які забезпечують комплексний аналіз та прогнозування параметрів технологічного процесу. У зв'язку з цим розробка методів побудови комплексних показників, що забезпечують всебічний облік фізичних та хімічних властивостей взаємодіючих середовищ при доведенні сталі на установці ківш-піч, є актуальним завданням, вирішення якого дозволить раціонально використовувати добавки та підвищити точність регулювання хімічного складу сталі.

Основний матеріал. Коефіцієнти розподілу елементів між металом і шлаком є найважливішими термодинамічними параметрами, які дозволяють визначити ступінь завершеності процесів легування та рафінування сталі, а також їх ефективність. Як показали наші дослідження [1], прогнозування коефіцієнтів розподілу елементів як змінних величин залежно від конкретних сировинних і технологічних умов дозволяє не тільки розрахувати кінцеві показники процесу, а й здійснювати рішення оберненої задачі пошуку оптимального рішення для отримання металу необхідної якості.

В якості інформаційної основи досліджень застосовано актуальні промислові дані хімічного складу сталі SAE1006 та відповідного шлаку до та після доведення сталі добавками на установці ківш-піч за даними марок сталі SAE1006. Виконано оцінку взаємозв'язків показників систем «метал-шлак» та «метал-добавки» з використанням інтегральних параметрів електронної структури розплавів, а саме розраховані хімічний еквівалент складу металу Z^v (e) та шлаку Δe (e), середньостатистична відстань між атомами d (10^{-1} nm) та показник стехіометрії шлаку ρ , що визначається відношенням числа катіонів до числа аніонів [2]. Також за допомогою цих параметрів розраховані температури плавлення сталі та основних добавок (феросплавів FeSi65 та FeMn).

Аналіз процесу десульфурації сталі показав, що на коефіцієнт розподілу сірки між кінцевими продуктами плавки після доведення сталі на УКП впливають три групи основних факторів: система «метал-шлак» до обробки сталі, система «метал-добавки» та технологічний режим. В аналітичному вигляді цей висновок можна відобразити як $L_s=f(F_{ms}, F_{md}, F_t)$, де F_{ms} , F_{md} , F_t –

комплексні показники відповідно систем «метал-шлак», «метал-добавки» та технологічного режиму.

Структуру зазначених комплексних показників було згенеровано за допомогою математичного апарату узагальненої функції бажаності Харрінгтона [3], який дозволяє перетворювати різнорозмірні показники на єдину безрозмірну шкалу, забезпечуючи об'єктивну та кількісну оцінку процесів взаємодії в системі «метал-шлак». Формула «кривої бажаності» $d = \exp(-(\exp(-y)))$ визначає функцію із двома ділянками насичення ($d \rightarrow 0$ та $d \rightarrow 1$) та лінійною ділянкою (від $d = 0,2$ до $d = 0,63$) (рис. 1). Вісь координат (y) називається шкалою часткових показників, вісь (d) – шкалою бажаності. Ця функція відображає залежність оцінок або показників бажаності (d), від безрозмірних показників (y), які переводять розмірні (натуральні) конкретні показники (x) відповідно до стандартних оцінок за шкалою бажаності.

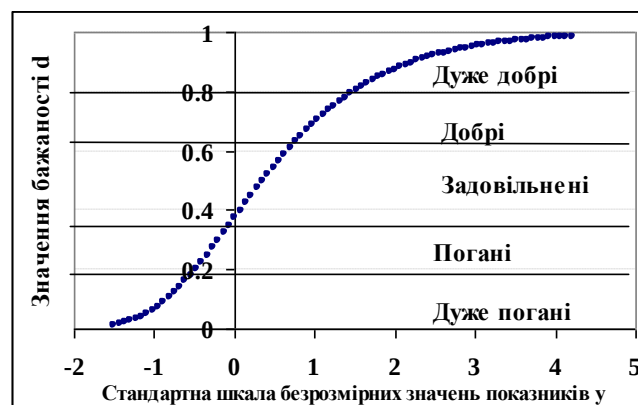


Рисунок 1 - Графік функції бажаності $d = \exp(-(\exp(-y)))$

Після переведення часткових показників y_i у шкалу бажаності (d_i), здійснюється розрахунок узагальненого показника D як середнє геометричне із часткових функцій бажаності з поправкою на значущість кожної властивості:

$$D = \prod_{i=1}^n d_i^{\beta}, \text{ де } \Pi - \text{добуток приватних функцій бажаності, } d_i - \text{індивідуальні}$$

показники, n - кількість показників, β - показник важливості якості. Причому число показників може бути різним для різних систем. Узагальнена функція бажаності є кількісним, однозначним, єдиним та універсальним показником якості об'єкта, її можна використовувати як критерій оптимізації.

З урахуванням виявлених факторів впливу на коефіцієнт розподілу сірки між металом та шлаком після позапічної обробки сталі визначені найбільш бажані значення окремих показників, для яких розраховані стандартні значення по осі ординат y_i та визначені часткові показники функції бажаності у безрозмірних одиницях вимірювання по кожному компоненту d_i та розраховані комплексні показники системи «метал-шлак» F_{ms} та «метал-добавки» F_{md}

$$F_{ms} = [S]_{\Pi}^{0,5} \cdot Z_{\Pi}^{Y_{\Pi}^{0,25}} \cdot \Delta e_{\Pi}^{0,25} \quad (1)$$

$$F_{md} = (T_{\Pi\text{лFeSi}} / T_{\Pi\text{лСталі}})^{0,6} \cdot (\text{CaO} / \text{SiO}_2)_{\text{ШУС}}^{0,4}, \quad (2)$$

де $[S]_{\Pi}$ – початковий вміст сірки в сталі до УКП, $Z_{\Pi}^{Y_{\Pi}}$ та Δe_{Π} – інтегральні показники початкового складу металу та шлаку, $T_{\Pi\text{лFeSi}} / T_{\Pi\text{лСталі}}$ – відношення температур плавлення добавки FeSi65 та сталі, $\text{CaO} / \text{SiO}_2_{\text{ШУС}}$ – основність шлакоутворюючої суміші з вапна та плавикового шпату.

В якості комплексного показника технологічного режиму плавки F_t використано значення інтенсивності продувки $I_{\text{пр}}$, яке розраховується як відношення витрати аргону $R_{\text{ар}}$ до тривалості плавки $T_{\text{р}}$: $I_{\text{пр}} = R_{\text{ар}} / T_{\text{р}}$, $F_t = I_{\text{пр}}$. Показники ступенів характеризують вагу часткового показника та визначаються за апріорними експертними оцінками на основі факторних навантажень на генеральний фактор.

На підставі виявлених зв'язків комплексних показників F_{ms} , F_{md} , F_t з коефіцієнтом розподілу сірки (рис. 2) розроблено аналітичну залежність для прогносної оцінки кінцевого показника L_s після доведення сталі на УКП (R – коефіцієнт кореляції зв'язку, A_1 – коефіцієнт рівняння, що визначається для конкретної марки сталі):

$$L_s = A_1 \cdot F_{ms}^{0,5} \cdot F_{md}^{0,3} \cdot F_t^{0,2} \quad R=0,85 \quad (3)$$

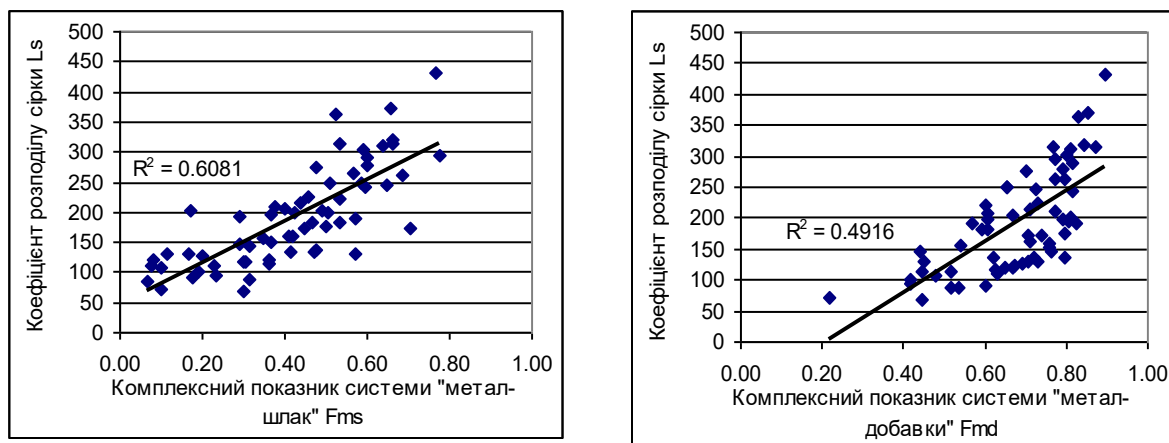


Рисунок 2 - Зв'язок коефіцієнту розподілу сірки Ls між продуктами плавки після обробки сталі на УКП з комплексними показниками систем «метал-шлак», «метал-добавки» та технологічного режиму по даним марки сталі SAE1006

Аналогічним чином розроблено прогнознi моделі для розрахунку коефіцієнтів розподілу кремнію, марганцю та алюмінію між кінцевими продуктами доведення сталі на УКП з використанням комплексних показників у вигляді $L_{\text{ел}} = A \cdot F_{\text{ms}}^{\alpha_1} \cdot F_{\text{md}}^{\alpha_2} \cdot F_t^{\alpha_3}$, де F_{ms} , F_{md} , F_t – комплексні показники відповідно систем «метал-шлак», «метал-добавки» та технологічного режиму плавки, A , α_1 , α_2 , α_3 – коефіцієнти рівнянь, які визначаються за відповідною експертною оцінкою для конкретної марки сталі.

Висновки. Розроблено методику побудови комплексних показників та прогнозування коефіцієнтів розподілу сірки, кремнію, марганцю і алюмінію між кінцевими продуктами після доводки сталі на УКП на основі концепції спрямованого хімічного зв'язку та аналітичного апарату функції бажаності Харрінгтона. Запропонований підхід є основою прогнозування хімічного складу кінцевих розплавів з урахуванням початкового складу металу та шлаку для вибору оптимального складу шлакових сумішей, легуючих і мікролегуєчих добавок, які підвищують ефективність та вдосконалення технології доведення сталі на установці ківш-піч.

ЛІТЕРАТУРА.

1. Togobitska D., Bielkova A., Stepanenko D. (2023). Model decision-making system in the task of choosing the optimal composition of the blast furnace burden under specific operating conditions of BF. *Acta Metallurgica Slovaca*, 29(2), 67–74. <https://doi.org/10.36547/ams.29.2.1764>

2. Togobitska D. and Belkova A. New approach to evaluating the thermodynamic consistency of melts in the "Metal-Slag" system based on interatomic interaction parameters Lithuanian Journal of Physics. Vol. 64, No. 1, pp. 58-71 (2024). <https://doi.org/10.3952/physics.2024.64.1.6>

3. Harrington, E. C. (1965), The desirable function, Industrial Quality Control, Vol. 21, No. 10, pp. 494-498.

METHODOLOGY FOR CONSTRUCTING COMPLEX INDICATORS TO DESCRIBE INTERACTION PROCESSES IN THE "METAL-SLAG" SYSTEM DURING STEEL REFINING IN A LADLE FURNACE USING HARRINGTON'S DESIRABILITY FUNCTION

Togobitska D., Belkova A.

Abstract. *A methodology has been developed for constructing complex indicators to describe the physicochemical interaction of components in the "metal-slag" system during steel refining in a ladle furnace, based on the concept of directed chemical bonding and the analytical apparatus of Harrington's desirability function. The methodology involves the justification and generation of the structure of complex indicators for the "metal-slag" (F_{ms}) and "metal-additive" (F_{md}) systems, considering their chemical composition, physicochemical properties, and technological process parameters (F_t). Analytical dependencies have been developed to calculate the distribution coefficients of sulfur, silicon, manganese, and aluminum in the form: $L_{e\Gamma} = A \cdot F_{ms}^{\alpha_1} \cdot F_{md}^{\alpha_2} \cdot F_t^{\alpha_3}$, where the coefficients A , α_1 , α_2 , and α_3 are determined for a specific steel grade. The proposed approach serves as the basis for predicting the chemical composition of final steel melts treated in a ladle furnace. It enables the selection of optimal slag mixtures, alloying, and microalloying additives that enhance efficiency and improve the steel refining technology in the ladle furnace unit.*

Keywords: *"metal-slag" system, parameters of interatomic interaction in melts, distribution coefficients of sulfur, silicon, manganese, and aluminium, complex indicators of "metal-slag" and "metal-additive" systems, Harrington's desirability function*

REFERENCES

1. Togobitska D., Bielkova A., Stepanenko D. (2023). Model decision-making system in the task of choosing the optimal composition of the blast furnace burden under specific operating conditions of BF. Acta Metallurgica Slovaca, 29(2), 67–74. <https://doi.org/10.36547/ams.29.2.1764>.
2. Togobitska D. and Belkova A. New approach to evaluating the thermodynamic consistency of melts in the "Metal-Slag" system based on interatomic interaction parameters Lithuanian Journal of Physics. Vol. 64, No. 1, pp. 58-71 (2024). <https://doi.org/10.3952/physics.2024.64.1.6>
3. Harrington, E. C. (1965), The desirable function, Industrial Quality Control, Vol. 21, No. 10, pp. 494-498.

УЗАГАЛЬНЕНА МЕТОДИКА СИНТЕЗУ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ СКЛАДНОГО БАГАТОВИМІРНОГО ОБ'ЄКТА

Федотова М.О.¹, Трушаков Д.В.¹, Скриннік І.О.¹, Заворуєв Р.С.²

¹Центральноукраїнський національний технічний університет, к.т.н., Україна

²Центральноукраїнський національний технічний університет, аспірант Україна

Анотація. Сушіння у киплячому шарі дуже ефективний спосіб для дрібнодисперсних матеріалів. Він забезпечує інтенсивний тепломасообмін, що дозволяє досягти високої продуктивності. Впровадження автоматизованих систем керування (АСК) відіграє ключову роль у досягненні стабільності технологічних процесів. У той же час сам киплячий шар є динамічною системою, де поведінка матеріалу залежить від багатьох факторів, таких як швидкість повітря, розмір частинок, вологість і температура. Це робить контроль процесу складним, оскільки навіть невеликі зміни в одному параметрі можуть призвести до значних змін в інших через наявні перехресні зв'язки. Дана робота є узагальненням в плануванні методики синтезу АСК процесом сушіння насіння соняшника у зерносушарці з киплячим шаром, що являє собою складний динамічний багатовимірний об'єкт із запізненням. Причому етапи синтезу враховують особливості конструкції сушарки, його роботу у різних режимах, зокрема у режимі стабілізації та ситуацію з неможливістю виміряти вихідні сигнали об'єкта у повній мірі.

Ключові слова: сушарка, киплячий шар, система автоматичного керування, структурна схема, багатовимірність, матриця передаточних функцій, випереджувач Сміта.

Вступ. Процес сушіння насіння соняшника у зерносушарці відбувається в сталому режимі [1], що становить близько 90% часу роботи сушарки. І у цьому режимі дуже важливо те, щоб вихідні сигнали об'єкта відповідали заданим значенням. Підвищення ефективності сушіння вимагає оптимізації роботи регуляторів в режимі стабілізації.

Вважаємо, що один з вхідних технологічних параметрів T (температура теплоносія) стабільна досить точно за допомогою регуляторів; насіння рухається по каскадах згори вниз зі швидкістю, що дорівнює $const$; математична ймовірність висоти киплячого шару h та вологості матеріалу w на виході зерносушарки відповідають значенню, що задане. В такому разі багатовимірний об'єкт з розподіленими параметрами (зерносушарку)

пропонується замінити сукупністю n лінійних об'єктів з зосередженими параметрами (n – кількість каскадів зерносушарки). Для цього введена прямокутна система координат XOY (рис. 1.) [2].

Початок цієї системи координат зв'язано з заданим (середнім) значенням положенням шибера 3. Вісь OX направлена вздовж руху шибера праворуч, а вісь OY – співпадає з конструктивною віссю сушарки за напрямком руху зерна. Положення об'єкту з номером k у визначеній системі координат характеризується вектором координат центру мас k -того каскаду, який дорівнює

$$\overset{0}{x} = (\overset{0}{x}_k, \overset{0}{y}_k), \quad (1)$$

де $\overset{0}{x}_k$ – проекція центру мас каскаду k на вісь OX ($\overset{0}{x}_k = 0$); $\overset{0}{y}_k$ – проекція центру мас каскаду k на вісь OY , яка з урахуванням рис. 1. визначена у вигляді $\overset{0}{y}_k = k \cdot \Delta$ (Δ – відстань між каскадами, м).

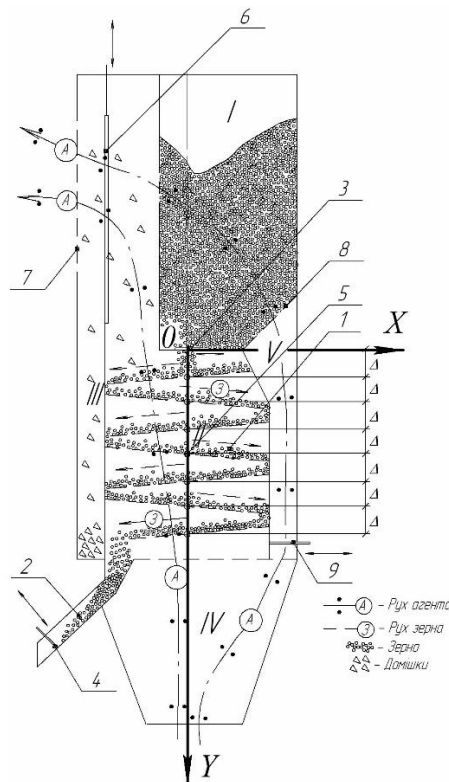


Рисунок 1 – Зерносушарка каскадного типу для сушіння насіння соняшника у киплячому шарі з прямокутною системою координат XOY

Вважаємо, що стабілізація висоти h_k киплячого шару на каскаді з номером k та зміна вологості матеріалу w на виході зерносушарки відбувається за

рахунок коливання шибера навколо середнього значення S_h та зміни температури теплоносія відносно середнього значення T_7 біля каскаду з номером 7.

Процесу стабілізації заважають неконтрольовані збурення, які утворюють вектор ψ_k . В такому разі на входах k -того об'єкту діють двовимірний вектор сигналів керування u_k та двовимірний вектор збурень ψ_k , динаміка якого невідома [3]. На виході k -того об'єкта діє вектор вихідних сигналів x_k вигляду

$$u_k = \begin{bmatrix} \dot{S}_h \\ \dot{T}_7 \end{bmatrix}; \quad x_k = \begin{bmatrix} h_k \\ w \end{bmatrix} \quad (2)$$

Основний матеріал. Враховуючи вищезазначене, модель динаміки зерносушарки з киплячим шаром для сушіння дисперсного матеріалу у режимі стабілізації, що враховує особливості конструкції, буде складатися з n систем звичайних диференціальних рівнянь, які мають вигляд типу:

$$P_k x_k = M_k u_k + \psi_k \quad (3)$$

де P_k – поліноміальна матриця розміру 2×2 , елементи якої є поліномами від оператора диференціювання $p = d/dt$ (k – номер каскаду)

M_k – поліноміальна матриця розміру 2×2 .

Припустимо також, що доступним для вимірювання в процесі є значення відхилення одного з вихідних технологічних параметрів об'єкта, а саме вологість матеріалу w від її математичного сподівання.

Відповідно методиці, що подана у монографії [4], доцільно скористатися структурною схемою системи стабілізації, на основі якої складемо таку, яка відповідає вимогам та особливостям складного багатовимірного об'єкта з розподіленими параметрами із запізненням (рис. 2). На входах такої структурної схеми діють вектори сигналів збурень та шумів вимірювання вологості на виході сушарки φ , точки впливу яких на систему не співпадають.

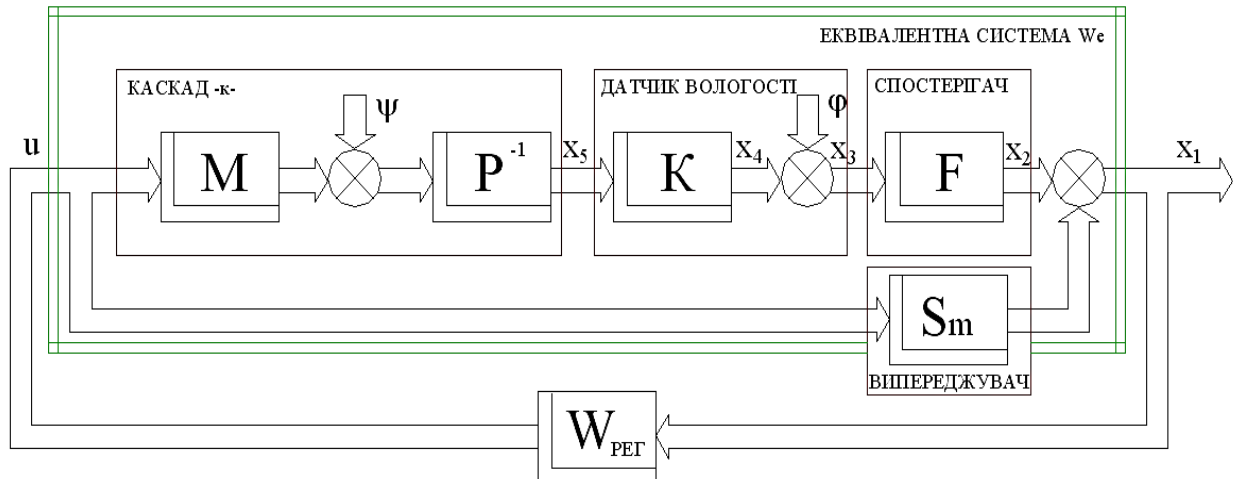


Рисунок 2 – Структурна схема системи автоматичного регулювання технологічних параметрів сушарки з киплячим шаром за неповними вимірами

Вектор сигналів на виході системи x_1 характеризує зміну висоти киплячого шару каскаду з номером k та вологості на виході об'єкта. Цей вектор складається як сукупність векторів сигналів на виходах спостерігача з матрицею передаточних функцій F_k та випереджувача S_m , опис якого визначається передаточною функцією S_m . Спостерігач F_k призначений для обчислення оцінок змін висоти киплячого шару на каскаді k та вологості w за сигналом від неідеального датчика вологості з передаточною функцією K .

Випереджувач S_m [5] призначений для компенсації запізнення в реакціях об'єкта x_k на зміну керуючих впливів u_k . Зворотній зв'язок в системі стабілізації замикається за допомогою регулятора з передаточною функцією $W_{рег}$. Входом якого є вектор x_1 , а виходом – вектор сигналів керування u_k .

Дослідження багатьох вчених доводять, що при фіксованих конструкції об'єкта керування та датчиків вимірювальної інформації точність стабілізації в однакових експлуатаційних умовах визначається структурою та параметрами матриць передаточних функцій каналів керування. Досягнення найвищої точності стабілізації при обмежених ресурсах керування можливе лише у оптимальних системах, структура та параметри законів керування якими визначені в результаті мінімізації квадратичного критерію якості, який враховує характеристики похибки стабілізації та зміни сигналів керування.

Таким чином, якщо взяти до уваги прийняті припущення, то загальне завдання дослідження полягає у наступному. За відомою конструкцією

дослідного зразку об'єкта (рис. 1.) та вимірними даними про вхідні (змiна положення завантажуючого шибєру S_h ; температури агєнта T) та вихiднi (змiна висоти матерiалу на кожному з семи каскадiв h_k ; та кiнцевої вологостi w матерiалу) сигнали сушарки, знайти опис динамiки об'єкта керування та збурєнь, що дiють на нього в сталому режимi; розробити структуру та параметри оптимальних передаточних функцiй спостерiгача F_k , регулятора $W_{рег}$, а також випереджувача Смита S_m ; оцiнити ефект вiд застосування синтезованої системи автоматичного регулювання вихiдних сигналiв сушарки

Висновки. Аналiз конструкцiй сушарок каскадного типу з киплячим шаром, особливостей розробки та функцiонування регуляторiв, якi застосовують для автоматизацiї процесiв керування сушінням у них, дозволив видiлити основнi причини, що заважають ефективному процесу сушіння:

- структура системи керування процесом сушіння складається з окремих незалежно працюючих регуляторiв, в той час, як експериментальна сушарка є багатовимiрним об'єктом керування з розподiленими параметрами та чистим запiзненням, що функцiонує в умовах дiї випадкових збурєнь та завад;

- модель об'єкта керування, покладена в основу розробки вже вiдомих систем, не враховує перехреснi зв'язки в об'єкті керування, чисте запiзнення та випадковий характеру збурєнь, якi супроводжують процес стабiлiзацiї висоти киплячого шару.

Для подолання зазначених недолiкiв запропоновано представити сушарку в режимi стабiлiзацiї у виглядi множини лiнеаризованих багатовимiрних об'єктiв керування з чистим запiзненням, на якi дiють стацiонарнi випадковi збурєння, та здiйснити синтез оптимальної системи стабiлiзацiї на основi експериментально-аналiтичного методу, суть якого iлюструє схема на рис. 2. Першим етапом використання зазначеного методу - є розробка методик розв'язання часткових задач дослiдження.

ЛІТЕРАТУРА

1. Федотова М.О. Автоматизація процесу стабілізації висоти киплячого шару насіння у зерносушарці за неповними вимірами: дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук: 05.13.07. Кропивницький, 2017. 276 с.
2. Монографія/ Федотова М.О., Скриннік І.О., Дарієнко В.В. Автоматизація процесу сушіння дисперсного матеріалу в киплячому шарі Findings of modern engineering research and developments: Scientific monograph. Riga, Latvia : «Baltija Publishing», 2022. 554 p. [<http://baltijapublishing.lv/omp/index.php/bp/catalog/view/217/5995/12512-1>]

3. Трушаков Д., Козловський О., Рендзіняк С., Коруд В., Федотова М Автоматизована система фільтрації завод під час вимірювання температури сушильної шафи. Електроніка та інформаційні технології. 2021. Випуск 15. С. 80–89 Electronics and information technologies. 2021. Issue 15. P. 80–89 [<http://elit.lnu.edu.ua/en/15/8.html>]
4. Азарсков В.Н. Методология конструирования оптимальных систем стохастической стабилизации / В.Н. Азарсков, Л.Н. Блохин, Л.С. Житецкий, – монография. К.: НАУ, 2006.– 438 с.
5. O. J. M. Smith. A controller to overcome dead-time. ISA Transactions, 6 (2):28–33, 1959.

GENERALIZED METHODOLOGY FOR SYNTHESIS OF A SYSTEM FOR AUTOMATIC REGULATION OF PARAMETERS OF A COMPLEX MULTIDIMENSIONAL OBJECT

Fedotova M.O., Trushakov D.V., Skrynnik I.O., Zavoruyev R.S.

Abstract. *Fluidized bed drying is a very effective method for fine materials. It provides intensive heat and mass transfer, which allows achieving high productivity. The introduction of automated control systems plays a key role in achieving stability of technological processes. At the same time, the fluidized bed itself is a dynamic system where the behavior of the material depends on many factors such as air velocity, particle size, humidity and temperature. This makes process control difficult, as even small changes in one parameter can lead to significant changes in others due to the existing cross-couplings. This work is a generalization in planning the methodology for synthesizing ACS by the process of drying sunflower seeds in a fluidized bed grain dryer, which is a complex dynamic multidimensional object with a delay. Moreover, the synthesis stages take into account the design features of the dryer, its operation in various modes, in particular in the stabilization mode, and the situation with the inability to fully measure the output signals of the object.*

Keywords: *dryer, fluidized bed, automatic control system, block diagram, multidimensionality, transfer function matrix, Smith advancer.*

REFERENCE

1. Fedotova M.O. Avtomatyzatsiia protsesu stabilizatsii vysoty kypliachoho sharu nasinnia u zernosushartsi za nepovnymy vymiramy: dysertatsiia na zdobuttia naukovooho stupenia kandydata tekhnichnykh nauk: 05.13.07. Kropyvnytskyi, 2017. 276 s.
2. Monohrafiia/ Fedotova M.O., Skrynnik I.O., Dariienko V.V. Avtomatyzatsiia protsesu sushinnia dyspersnoho materialu v kypliachomu shari Findings of modern engineering research and developments: Scientific monograph. Riga, Latvia : «Baltija Publishing», 2022. 554 p. [<http://baltijapublishing.lv/omp/index.php/bp/catalog/view/217/5995/12512-1>]
3. Trushakov D. Kozlovskyi O., Rendziniak S., Korud V., Fedotova M Avtomatyzovana systema filtratsii zavod pid chas vymiriuvannia temperatury sushylnoi shafy. Elektronika ta

informatsiini tekhnolohii. 2021. Vypusk 15. S. 80–89 Electronics and information technologies. 2021. Issue 15. P. 80–89 [<http://elit.lnu.edu.ua/en/15/8.html>]

4. Azarskov V.N. Metodolohyia konstruyrovanyia optymalnykh system stokhastycheskoï stabylyzatsyy / V.N. Azarskov, L.N. Blokhyn, L.S. Zhytetskyi, – monohrafiya. K.: NAU, 2006.– 438 s.

5. O. J. M. Smith. A controller to overcome dead-time. ISA Transactions, 6 (2):28–33, 1959.

**MODELING THE CREATIVE ECONOMY AS A COMPLEX SYSTEM:
INTEGRATING SOCIOCULTURAL DIMENSIONS THROUGH IT-BASED
APPROACHES**

Fomenko Valerii¹, Chala Veronika²

¹*First-years postgraduate student, Department of Economic Theory and International*

¹*Economic Relations*

¹*Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI “Prydniprovsk State*

¹*Academy of Civil Engineering and Architecture”, Ukraine*

²*d.e.s, prof*

²*Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI “Prydniprovsk State*

²*Academy of Civil Engineering and Architecture”, Ukraine*

Abstract: *This study investigates the application of sociocultural indicators to the modeling of the creative economy as a complex system. The integration of cultural dimensions, particularly based on Hofstede’s framework, offers valuable insights into the dynamics of innovation, human capital, and creative industry growth. Drawing upon recent cross-country studies and modeling approaches, this paper proposes a theoretical structure where sociocultural variables act as key system components influencing long-term development. Composite indices, structural modeling, and system dynamics models demonstrate that cultural values such as individualism, tolerance, and performance orientation significantly impact creative sector outcomes. The research highlights how cultural governance models and information technologies can be combined to monitor and predict trends in the creative economy. The proposed approach contributes to interdisciplinary economic modeling and supports strategic planning for countries aiming to develop innovation-driven, culturally grounded economic systems.*

Keywords: *creative economy, sociocultural indicators, Hofstede’s model, economic modeling, cultural dimensions, complex systems, innovation, human capital, cultural governance*

Introduction. The creative economy has emerged as a strategic vector for sustainable growth, encompassing industries where value is primarily generated through intellectual capital, cultural expression, and innovation. Despite its growing global importance, theoretical frameworks for modeling the creative economy remain underdeveloped, especially regarding the integration of sociocultural dimensions. This paper proposes a model-oriented perspective where cultural

indicators, drawn from validated theoretical frameworks such as Hofstede's dimensions, are used to describe, analyze, and forecast the development of creative sectors within national economic systems.

Theoretical Background. Cultural dimensions have been increasingly linked to innovation capacity and economic complexity. Previous researches show that individualism positively correlates with innovation and long-term economic performance [1]. Additionally, it confirms that performance-oriented cultures achieve better innovation outcomes [2]. Hofstede's framework, widely applied in cross-cultural studies, provides a basis for quantifying values such as uncertainty avoidance, individualism, indulgence, and power distance — each of which influences economic behavior, knowledge generation, and creative potential. These indicators form the basis for integrating cultural variables into economic modeling [3].

Modeling Approach. The creative economy is modeled here as a multi-layered complex system. Drawing on recent studies, the system incorporates sociocultural, economic, and institutional parameters [4]. Core variables include public cultural expenditure, tolerance indices, cultural participation rates, and performance orientation. Through composite indices and system dynamics modeling, this approach explores how shifts in cultural attitudes affect creative sector growth, innovation output, and national economic performance [5]. Recent studies further demonstrate how modeling tools like structural equation modeling (SEM) can operationalize such indicators for policy development [6]. While SEM and composite indices have proven effective for integrating sociocultural indicators into models, challenges remain. Cultural variables are often subjective, and many countries lack consistent datasets on creativity-related behaviors or policies. Despite these limitations, applying adaptive modeling tools makes it possible to reflect not only economic patterns but also evolving cultural dynamics that shape innovation.

Despite the promise of sociocultural modeling, significant methodological challenges remain. One major issue is data availability and standardization. In many emerging economies, including Ukraine, reliable statistics on cultural participation, creative employment, and value-based indicators are limited or fragmented [7].

Moreover, national datasets often fail to reflect regional specificities or informal cultural production, which are critical components of the creative economy. This raises the need for flexible modeling frameworks that can incorporate mixed data types — such as combining survey-based sociocultural indicators with official economic data. As open data and digital platforms continue to develop, future models must also account for dynamic, time-sensitive cultural trends that influence innovation outcomes. These limitations do not diminish the potential of the proposed approach but rather underscore the importance of data governance and interdisciplinary integration

Findings and Implications. The integration of sociocultural indicators into economic models improves the explanatory power and adaptability of forecasts in creative sector development. National-level studies indicate that cultural governance, digitalization, and education policies are most effective when aligned with a country's cultural profile. For countries like Ukraine, understanding how cultural values interact with innovation ecosystems offers a valuable tool for strategic planning, EU integration, and sustainable creative industry expansion. Information technologies such as data mining, SEM, and system modeling platforms enable practical implementation of this approach.

Future research could apply the proposed modeling structure to real-time regional datasets in Ukraine to identify local drivers of cultural innovation. Integration with geospatial data or time-series analysis platforms would enhance policy targeting and funding allocation for cultural infrastructure and talent development.

Conclusions. This paper proposes a theoretical and methodological foundation for modeling the creative economy as a complex system influenced by sociocultural dimensions. By synthesizing insights from Hofstede's model and contemporary economic modeling practices, the study offers a framework for integrating cultural factors into creative sector policy and planning. Future applications may include national forecasting systems and decision support tools for cultural policy design.

REFERENCES

1. Escandon-Barbosa, D.; Ramirez, A.; Salas-Paramo, J. The Effect of Cultural Orientations on Country Innovation Performance: Hofstede Cultural Dimensions Revisited? Sustainability 2022, 14, 5851. <https://doi.org/10.3390/su14105851>
2. Gorodnichenko, Y., & Roland, G. (2011). Which dimensions of culture matter for long-run growth? American Economic Review, 101(3), 492–496. <https://doi.org/10.1257/aer.101.3.492>
3. Jourdan, L. F., Jr., & Smith, M. (2021). National culture dimensions as predictors of innovation, creativity, and entrepreneurship. Journal of Global Business Insights, 6(2), 154–171. <https://doi.org/10.5038/2640-6489.6.2.1141>
4. Martinaitytė, E., & Kregždaitė, R. (2015). The factors of creative industries development in nowadays stage. Economics and Sociology, 8(1), 55–70. <https://doi.org/10.14254/2071-789X.2015/8-1/5>
5. Truchlikova, M., & Barteková, M. (2021). Dynamic models of the creative industries' entities in the globalized environment. SHS Web of Conferences, 92, 08021. <https://doi.org/10.1051/shsconf/20219208021>
6. Yan, W.-J., & Liu, S.-T. (2023). Creative economy and sustainable development: Shaping flexible cultural governance model for creativity. Sustainability, 15(5), 4353. <https://doi.org/10.3390/su15054353>
7. Zhou, Y., & Popkova, E. G. (2022). Cultural dimensions and innovation: A cross-country analysis. Technological Forecasting and Social Change, 174, 121243. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2021.121243>

МОДЕЛЮВАННЯ КРЕАТИВНОЇ ЕКОНОМІКИ ЯК СКЛАДНОЇ СИСТЕМИ: ІНТЕГРАЦІЯ СОЦІОКУЛЬТУРНИХ ВИМІРІВ ЧЕРЕЗ ІТ ПІДХОДИ

Фоменко Валерій, Чала Вероніка

Анотація. У науковому дослідженні розглядається підхід до моделювання креативної економіки як складної системи, в якій соціокультурні індикатори виступають ключовими параметрами. На основі моделей культурних вимірів Гофстеда та сучасних підходів до економічного прогнозування обґрунтовано необхідність інтеграції культурних змінних у стратегічне планування креативного сектору. Показано, що значення таких факторів, як індивідуалізм, толерантність, орієнтація на досягнення, є визначальними для інноваційного розвитку. Запропоновано методологічну основу для застосування інформаційних технологій — системної динаміки, структурного моделювання та композитних індексів у процесі аналізу і прогнозування стану креативної економіки.

Ключові слова: креативна економіка, соціокультурні індикатори, моделювання, культурні виміри, Гофстед, інформаційні технології, інновації, стратегічне планування.

ЛІТЕРАТУРА

1. Ескандон-Барбоса Д., Рамірес А., Салас-Парамо Х. Вплив культурної орієнтації на інноваційну результативність країн: переосмислення культурних вимірів Гофстеда. *Sustainability*. 2022. Т. 14, с. 5851. <https://doi.org/10.3390/su14105851> [in English].
2. Городніченко Ю., Роланд Г. Які культурні виміри мають значення для довгострокового зростання? *American Economic Review*. 2011. Т. 101(3), с. 492–496. <https://doi.org/10.1257/aer.101.3.492> [in English].
3. Журдан Л. Ф., Сміт М. Культурні виміри національного рівня як предиктори інновацій, креативності та підприємництва. *Journal of Global Business Insights*. 2021. Т. 6(2), с. 154–171. <https://doi.org/10.5038/2640-6489.6.2.1141> [in English].
4. Мартінайте Е., Крегждайте Р. Чинники розвитку креативних індустрій на сучасному етапі. *Economics and Sociology*. 2015. Т. 8(1), с. 55–70. <https://doi.org/10.14254/2071-789X.2015/8-1/5> [in English].
5. Трухлікова М., Бартекова М. Динамічні моделі суб'єктів креативних індустрій у глобалізованому середовищі. *SHS Web of Conferences*. 2021. Т. 92, с. 08021. <https://doi.org/10.1051/shsconf/20219208021> [in English].
6. Ян В.-Ц., Лю С.-Т. Креативна економіка та сталий розвиток: формування гнучкої моделі культурного управління для креативності. *Sustainability*. 2023. Т. 15(5), с. 4353. <https://doi.org/10.3390/su15054353> [in English].
7. Чжоу Ю., Попкова Е. Г. Культурні виміри та інновації: міжкраїнний аналіз. *Technological Forecasting and Social Change*. 2022. Т. 174, с. 121243. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2021.121243> [in English].

СПІРАЛЬНО-КІВШОВА ГІДРОТУРБІНА ДЛЯ МІКРО ГЕС

Харун В.Р.¹, Грабовецький І.І.²

¹ІФНТУНГ, ¹к.т.н, доцент, Україна,

²ІФНТУНГ, студент, Україна,

Анотація. В Україні особливо актуальним постає питання розвитку міні та мікро ГЕС, яке підсилить локалізацію та сталість енергетики на рівні громад. Існує велика кількість гідравлічних турбін, які використовуються на великих та малих гідроелектростанціях, всі вони мають свої переваги та недоліки. В публікації розглянута конструкція спірально-ківшевої гідротурбіни, яка дозволяє забезпечити безпечні умови для міграції риби, через турбіну, що досягається завдяки спеціальній геометрії лопатей. Після створення першого робочого прототипу спірально-ківшевої гідротурбіни діаметром 0,4 м, потужністю 1,7 кВт та пропускною здатністю 0,216 м³/с було проведено експериментальні дослідження, які дозволили визначити, що важливою характеристикою турбіни є здатність працювати при низькій швидкості течії та незначному гідростатичному напорі води.

Ключові слова: гідроелектростанції, мікро ГЕС, гідротурбіна, спірально-ківшева гідротурбіна, міграція риби.

Вступ. В сучасному світі існує тренд на розвиток відновлюваних джерела електроенергії, серед яких розвиток гідроенергетики займає одне з провідних напрямків. Так у 2024р. обсяг світового ринку гідроенергетики склав 255,31 млрд. доларів США, а до 2034р., очікується, що він становитиме 390,84 млрд. доларів США [1], тобто очікується ріст на 53%. В Україні значна частина електроенергії виробляється на потужних гідроелектростанціях (ГЕС), які потребують великих водосховищ та потужних дамб. Агресивна війна Росії проти України показала, що руйнування, або пошкодження таких дамб призводить до виключення значних обсягів електропостачання та негативного впливу на екологію. В Україні особливо актуальним постає питання розвитку міні та мікро ГЕС, яке підсилить локалізацію та сталість енергетики на рівні громад.

Метою цієї роботи є експериментальне дослідження працездатності спірально-ківшевої гідротурбіни.

Основний матеріал

При виборі гідравлічної турбіни, яку доцільно використовувати в мікро-ГЕС було проаналізовано існуючі конструкції та виділено їх недоліки:

Капланова турбіна [2] – це тип гідравлічної реактивної турбіни, призначеної для роботи в середовищах з малими градієнтами, для перепадами в рівні води від кількох метрів до кількох десятків. Це вискоефективна турбіна, але вона потребує значного напору та складних гідротехнічних споруд. Не передбачає безпечної міграції риби, що обмежує екологічну сумісність.

Френсісова турбіна [3] – це різновид турбіни, яка використовується для напору води від 11 до 300м, використовується в середньонапірних ГЕС, має достатньо вищий ККД до 90%, проте вимагає великих водосховищ.

Пелтонова турбіна [4] – це турбіна струменево-ківшевого типу, яку рекомендовано використовувати для гірських річок з перепадом висот від 20 до 50м для швидкості потоку води від 0,5 л/с до 350 л/с. Має високу ефективність, але не підходить для рівнинних річок із незначними перепадами висот.

Гвинтові (Архімедові) турбіни [5] - працюють при низькому напорі води, з перепадом висот від 1,5м і їх перевагою є те, що вони мають великі розмір гвинта і невелику швидкість обертання, тому дозволяють рибі і крупному сміттю без перешкоди подолати ГЕС. До недоліків можна віднести значні поздовжні розміри.

На відміну від цих моделей, спіральні-ківшова гідротурбіна поєднує в собі переваги низьконапірних турбін, простоту встановлення та екологічну безпеку, що робить її ефективним рішенням для малих річок та каскадних мікро ГЕС.

Початкова мета, яка послужила основою для розробки конструкції цієї гідротурбіни, полягала у створенні оптимальних та безпечних умов для міграції риб, через турбіну, що досягається завдяки спеціальній геометрії лопатей. Конструкція передбачає трубоподібний корпус, усередині якого лопаті закріплюються на внутрішній площині (рис.1) [6].



Рисунок 1 – Конструкція спірально - ківшевої гідротурбіни

Після створення першого робочого прототипу спірально-ківшової гідротурбіни діаметром 0,4 м, потужністю 1,7 кВт та пропускною здатністю $0,216 \text{ м}^3/\text{с}$ було проведено серію тестувань. Вони дозволили визначити, що важливою характеристикою турбіни є здатність працювати при низькій швидкості течії та незначному гідростатичному напорі води. Це дозволяє ефективно використовувати турбіну без суттєвого підвищення рівня води, мінімізуючи необхідність створення великих водосховищ та запобігаючи затопленню прилеглих територій. Така особливість робить спірально-ківшову турбіну екологічно безпечним рішенням для мікро ГЕС.

Як приклад, спірально-ківшеву гідротурбіну було встановлено на річці Прут в околі міста Коломия (рис.2).

Будівництво гідроелектростанції передбачає мінімальне втручання в природне русло річки, оскільки всі основні елементи конструкції збираються за межами водного потоку. Підняття рівня води на необхідні 1 м для роботи турбіни не потребує зведення монолітних бетонних конструкцій, що значно спрощує монтаж і знижує екологічний вплив.



Рисунок 2 – Процес спорудження дамби

Висновки. Таким чином, спірально-ківшова гідротурбіна демонструє значні переваги над традиційними рішеннями, зокрема у сферах екологічної безпеки, простоти встановлення та ефективності роботи в умовах малої течії. Завдяки своїм характеристикам вона може стати перспективним інструментом для розвитку малої гідроенергетики та енергетичної незалежності регіонів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Гідроенергетика: тренди та перспективи ринку до 2034 року [Електронний ресурс]. - Режим доступу: URL: https://uhe.gov.ua/media_tsentr/novyny/hidroenerhetyka-trendy-ta-perspektyvy-rynku-do-2034-roku (дата звернення: 23.02.2025).
2. Турбіна Каплана: робота, характеристики та застосування в гідроенергетиці [Електронний ресурс] // Renovables Verdes. - Режим доступу: URL: <https://uk.renovablesverdes.com/турбіна-каплана/> (дата звернення: 24.02.2025).
3. FORSTER. 100кВт, 500кВт, 1МВт, 2МВт Гідравлічна турбіна Френсіса. - Режим доступу: URL: <https://www.fstgenerator.com/uk/hydraulic-francis-turbine34-product/> (дата звернення: 24.02.2025).
4. Турбіна Пелтона [Електронний ресурс] // NEO-ELS. - Режим доступу: URL: <https://www.neo-els.com.ua/index.php/uk/турбіни-пелтона.html> (дата звернення: 24.02.2025).
5. LANDUSTRIE. Офіційний сайт [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://landustrie.com> (дата звернення: 25.03.2025).
6. Спірально-ківшова гідротурбіна пат. 149323 Україна: МПК F03B3/00 , № u202105260, заявл. 16.09.2021; опубл. 04.11.2021; бюл. №44/2021.

SPIRAL-BUCKET HYDRO TURBINE FOR MICRO HYDROPOWER PLANTS

Viktor KharunIgor Grabovetsky

Abstract. *The development of mini and micro hydropower plants is particularly relevant in Ukraine, as it promotes localized and sustainable energy at the community level. A wide variety of hydraulic turbines are used in large and small hydropower plants, each*

with its own advantages and disadvantages. This publication examines the design of the spiral-bucket hydro turbine, which ensures safe conditions for fish migration through the turbine due to the special geometry of its blades.

After creating the first working prototype of the spiral-bucket hydro turbine with a diameter of 0.4 m, a capacity of 1.7 kW, and a flow rate of 0.216 m³/s, experimental studies were conducted. These studies revealed that an important characteristic of the turbine is its ability to operate at low flow velocities and minimal hydrostatic head.

Keywords: *hydropower plants, micro hydropower plants, hydro turbine, spiral-bucket hydro turbine, fish migration.*

REFERENCE

1. Hidroenerhetyka: trendy ta perspektyvy rynku do 2034 roku [Elektronnyi resurs]. - Rezhym dostupu: URL: https://uhe.gov.ua/media_tsentr/novyny/hidroenerhetyka-trendy-ta-perspektyvy-rynku-do-2034-roku (data zvernennia: 23.02.2025).
2. Turbina Kaplana: robota, kharakterystyky ta zastosuvannia v hidroenerhetytsi [Elektronnyi resurs] // Renovables Verdes. - Rezhym dostupu: URL: <https://uk.renovablesverdes.com/турбіна-каплана/> (data zvernennia: 24.02.2025).
3. FORSTER. 100kVt, 500kVt, 1MVt, 2MVt Hidravlichna turbina Frensis. - Rezhym dostupu: URL: <https://www.fstgenerator.com/uk/hydraulic-francis-turbine34-product/> (data zvernennia: 24.02.2025).
4. Turbina Peltona [Elektronnyi resurs] // NEO-ELS. - Rezhym dostupu: <https://www.neo-els.com.ua/index.php/uk/турбіни-пелтона.html> (data zvernennia: 24.02.2025).
5. LANDUSTRIE. Ofitsiinyi sait [Elektronnyi resurs]. - Rezhym dostupu: <https://landustrie.com> (data zvernennia: 25.03.2025).
6. Spiralno-kivshova hidroturbina pat. 149323 Ukraina: MPK F03B3/00 , № u202105260, zaiavl. 16.09.2021; opubl. 04.11.2021; biul. №44/2021.

МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ НЕПЕРЕРВНОЇ ІНТЕГРАЦІЇ З УРАХУВАННЯМ СПОЖИВАННЯ РЕСУРСІВ У ХМАРНОМУ СЕРЕДОВИЩІ

Цвіркун Л.І.¹, Миронов Ю.А.²,

¹НТУ «Дніпровська політехніка», Канд.техн.наук, доц., Україна

²НТУ «Дніпровська політехніка», Україна

Анотація. *Неперервна інтеграція дуже важлива в сучасній розробці програмного забезпечення. Запропонована модель неперервної інтеграції у вигляді спрямованих ациклічних графів з урахуванням ресурсів хмарного середовища для покращення прийняття рішень.*

Ключові слова: *модель, критичний шлях, ациклічні графи, неперервна інтеграція, масштабування, мінімізація, ресурси, затримки, хмарне середовище.*

Вступ. Неперервна інтеграція являє собою базову парадигму в сучасній розробці програмного забезпечення, що дозволяє здійснювати поступову інтеграцію коду, автоматизоване тестування та раннє виявлення дефектів [1]. У еластичних хмарних середовищах, де обчислювальні ресурси надаються динамічно, процеси неперервної інтеграції отримують вигоду від масштабованої інфраструктури, одночасно стикаючись із проблемами управління витратами та швидкими циклами зворотного зв'язку.

Сучасні практики неперервної інтеграції використовують розподілення ресурсів за запитом для оптимізації продуктивності та мінімізації затримок. Виникаюча тенденція полягає в детальному аналізі споживання як обчислювальних, так і програмних ресурсів, що сприяє ідентифікації критичних шляхів та зниженню витрат на ліцензування та експлуатацію [2]. Традиційні підходи покладаються на моделювання процесів неперервної інтеграції як системи масового обслуговування, та історичні дані про продуктивність для оцінки пропускну здатності, затримок та використання ресурсів. Такі методології, проте, обмежені квазістатичними припущеннями та обмеженнями, накладеними агрегованим аналізом процесів.

Основний матеріал. Обмежений доступ до внутрішньої інформації серверів неперервної інтеграції додатково ускладнює безпосередній аналіз черг, а аномалії в історичних даних, такі як короткочасні піки споживання

ресурсів, погіршують точність традиційних моделей [2]. До того ж, природна еластичність хмарних середовищ робить статичні апроксимації черг недостатніми для відображення динамічної поведінки одночасно виконуваних процесів. У відповідь пропонується новий підхід до аналізу процесів зі сторони «клієнта», що зосереджується на структурному розкладі окремих процесів неперервної інтеграції, тим самим покращуючи керованість і забезпечуючи точну оцінку споживання ресурсів та затримок.

Теорія графів надає міцну основу для представлення процесів неперервної інтеграції у вигляді спрямованих ациклічних графів (САГ), де вершини позначають етапи процесу, а ребра відображають порядок виконання або пріоритетність [3]. Застосування методу критичного шляху у рамках САГ дозволяє визначити частину процесу, яка створює вузькі місця у системі.

Інтеграція значень використовуваних ресурсів до САГ сприяє розробці моделі з урахуванням ресурсів, яка одночасно враховує залежності завдань та відповідні профілі споживання ресурсів.

Модель процесу неперервної інтеграції з урахуванням ресурсів формалізується як множина $P = (G, R)$, де $G = (V, E)$ є САГ, що інкапсулює залежності між етапами процесу, R представляє вектор ресурсів. Кожна вершина $v \in V$ означає окремий етап процесу неперервної інтеграції, спрямовані ребра $e \in E$ забезпечують виконання порядку етапів, а функція споживання ресурсів $r: V \rightarrow \mathbf{R}^m$ присвоює профіль споживання ресурсів кожному етапу, $r(v) = [r_1(v), r_2(v), \dots, r_m(v)]$. Загальний профіль споживання ресурсів процесу визначається як:

$$R_{\text{total}} = \sum_{v \in V} r(v).$$

Висновки. Запропонована модель: інтегрує структурний аналіз на основі САГ та моделювання з урахуванням ресурсів в єдину методологію; вирішує обмеження традиційних технік; підвищує точність аналізу продуктивності процесів неперервної інтеграції, що працюють у динамічних, чутливих до витрат хмарних інфраструктурах. Такий інтегрований підхід створює основу для покращення прийняття рішень щодо масштабування ресурсів і відкриває

шлях до подальших досліджень структурної оптимізації систем безперервної інтеграції.

ЛІТЕРАТУРА

1. Tsvirkun L., Myronov Y. Challenges and Specificities of Adopting Continuous Integration within Scalable Cloud Environments. IEEE 18th International Conference on Computer Science and Information Technologies (CSIT) : Conference Proceedings, Lviv, 19–21 October 2023. <https://doi.org/10.1109/CSIT61576.2023.10324010>.
2. Миронов Ю., Цвіркун Л. (2024). Аналіз методів структурної оптимізації процесів неперервної інтеграції. Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security, 3, 133–139. <https://doi.org/10.32782/IT/2024-3-14>.
3. Kliuchka, Y. O., & Shmatko, O. V. (2020). Comparison of blockchain technology and directed acyclic graph during data storage and processing in a distributed registry. Bulletin of National Technical University "KhPI". Series: System Analysis, Control and Information Technologies, (1 (3), 106–116. <https://doi.org/10.20998/2079-0023.2020.01.18>.

CONTINUOUS INTEGRATION PROCESS MODEL TAKING INTO ACCOUNT RESOURCE CONSUMPTION IN A CLOUD ENVIRONMENT

Leonid Tsvirkun, Yurii Myronov

Abstract. *Continuous integration is very important in modern software development. A continuous integration model in the form of directed acyclic graphs is proposed, taking into account the resources of the cloud environment to improve decision-making.*

Keywords: *model, critical path, acyclic graphs, continuous integration, scaling, minimization, resources, delays, cloud environment.*

REFERENCE

1. Tsvirkun L., Myronov Y. Challenges and Specificities of Adopting Continuous Integration within Scalable Cloud Environments. IEEE 18th International Conference on Computer Science and Information Technologies (CSIT) : Conference Proceedings, Lviv, 19–21 October 2023. <https://doi.org/10.1109/CSIT61576.2023.10324010>.
2. Myronov Y., Tsvirkun L. (2024). Analysis of methods for structural optimization of continuous integration processes. Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security, 3, 133–139. <https://doi.org/10.32782/IT/2024-3-14>.
3. Kliuchka, Y. O., & Shmatko, O. V. (2020). Comparison of blockchain technology and directed acyclic graph during data storage and processing in a distributed registry. Bulletin of National Technical University "KhPI". Series: System Analysis, Control and Information Technologies, (1 (3), 106–116. <https://doi.org/10.20998/2079-0023.2020.01.18>.

TOOLS FOR IMPLEMENTING A DIGITAL TWIN OF A DISTRIBUTED COMPUTER SYSTEM WITH ENERGY FACILITIES

Shapovalova S. I. ¹, Titov V. M. ²

¹ *National technical university of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”,
P.h.d., ¹ Associate Professor, Ukraine*

² *National technical university of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”,
postgraduate student, Ukraine*

Abstract. *The paper discusses approaches to the design and implementation of a digital twin of a distributed computer system containing various types of energy facilities. Considering current challenges in Ukraine’s energy sector—such as geographical dispersion, system complexity, and external risks—the relevance of digital twins for real-time modeling, monitoring, and forecasting of energy systems is substantiated. The architecture components of the digital twin of an energy network as a distributed computer system are presented. Key physical and logical components are defined, along with the software implementation tools, including platforms for electrical modeling, visualization, data storage, and analysis. Examples of digital twin implementations in global practice are provided, and a concept for adapting such solutions to the needs of Ukraine’s energy sector is proposed.*

Keywords: *digital twin, energy system, distributed computer system, modeling, anomaly detection, forecasting, IoT, SCADA, PowerFactory, energy security.*

Problem Statement and Relevance. Ukraine's energy infrastructure includes a wide variety of facilities—from power plants, substations, and transformers to energy storage systems and solar panels of end users. Given the geographic dispersion, technical complexity, and external risks (e.g., cyberattacks or physical intrusions), the system must be viewed as a distributed network. This allows the detection of abnormal events and potential threats through comprehensive real-time data analysis. Since testing on a real energy network is unacceptable, the implementation of a digital twin is necessary for its protection. The topic's relevance is due to the growing need for digitalization in the energy sector and a shift toward adaptive management with crisis prevention capabilities. Creating a digital twin to simulate the dynamics of an energy system enables the simulation of failures, monitoring of component behavior under changing conditions, and timely threat

detection. This is a complex task encompassing physical process modeling, IoT infrastructure development, mathematical modeling, and network visualization.

Review of Recent Research and Publications. According to studies [1, 2], digital twins are actively used in aviation, mechanical engineering, logistics, and medicine. In the energy sector, applications include equipment failure prediction, maintenance optimization, and load management. Work [3] explores a digital twin for a wind power plant, improving energy production forecast accuracy up to 95% by combining climate models with AI. Study [4] analyzes the digital twin architecture for microgrids, involving IoT modules, a SCADA system, and a cloud data platform. Despite success in specific areas, building an effective digital twin for a distributed system with numerous energy objects remains a challenge due to the need to process large heterogeneous datasets, ensure scalability, high availability, and integration with existing management systems.

In practice, the concept of digital twins has already been successfully applied in the energy sectors of different countries, demonstrating effectiveness in management, optimization, and modernization tasks. Table 1 presents examples of digital twin implementations in energy.

Table 1

Examples of Digital Twin Implementations in Energy

Digital Twin	Description	Functionality
GE Digital Grid [5]	Digital twin for power grids with failure prediction and load balancing	1. Grid behavior simulation for failure prediction. 2. Network optimization to increase efficiency.
Siemens Energy Digital Twin [6]	Digital twin for generation optimization and maintenance cost reduction	1. Optimization of production processes and energy management systems. 2. Reduced energy consumption and improved efficiency.
National Grid ESO (UK) [7]	Digital twin of the UK's national energy system	1. Digital copy for improved modeling and forecasting. 2. Support for carbon neutrality transition by system optimization.

The digital twin for a distributed computer system with energy facilities ensures: 1) real-time technical state modeling of components; 2) detection of deviations and failure prediction; 3) integration with control systems and decision support.

Objective – to define the concept and software toolkit for a digital twin of the energy network.

Main Part. Components of a digital twin include both physical objects and logical nodes. Physical components: 1) generation facilities (solar, wind, hydro and thermal power plants); 2) transformers, substations, relay protection systems; 3) energy storage systems (batteries, hybrid accumulators); 4) smart meters, consumer devices; 5) communication equipment (routers, controllers, IoT sensors). Logical components: 1) energy consumption and generation models; 2) data aggregation nodes (Data Concentrator Units); 3) Forecasting algorithms for consumption/production; 4) anomaly detection modules; 5) data transmission channels (communication protocols, encryption). These components should be virtualized and connected as network nodes, enabling a full graph model of the energy system for anomaly detection in specific segments. This approach supports not only real-time system visualization but also complex behavioral analysis, failure prediction, adaptive response, and scenario simulation.

Modeling Software and Tools. Developing a digital twin of an energy system is a complex multi-level task requiring various tools for modeling, simulation, data processing, and visualization. Depending on goals—electrical modeling, stability analysis, anomaly detection, forecasting, or 3D visualization—different specialized platforms are used. One of the key tools is DIgSILENT PowerFactory [8], which is widely used for detailed electrical modeling of generation, transmission, and distribution processes. It enables both static and dynamic analysis of power systems, as well as modeling of load modes, emergency situations, and operational network control. Its use is appropriate when building a digital twin at the level of a unified power system or regional networks.

Specialized modeling environments are used to create mathematical models of system components, simulate control and automation processes, and perform

optimization—offering flexibility in design and integration through APIs and data exchange protocols. These tools play a key role in implementing both the physical behavior and logical structure of a digital twin.

Thus, effective design and implementation of a digital twin requires the comprehensive use of various tools, each performing a specific function within a unified architecture. Their coordinated integration allows for the creation of a flexible, scalable, and fault-tolerant system of digital representation of the real energy environment.

Conclusions: a concept of a digital twin for the energy network has been proposed, which enables:

1. Real-time detection of anomalies and external intrusions.
2. Optimization of system operation modes based on forecasts.
3. Reduction of technical and operational risks.
4. Implementation of "What-If" scenarios for emergency planning.

REFERENCE

1. J.V.S. do Amaral, C.H. dos Santos, J.A.B. Montevechi, A.R. de Queiroz Energy Digital Twin applications: A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 188, December 2023 <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032123007499>
2. Digital Twins for Energy Systems, IEEE Innovation Spotlight, 2023. September 26, 2023, <https://innovate.ieee.org/innovation-spotlight/digital-twins-for-energy-systems/>
3. Ali A. A., Marco Z., Amro I. H. A. R., Antonella L., Digital Twins of smart energy systems: a systematic literature review on enablers, design, management and computational challenges, 01 October 2024, <https://energyinformatics.springeropen.com/articles/10.1186/s42162-024-00385-5>
4. Peter P., Milos C., Didvijay G., Arun J., Digital twins and their use in future power systems, Volume 1, 25 Feb 2025, <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.12688/digitaltwin.17435.2>
5. GE Vernova – Digital Grid Software. GE's Digital Grid solutions provide advanced analytics and grid control systems to simulate, predict, and optimize electrical grid performance using digital twins and AI <https://www.gevernova.com/software/>
6. Siemens Digital Twin Platform
Siemens' Digital Twin framework for energy and industrial systems enables real-time simulations and predictive analytics across the product lifecycle to enhance efficiency and resilience. <https://www.siemens.com/global/en/products/automation/topic-areas/digital-enterprise/digital-twin.html>
7. National Grid ESO – Future Energy System

The UK's National Energy System Operator (ESO) develops a digital twin of the UK's power grid to support net-zero targets, simulate grid operations, and enhance national energy security <https://www.neso.energy/>

8. DIGSILENT PowerFactory, A powerful software tool for power system analysis and simulation. Widely used for modeling generation, transmission, and distribution of electricity <https://www.digsilent.de/en/powerfactory.html>

ЗАСОБИ РЕАЛІЗАЦІЇ ЦИФРОВОГО ДВІЙНИКУ РОЗПОДІЛЕНОЇ КОМП'ЮТЕРНОЇ СИСТЕМИ З ЕНЕРГЕТИЧНИМИ ОБ'ЄКТАМИ

Світлана Шаповалова, Тітов Владислав

Анотація. У роботі розглянуто підходи до проектування та реалізації цифрового двійника розподіленої комп'ютерної системи, що містить енергетичні об'єкти різного типу. З урахуванням сучасних викликів в енергетичному секторі України, таких як географічна розгалуженість, технічна складність систем та ризики зовнішнього втручання, обґрунтовано доцільність застосування цифрових двійників для моделювання, моніторингу та прогнозування роботи енергосистем у реальному часі. Представлено компоненти архітектури цифрового двійника енергетичної мережі як розподіленої комп'ютерної системи, визначено ключові фізичні та логічні компоненти, а також інструменти програмної реалізації, включно з платформами для електротехнічного моделювання, візуалізації, зберігання та аналізу даних. Представлено приклади реалізації цифрових двійників у світовій практиці та запропоновано концепцію адаптації подібних рішень до потреб української енергетики.

Ключові слова: цифровий двійник, енергетична система, розподілена комп'ютерна система, моделювання, виявлення аномалій, прогнозування, IoT, SCADA, PowerFactory, енергетична безпека.

ЛІТЕРАТУРА

1. J.V.S. do Amaral, C.H. dos Santos, J.A.B. Montevechi, A.R. de Queiroz Energy Digital Twin applications: A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 188, December 2023 <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032123007499>
2. Digital Twins for Energy Systems, IEEE Innovation Spotlight, 2023. September 26, 2023, <https://innovate.ieee.org/innovation-spotlight/digital-twins-for-energy-systems/>
3. Ali A. A., Marco Z., Amro I. H. A. R., Antonella L., Digital Twins of smart energy systems: a systematic literature review on enablers, design, management and computational challenges, 01 October 2024, <https://energyinformatics.springeropen.com/articles/10.1186/s42162-024-00385-5>
4. Peter P., Milos C., Didvijay G., Arun J., Digital twins and their use in future power systems, Volume 1, 25 Feb 2025, <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.12688/digitaltwin.17435.2>

5. GE Vernova – Digital Grid Software

GE's Digital Grid solutions provide advanced analytics and grid control systems to simulate, predict, and optimize electrical grid performance using digital twins and AI

<https://www.gevernova.com/software/>

6. Siemens Digital Twin Platform. Siemens' Digital Twin framework for energy and industrial systems enables real-time simulations and predictive analytics across the product lifecycle to enhance efficiency and resilience

<https://www.siemens.com/global/en/products/automation/topic-areas/digital-enterprise/digital-twin.html>

7. National Grid ESO – Future Energy System

The UK's National Energy System Operator (ESO) develops a digital twin of the UK's power grid to support net-zero targets, simulate grid operations, and enhance national energy security <https://www.neso.energy/>

8. Digsilent PowerFactory, A powerful software tool for power system analysis and simulation. Widely used for modeling generation, transmission, and distribution of electricity <https://www.digsilent.de/en/powerfactory.html>

DOI: 10.34185/1991-7848.itmm.2025.01.081

ОГЛЯД МЕТОДІВ ШІ ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ ПОКЛАДІВ ВУГЛЕВОДНІВ З 3D-СЕЙСМІЧНИХ ЗОБРАЖЕНЬ

Дмитрієва І.С.¹, Дмитренко А.М.²

¹Дніпровський металургійний інститут, Український державний університету науки і технологій, к.т.н., доцент, Україна

²Дніпровський металургійний інститут, Український державний університету науки і технологій, аспірант, Україна

Анотація. Ця робота досліджує, як методи штучного інтелекту можна використовувати для виявлення потенційних скупчень вуглеводнів за допомогою 3D-сейсмічних зображень. Вона заглиблюється в сучасні досягнення ШІ в інтерпретації сейсмічних даних, охоплюючи такі методи, як згорткові та рекурентні нейронні мережі, графові нейронні мережі та трансформери. У статті також розглядаються значні перешкоди, такі як проблеми з доступністю та якістю навчальних даних, труднощі із застосуванням моделей до нових областей та складнощі, пов'язані з розумінням результатів. Крім того, вона торкається методів підготовки сейсмічних зображень та вилучення релевантних ознак, підходів до роботи з обмеженими даними та пропонує потенційні шляхи для майбутніх досліджень у цій галузі..

Ключові слова: Штучний інтелект, 3D сейсмічні зображення, вуглеводні, прогнозування покладів, згорткові нейронні мережі, рекурентні нейронні мережі, трансформаторні мережі, графові нейронні мережі, сейсмічні атрибути.

Передумова та мета. Зростаючий глобальний попит на енергетичні ресурси посилив потребу в ефективних і точних методах виявлення покладів вуглеводнів. Тривимірна сейсмічна візуалізація надає важливу інформацію про підземні геологічні структури, але традиційна інтерпретація значною мірою покладається на трудомісткий ручний аналіз. Штучний інтелект має потенціал трансформувати цю галузь шляхом автоматизації та покращення аналізу складних 3D-сейсмічних даних, що призводить до ефективніших і точніших прогнозів покладів вуглеводнів.

Нафта і природний газ є одними з головних енергетичних ресурсів сучасного суспільства. Завдяки їхньому застосуванню в промисловості та

побуті науково-технічна революція стала реальністю. Родовища цих ресурсів формуються за різних геологічних умов як на суші, так і в морських басейнах, особливо в шельфових зонах.

Наука про геологію нафтогазових родовищ досліджує процеси їх утворення, закономірності розповсюдження та особливості розташування покладів у геологічних структурах, а також генезу вуглеводнів. Вона розробляє методи прогнозування, пошуку, розвідки та освоєння таких родовищ. Геологія також дозволяє здійснювати підрахунок ресурсів та запасів вуглеводневої сировини в надрах.

Процес перетворення органічної речовини на нафту і газ відбувається таким чином: органічна речовина, що має рослинне або тваринне походження, відкладається в осадових породах. Найсприятливіші умови для цього виникали в прибережних зонах морів, лагунах, затоках, а також в озерах і болотах. Перетворенню органічних речовин на нафту чи газ сприяє відновлювальне середовище.

Історично відомі геологічні закономірності поширення покладів свідчать про переважно органогенне походження вуглеводнів у верхній частині осадової товщі, де зосереджено 90% відомих родовищ нафти й газу. Це підтверджується також ізотопним складом вуглецю у вуглеводнях, який схожий до його складу в органічній матерії.

Штучний інтелект володіє великим потенціалом для перетворення галузі розвідки вуглеводнів через автоматизацію та покращення аналізу складних 3D-сейсмічних даних. Завдяки алгоритмам машинного навчання можливо обробляти значні обсяги даних, автоматично виділяти складні сейсмічні структури та підвищувати точність в інтерпретації цих даних, що веде до ефективних і більш точних прогнозів наявності покладів вуглеводнів. Використання технологій ШІ також здатне оптимізувати робочі процеси розвідки та зменшити ризики, що зрештою сприяє успішним відкриттям і оптимізованим виробничим операціям.

Використання штучного інтелекту у прогнозуванні вуглеводнів з 3D-сейсмічних зображень демонструє значні досягнення завдяки впровадженню

різних моделей машинного навчання та методологій. Серед цих моделей згорткові нейронні мережі (CNN) стали однією з провідних технік через їх високу ефективність в аналізі зображень. Як об'ємні зображення, 3D-сейсмічні дані дозволяють CNN успішно ідентифікувати складні геологічні структури, наприклад, розподіл піщаних тіл, що є критично важливим для оцінки вуглеводневих резервуарів. Дослідження підтверджують ефективність CNN у таких завданнях, як виявлення розломів, класифікація літології та ідентифікація потенційних нафтогазових об'єктів у сейсмічних даних. Рекурентні нейронні мережі (RNN), особливо такі, як мережі з довгою короткостроковою пам'яттю (LSTM), хоча і менш прямо застосовуються до аналізу статичних 3D-сейсмічних обсягів, знайшли своє використання в суміжних завданнях, як-от сейсмічна інверсія імпедансу. Вони ефективно обробляють послідовні дані та можуть бути корисними для аналізу часозалежних сейсмічних даних, наприклад, у 4D-сейсмічному моніторингу резервуарів. Крім архітектур глибокого навчання, традиційні технології машинного навчання, такі як штучні нейронні мережі (ANN), машини опорних векторів (SVM) та випадкові ліси, також залишаються широко використаними для характеристики резервуарів. Ці методи застосовуються для прогнозування важливих властивостей резервуарів, таких як пористість, проникність і літологія, на основі аналізу сейсмічних атрибутів і даних каротажу свердловин. Застосування штучного інтелекту в галузі розвідки вуглеводнів є багатогранним і динамічно розвивається. Моделі глибокого навчання, серед яких згорткові нейронні мережі з самоуважністю (SACNN) та нейронні мережі з оптимізацією роєм частинок мутації (MPSO-ANN), засвідчили значний успіх у прогнозуванні ймовірного розподілу газу в резервуарах, демонструючи високу точність та здатність моделювати складні нелінійні взаємозв'язки в сейсмічних даних. У сфері класифікації літології одновимірні CNN (1D-CNN) і просторово-часові мережі (STNet) довели свою ефективність у точному визначенні типів гірських порід із використанням каротажних даних свердловин, ґрунтуючись на просторовій і часовій інформації, закладеній у цих наборах даних.

Хоча в застосуванні штучного інтелекту для прогнозування вуглеводнів за допомогою 3D-сейсмічних зображень досягнуто значних успіхів, у сучасних дослідженнях існують певні прогалини та обмеження. Однією з основних проблем є нестача великих, якісних та маркованих 3D-сейсмічних даних, необхідних для навчання надійних моделей ШІ. Ефективність моделей, особливо тих, які базуються на архітектурі глибокого навчання, залежить від кількості та якості даних, які використовуються для їх навчання. В геофізиці отримання таких об'ємних і точно маркованих наборів даних часто є трудомістким і потребує значних ресурсів. Крім того, самі сейсмічні дані можуть містити шум, артефакти і мати обмежену роздільну здатність через обмеження в процесі збору та складність підповерхневих структур. Дані каротажу свердловин, які використовуються як база для навчання моделей ШІ з метою прогнозування властивостей резервуарів, також можуть бути недостатньо детальними, неповними або не повністю відображати різноманітність умов резервуару. Ще одним значним обмеженням є проблема узагальнення: моделі ШІ, розроблені на основі даних з одного геологічного середовища, часто не функціонують адекватно на даних з різних регіонів з іншими геологічними характеристиками. Для збереження точності часто потрібно адаптувати модель до специфіки нових даних, що підкреслює, що попередньо навчена модель може не бути безпосередньо застосовною в інших геологічних умовах.

Висновок. Створення великих, різноманітних та добре маркованих 3D-сейсмічних наборів даних є ключовим для забезпечення справедливих і відтворюваних порівнянь різних моделей ШІ та методик. Майбутні дослідження варто спрямувати на поєднання мультимодальних джерел даних, таких як сейсмічні дані, каротаж свердловин, геологічні карти та інформація з дистанційного зондування, щоб за допомогою технологій ШІ отримати глибше розуміння підповерхневої перспективи вуглеводнів. Крім того, кількісна оцінка невизначеності в прогнозуванні вуглеводневих ресурсів за допомогою ШІ буде важливою для створення надійних оцінок ризику та підтримки прийняття обґрунтованих рішень у сфері розвідки та розробки.

ЛІТЕРАТУРА

1. “Machine Learning in Oil and Gas Exploration - A Review”, Ahmad Lawal, Yingjie Yang, Hongmei He, Nathaniel L. Baisa, January 2024, IEEE Access PP(99):1-1, DOI:10.1109/ACCESS.2023.3349216.
2. “Enhancing Oil And Gas Exploration Efficiency Through Ai-Driven Seismic Imaging And Data Analysis”, Gideon Oluseyi Daramola, Boma Sonimiteim Jacks, Olakunle Abayomi Ajala, Abiodun Emmanuel Akinoso, Engineering Science & Technology Journal, P-ISSN: 2708-8944, E-ISSN: 2708-8952, Volume 5, Issue 4, P.No. 1473-1486, April 2024.
3. “A Review of AI Applications in Unconventional Oil and Gas Exploration and Development”, Feiyu Chen, Linghui Sun, Boyu Jiang, Xu Huo, Xiuxiu Pan, Chun Feng, Zhirong Zhang. Energies 2025, 18(2), 391. doi.org/10.3390/en18020391.
4. “A novel seismic inversion method based on multiple attributes and machine learning for hydrocarbon reservoir prediction”, Zongbin Liu, Jianmin Zhu, Bo Tian, Rui Zhang, Yongheng Fu, Yuan Liu, Front. Earth Sci., December 2024, Sec. Economic Geology, Volume 12 - 2024, doi.org/10.3389/feart.2024.1498164
5. “Transformer and CNN Hybrid Neural Network for Seismic Impedance Inversion”, Chunyu Ning, Bangyu Wu, Zhaolin Zhu, DOI:10.1109/IGARSS52108.2023.10281611, IGARSS 2023 - 2023 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium.
6. Дмитрієва І.С., Дмитренко А.М Використання методу опорних векторів на прикладі прогнозування властивостей покладів вуглеводнів / Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні. Квітень 2024. Дніпро. с. 227-231 <https://doi.org/10.34185/1991-7848.itmm.2024.01.040>

REVIEW OF AI METHODS FOR PREDICTING HYDROCARBON DEPOSITS FROM 3D SEISMIC IMAGES

Dmytriieva Iryna Serhiivna, Dmytrenko Andrii Mykolaiovych

Abstract. *This work investigates how artificial intelligence techniques can be used to identify potential hydrocarbon accumulations using 3D seismic imagery. It delves into current AI progress for interpreting seismic data, covering methods like convolutional and recurrent neural networks, graph neural networks, and transformers. The paper also addresses significant obstacles, such as problems with the availability and quality of training data, difficulties in applying models to new areas, and the complexities involved in understanding the results. Furthermore, it touches upon techniques for preparing seismic images and extracting relevant features, approaches for dealing with sparse data, and suggests potential avenues for future investigation in this domain.*

Keywords *Artificial intelligence, 3D seismic images, hydrocarbons, deposit prediction, convolutional neural networks, recurrent neural networks, transformer networks, graph neural networks, seismic attributes.*

REFERENCE

1. “Machine Learning in Oil and Gas Exploration - A Review”, Ahmad Lawal, Yingjie Yang, Hongmei He, Nathaniel L. Baisa, January 2024, IEEE Access PP(99):1-1, DOI:10.1109/ACCESS.2023.3349216.
2. “Enhancing Oil And Gas Exploration Efficiency Through Ai-Driven Seismic Imaging And Data Analysis”, Gideon Oluseyi Daramola, Boma Sonimiteim Jacks, Olakunle Abayomi Ajala, Abiodun Emmanuel Akinoso, Engineering Science & Technology Journal, P-ISSN: 2708-8944, E-ISSN: 2708-8952, Volume 5, Issue 4, P.No. 1473-1486, April 2024.
3. “A Review of AI Applications in Unconventional Oil and Gas Exploration and Development”, Feiyu Chen, Linghui Sun, Boyu Jiang, Xu Huo, Xiuxiu Pan, Chun Feng, Zhirong Zhang. Energies 2025, 18(2), 391. doi.org/10.3390/en18020391.
4. “A novel seismic inversion method based on multiple attributes and machine learning for hydrocarbon reservoir prediction”, Zongbin Liu, Jianmin Zhu, Bo Tian, Rui Zhang, Yongheng Fu, Yuan Liu, Front. Earth Sci., December 2024, Sec. Economic Geology, Volume 12 - 2024, doi.org/10.3389/feart.2024.1498164
5. “Transformer and CNN Hybrid Neural Network for Seismic Impedance Inversion”, Chunyu Ning, Bangyu Wu, Zhaolin Zhu, DOI:10.1109/IGARSS52108.2023.10281611, IGARSS 2023 - 2023 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium.
6. Dmytriieva I.S, Dmytrenko A.M Vykorystannia metodu opornykh vektoriv na prykladi prohozuvannia vlastyvostei pokladiv vuhlevodniv / Materialy Mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii Informatsiini tekhnolohii v metalurhii ta mashynobuduvanni. Kviten 2024. Dnipro. s. 227-231 <https://doi.org/10.34185/1991-7848.itmm.2024.01.040>

DOI: 10.34185/1991-7848.itmm.2025.01.082

МІЖНАРОДНИЙ ДОСВІД ВИКОРИСТАННЯ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ FLYSHARE ДЛЯ ІНДИВІДУАЛІЗОВАНОГО ТРИВИМІРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ПРОТЕЗІВ НИЖНІХ КІНЦІВОК

Аврунін О.Г., Селіванова К.Г., Тимкович М.Ю., Носова Я.В.

Анотація. Реабілітаційна інженерія зараз є найактуальнішим напрямом в Україні, що потребує сучасних рішень та інноваційних технологій. Розробка біонічних кінцівок, автоматизовані системи заміщення втрачених органів та функцій людини дозволяють значно підвищити якість життя та прискорити функціональне відновлення військових та цивільних. Зростання потреби в реабілітаційних рішеннях вимагає швидкої адаптації світових досягнень у галузі протезування та ортезування, зокрема через обмежені ресурси і необхідність масштабування допомоги. Метою цієї дослідницької роботи є аналіз можливості використання програмного засобу Flyshare для створення індивідуалізованих 3D-моделей протезів нижніх кінцівок, а також демонстрація його потенціалу. Важливим етапом для створення персоналізованих протезів є точне тривимірне сканування культі пацієнта, яке дозволяє врахувати її анатомічні особливості, форму та розміри.

Ключові слова: охорона здоров'я, медичні інформаційні системи, протезування, ортезування, моделювання, тривимірне сканування, тривимірний друк, штучні кінцівки

У сучасних умовах, коли Україна стикається з тяжкими наслідками повномасштабної війни, проведення заходів реабілітації військових та цивільних осіб з ампутаціями верхніх та нижніх кінцівок набуває критичної ваги. Війна призвела до значного збільшення кількості пацієнтів, які потребують якісних, доступних та індивідуалізованих протезів. Традиційні методи виготовлення протезів, засновані на ручній роботі, часто є трудомісткими, довготривалими та не завжди дозволяють досягти оптимальної анатомічної відповідності. Саме тому впровадження інноваційних технологій, наприклад як тривимірне моделювання та цифрове протезування, стає не лише медичним, а й соціальним імперативом, спрямованим на відновлення функціональності та якості життя постраждалих [1].

Зростання потреби в реабілітаційних рішеннях вимагає швидкої адаптації світових досягнень у галузі протезування та ортезування, зокрема через обмежені ресурси і необхідність масштабування допомоги. Важливим кроком у цьому напрямку стала співпраця кафедри біомедичної інженерії Харківського національного університету радіоелектроніки з міжнародними партнерами. Французькою організацією Handicap International Humanity & Inclusion було створено тренінг від компанії Proteor - світового лідера у розробці спеціалізованого програмного забезпечення для протезування, такого як OrtenShape та Flyshape. У рамках наукового проєкту кафедра отримала не лише доступ до передових програмних інструментів, а й сучасне технічне оснащення: 3D-сканер для точного анатомічного знімання, спеціалізований 3D-принтер для виготовлення протезних компонентів та інструменти для віртуалізації процесів.

Метою цієї дослідницької роботи є аналіз можливості використання програмного засобу Flyshape для створення індивідуалізованих 3D-моделей протезів нижніх кінцівок, а також демонстрація його потенціалу [2].

Важливим етапом для створення персоналізованих протезів є точне тривимірне сканування культі пацієнта, яке дозволяє врахувати її анатомічні особливості, форму та розміри. Програмний засіб Flyshape пропонує гнучкі рішення для отримання таких даних, підтримуючи різноманітні методи 3D-сканування з використанням сучасних сенсорів. Серед них:

Apple LiDAR (Light Detection and Ranging) – технологія, що забезпечує швидке сканування завдяки інфрачервоному випромінюванню та створенню деталізованих хмар точок з високою точністю. Вона дозволяє отримувати дані навіть у умовах обмеженого освітлення, що робить процес неінвазійним і комфортним для пацієнта.

TueDepth – камери глибини, які генерують точні 3D-моделі завдяки інфрачервоній проєкції сітки точок. Їхня точність та можливість роботи в реальному часі ідеально підходять для динамічного сканування рухливих ділянок тіла.

Structure Sensor Camera для iPad – забезпечує високу деталізацію та здатний сканувати складні геометрії, включаючи рельєф культі, без фізичного контакту, що виключає ризик деформації м'яких тканин.

Ці технології відрізняються неінвазивністю, швидкістю (процес займає 5-15 хвилин) та доступністю, оскільки використовують портативні пристрої, які можна застосовувати як у клініці, так і мобільно. Для порівняння, традиційні методи (наприклад, гіпсування) часто вимагають тривалого контакту з пацієнтом, можуть спричиняти дискомфорт і дають менш точні результати через ризик деформації матеріалу [3-5].



Рисунок 1 – Тривимірне сканування у Flyshape: а – доступні засоби тривимірного сканування у ПЗ Flyshape; б – 3D Structure sensor для iPad

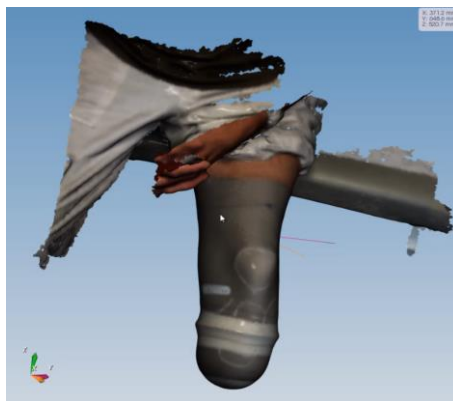


Рисунок 2 - Ілюстрація етапу реєстрації тривимірної проєкції під час тривимірного сканування кінцівки [2]

Приклад такого індивідуального скану пацієнта наведено на рис. 3.

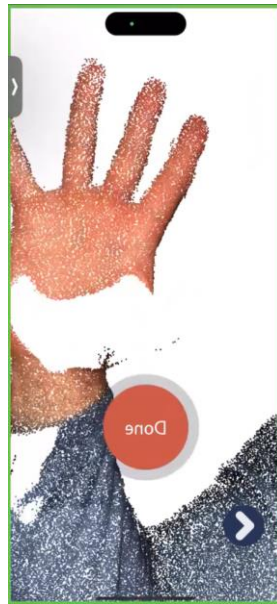


Рисунок 3 – Приклад тривимірного скану пацієнта

Програмний засіб Flyshape надає можливість створення індивідуалізованих протезів для різних рівнів ампутації нижніх кінцівок. Кожен випадок вимагає урахування унікальних анатомічних особливостей, механічних навантажень та функціональних потреб пацієнта. Розглянемо процес моделювання на прикладі протезу, де ключовим етапом є точна адаптація гнізда протезу до форми культі.

Після завантаження 3D-скану культі у Flyshape, користувач послідовно проходить інтерактивні етапи:

- Відмітка анатомічних орієнтирів;
- Програма дозволяє візуально позначати критичні точки (наприклад, кісткові виступи, сухожилля, зони підвищеного тиску), що допомагає автоматизувати подальше моделювання з урахуванням біомеханіки.



Рисунок 4 – Ілюстрація відмітки анатомічних орієнтирів

- Корегування тривимірного скану;
- виправлення артефактів сканування (наприклад, нечітких ділянок) та оптимізація геометрії культі за допомогою фільтрів згладжування;
- Орієнтування моделі;
- Встановлення правильної позиції культі у просторі відносно осей навантаження (вертикальна, фронтальна), що критично для розподілу ваги тіла під час ходи;
- Секційне редагування стиснення (Dynamic Volume Reduction);
- Імітація тиску на м'які тканини за рахунок створення моделі гнізда, яка є на 2-5% меншою за обсягом, ніж сканована культя. Це забезпечує щільне прилягання протезу без надмірного тиску на окремі ділянки. Регулювання стиснення виконується секційно — окремі зони (наприклад, передня частина гомілки) можна зменшувати або збільшувати індивідуально;
- Редагування кривими Безьє та обрізка (Trimlines);
- Визначення меж гнізда протезу за допомогою кривих Безьє, які дозволяють створити плавні та ергономічні контури. Trimlines враховують зони фіксації протезу, рухливість суглобів та комфорт пацієнта;
- Редагування регіонів тиску;
- Додаткове зменшення або збільшення щільності матеріалу в зонах підвищеного навантаження (наприклад, навколо кісткових виступів);
- Інтеграція кріплень та компонентів;
- Використання бібліотеки стандартних модулів (шарніри, роз'єми, амортизатори) або створення індивідуальних кріплень, які інтегруються в 3D-модель;
- Генерування G-code для 3D-друку;
- Експорт оптимізованої моделі у формат, сумісний з 3D-принтерами, та автоматичне створення G-code з урахуванням параметрів матеріалу та технології виготовлення [4].

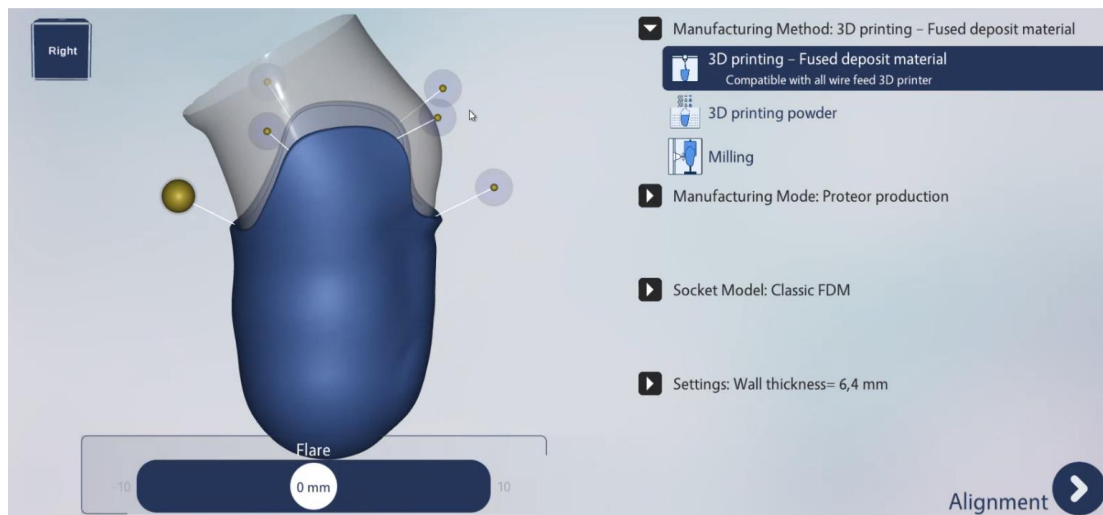


Рисунок 5 – Етап вибору методу виробництва та відповідних параметрів



Рисунок 6 – Візуалізація етапу фінального вирівнювання протезу

Висновки. Програмний засіб Flyshape показав свою ефективність як інноваційний інструмент з широким спектром можливостей для індивідуалізованого тривимірного моделювання протезів нижніх кінцівок. Його унікальна архітектура поєднує точність анатомічного сканування, гнучкість проєктування та інтеграцію з сучасними методами виробництва, що робить його незамінним у контексті масового протезування, зокрема в умовах війни. Завдяки автоматизації ключових етапів (від корекції стиснення до генерування G-коду) Flyshape не лише скорочує час виготовлення протезів, але й забезпечує високу відтворюваність результатів, мінімізуючи вплив людського фактору [5].

ЛІТЕРАТУРА

1. O. Korolovych, K. Selivanova, Y. Nosova and M. Tymkovych, "Physical Rehabilitation System of the Upper Extremities Muscle Dysfunction," 2024 IEEE 17th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET), Lviv, Ukraine, 2024, pp. 1-6, doi: 10.1109/TCSET64720.2024.10755903.
2. Tymkovych, M., Avrunin, O., Selivanova, K., Kolomiets, A., Bednarchyk, T., & Smailova, S. (2024). CORRESPONDENCE MATCHING IN 3D MODELS FOR 3D HAND FITTING. Informatyka, Automatyka, Pomiar W Gospodarce I Ochronie Środowiska, 14(1), 78–82. <https://doi.org/10.35784/iapgos.5498>
3. Королович О. С. Основні вимоги до процесу фізичної реабілітації м'язової дисфункції верхніх кінцівок / О. С. Королович, К. Г. Селіванова // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я : тези доповідей XXXII міжнародної науково-практичної конференції MicroCAD-2024, 22-25 травня 2024 р. – Харків : НТУ «ХПІ». – С. 1342.
4. Інтеграція відкритих освітніх ресурсів для українських студентів: міжнародний досвід та співпраця в умовах кризових обставин / А. А. Соколов, К. Г. Селіванова, Я. В. Носова, А. О. Боєчко-Немовча // Електроенергетика, електромеханіка та технології в АПК : матеріали Міжнар. наук.-практ. конф., 6 листопада 2024 р.– Харків : Держ. біотехнологічний ун-т., 2024. – С. 251-252.
5. Селіванова К. Г. Використання можливостей інтелектуального робота для прискорення процесу фізичної реабілітації рук / К. Г. Селіванова, О. Г. Аврунін // Сучасний стан та перспективи біомедицинської інженерії : матеріали Міжнар. наук.-практ. конф., присвяченої 125-річному ювілею Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», 13-14 грудня 2023 р. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. – С. 196-198.

INTERNATIONAL EXPERIENCE IN THE USE OF FLYSHAPE SOFTWARE FOR INDIVIDUALIZED THREE-DIMENSIONAL MODELING OF LOWER LIMB PROSTHESES

Avrunin O.G., Selivanova K.G., Tymkovych M.Y., Nosova Y.V.

Abstract. *Rehabilitation engineering is currently the most relevant area in Ukraine, requiring modern solutions and innovative technologies. The development of bionic limbs, automated systems for replacing lost human organs and functions can significantly improve the quality of life and accelerate the functional recovery of military and civilians. The growing need for rehabilitation solutions requires rapid adaptation of global achievements in the field of prosthetics and orthotics, in particular due to limited resources and the need to scale assistance. The purpose of this research work is to*

analyze the possibility of using the Flyshape software tool to create individualized 3D models of lower limb prostheses, as well as to demonstrate its potential. An important step for creating personalized prostheses is an accurate three-dimensional scan of the patient's stump, which allows taking into account its anatomical features, shape and size.

Keywords: *healthcare, medical information systems, prosthetics, orthotics, modeling, three-dimensional scanning, three-dimensional printing, artificial limbs*

REFERENCES

1. O. Korolovych, K. Selivanova, Y. Nosova and M. Tymkovych, "Physical Rehabilitation System of the Upper Extremities Muscle Dysfunction," 2024 IEEE 17th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET), Lviv, Ukraine, 2024, pp. 1-6, doi: 10.1109/TCSET64720.2024.10755903.
2. Tymkovych, M., Avrunin, O., Selivanova, K., Kolomiets, A., Bednarchyk, T., & Smailova, S. (2024). CORRESPONDENCE MATCHING IN 3D MODELS FOR 3D HAND FITTING. *Informatyka, Automatyka, Pomiary W Gospodarce I Ochronie Środowiska*, 14(1), 78–82. <https://doi.org/10.35784/iapgos.5498>
3. Korolovych O. S. Basic requirements for the process of physical rehabilitation of muscle dysfunction of the upper extremities / O. S. Korolovych, K. G. Selivanova // *Information technology: science, technology, technology, education, health: abstracts of the XXXII International Scientific and Practical Conference MicroCAD-2024*, May 22-25, 2024 - Kharkiv: NTU "KHPI." - P. 1342.
4. Integration of open educational resources for Ukrainian students: international experience and cooperation in crisis circumstances / A. Sokolov, K. Selivanova, Y. Nosova, A. Boyechko-Nemovcha // *Electricity, electromechanics and technologies in the agro-industrial complex: materials of the International scientific and practical conference*, November 6, 2024 - Kharkiv: State Biotechnology University, 2024. - P. 251-252.
5. Selivanova K. G. Using the capabilities of an intelligent robot to accelerate the process of physical rehabilitation of hands / K. G. Selivanova, O. G. Avrunin // *Current state and prospects of biomedical engineering: materials of the International scientific and practical conference dedicated to the 125th anniversary of the National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"*, December 13-14, 2023 - Kyiv : Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, 2023.

СПРОЩЕНА ІМІТАЦІЙНА МОДЕЛЬ РОЗІМКНЕНОЇ ЗА НАВАНТАЖЕННЯМ МЕРЕЖІ КОМУТАЦІЇ ПАКЕТІВ

Лабуткіна Т.В.

*Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара,
к.т.н., доцент, Україна*

Анотація. *Дослідження присвячено створенню спрощених імітаційних моделей мереж комутації пакетів, які зараз активно використовуються на Землі і реалізуються в супутникових системах. Пропонується подальший розвиток спрощеної імітаційної моделі розімкненої за навантаженням мережі комутації пакетів. Основними положеннями побудови імітаційної моделі є розподілення накопичувача вузла на рівні заповнення, визначення кількості непустих рівнів накопичувача як стану вузла, моделювання стану завантаження вузла як суперпозиції двох, зв'язаних через стани вузлів, процесів розмноження і загибелі (перший процес спричинений обміном мережі навантаженням з користувачами, а інший – проходженням транзитного навантаження через вузол мережі). Запропоновано підвищити адекватність моделі, розвинувши застосований раніше для замкненої за навантаженням мережі комутації пакетів підхід, згідно якому вихід транзитного навантаження моделюється для більшості вузлів з врахуванням їх функціонування з максимальною пропускну здатністю, а для групи слабо завантажених вузлів вводиться поправка корегування.*

Ключові слова: *мережа комутації пакетів, навантаження мережі, процеси розмноження і загибелі, імітаційна модель.*

На сьогодні імітаційне моделювання складних систем стає потужним інструментом дослідження, забезпечує сучасне проектування. Розвиток таких моделей іде, на сам перед, у напрямку підвищення точності відображення ними модельованого об'єкту (підвищується адекватність моделей за якісними і кількісними показниками). Але також представляє інтерес розвиток спрощених імітаційних моделей, які дозволяють суттєво зменшити час на визначення показників функціонування системи, яка створюється, а також можуть бути використані як додаткові («фонові») складові в імітаційних моделях комбінованої точності [1]. До складних технічних систем, які зараз активно вивчаються, належать сучасні мережі комутації пакетів, які активно використовуються на Землі і реалізуються на основі супутникових систем [2]. Дослідження присвячено створенню спрощених імітаційних моделей мереж

комутації пакетів. Зокрема, запропоновано розвиток імітаційних моделей мереж комутації пакетів (у тому числі – супутникових мереж комутації пакетів), представлених у роботах [1,3,4].

Пропонується спрощена імітаційна модель розімкненої за навантаженням мережі комутації пакетів, яка згідно положенням робіт [1,3,4] може бути формально описана так. У мережі N вузлів. Обсяг накопичувача кожного j -го вузла розподілений на N_u рівнів. Для кожного j -го вузла кількість q_j непустих рівнів накопичувача вважається його станом q_j (при цьому $(q_j - 1)$ рівнів заповнені, а рівень q_j заповнюється). Стан мережі на кожний поточний момент часу t визначається станами його вузлів q_j ($j = \overline{1, N}$). Зміна стану вузла моделюється як суперпозиція двох процесів розмноження і загибелі, зв'язок між якими забезпечує стан вузла. Перший процес обумовлений обміном мережі навантаженням з її користувачами. Перехід j -го вузла зі стану q_j до сусіднього стану більшого заповнення $(q_j + 1)$ внаслідок надходження в нього навантаження користувачів (зовнішнього навантаження) відбувається з параметром λ_{ebj} , а перехід до сусіднього стану меншого заповнення $(q_j - 1)$ внаслідок виходу навантаження до користувачів (виходу навантаження зовні) відбувається з параметром λ_{esj} . Другий процес обумовлений проходженням через вузол транзитного навантаження. Виходи j -го вузла зі стану q_j до сусідніх станів $(q_j + 1)$ або $(q_j - 1)$ спричинені обміном транзитним навантаженням із сусідніми вузлами, відбуваються відповідно із параметрами λ_{tbj} і λ_{tsj} . Обидва процеси розмноження і загибелі моделюються окремо, відповідно до значень їх параметрів. Але ці процеси зв'язані через поточні стани вузлів. Поточні значення параметрів λ_{tbj} і λ_{tsj} визначаються через стани вузлів мережі [3]. Параметри λ_{ebj} і λ_{tsj} у загальному випадку є функціями часу. Підхід до завдання $\lambda_{ebj}(t)$ і $\lambda_{tsj}(t)$ може бути різним. Зокрема, в роботі [3] представлено випадок, коли вузли мережі є космічними апаратами, мережа типологічно замкнена і врівноважена за навантаженням

(сума параметрів вхідного навантаження дорівнює сумі вихідного навантаження), але потоки навантаження прив'язані до ділянок безперервно покритої супутниковою системою території, і значення $\lambda_{ej}(t)$ і $\lambda_{tsj}(t)$ залежать від того, над якою територією знаходиться космічний апарат.

При моделюванні спрощено враховано керування доступом до ресурсів мережі. По-перше, враховується блокування доступу вхідного навантаження до вузла мережі: доступ вхідного навантаження до вузла можливий тільки якщо кількість заповнених рівнів накопичувача менше заданого критичного значення N_{um} , яке складає частку k_{mb} від максимальної кількості рівнів N_u , на які розподілений накопичувач

$$N_{um} = k_{mb} N_u.$$

По-друге, за визначеними правилами комплексно обмежується доступ за сумарною адресацією до j -го вузла. Згідно роботам [1,3,4] параметри потоків визначаються у кількості змін рівнів заповнення накопичувача в одиницю часу.

Моделювання навантаження в мережі засновано на тому, що все наявне у вузлі навантаження не залишається у вузлі, а виходить з нього (або зовні, або як транзитне). У роботах [1,3] підхід до моделювання передбачав функціонування вузла з максимальною пропускну здатністю. Таке припущення прийнятно при режимах високої завантаженості мережі. Але чим частіше випадки появи станів малої завантаженості вузлів або пустих вузлів, тим меншою є адекватність (і коректність) описаної моделі. Основною метою цього дослідження є покращити якісну і кількісну адекватність моделювання на основі представленого вище спрощеного підходу. Вирішення такої задачі запропоновано в роботі [4] для випадку замкненої за навантаженням мережі комутації пакетів. В даній роботі вирішення задачі представлено для розімкненої за навантаженням мережі комутації пакетів.

Нехай навантаження виходить з j -го вузла зовні (до користувачів) з параметром λ_{esj} , а λ_{tb} - параметр потоку, який відповідає максимальній пропускну здатності кожного вузла на вихід транзитного завантаження. В такому випадку, які і в роботі [4], сумарний потік R «надлишкового» в

імітаційній моделі транзитного навантаження, яке спричинено моделюванням з максимальним параметром λ_{tb} потоків вихідного транзитного навантаження з недовантажених вузлів, можна визначити формулою

$$R = \sum_{j=1}^N \lambda_{tbj} - N \lambda_{tb}. \quad (1)$$

Перший доданок формули (1) визначає параметр сумарного потоку транзитного навантаження, яке входить до вузлів мережі, а другий доданок – параметр сумарного потоку, який виходить з вузлів за прийнятою ідеалізацією. Тут значення R є від'ємною величиною. Як було запропоновано в роботі [4], для замкненої за навантаженням мережі значення R розкладається на поправки корегування, які додаються до N_e не повністю завантажених вузлів. Але у випадку замкненої за навантаженням мережі умова, яка визначає приналежність k -о вузла до цієї групи N_e вузлів, є іншою. Із врахуванням того, що параметри потоків виражені у кількості змін рівнів навантаження накопичувача у одиницю часу, умова для розімкненої за навантаженням мережі має вид

$$q_j \leq (\lambda_{tb} + \lambda_{esj}).$$

Таким чином, вузол є недовантаженим за транзитним навантаженням, коли поточна кількість q_j його не пустих рівнів менша за суму максимального значення параметра потоку λ_{tb} виходу транзитного навантаження і параметра потоку навантаження λ_{esj} , що виходить з вузла до користувачів. За аналогією з правилом, запропонованим для замкненої за навантаженням мережі в роботі [4], параметр транзитного навантаження, яке виходить з j -го вузла розімкненої за навантаженням мережі, визначається так

$$\lambda_{tsj} = \begin{cases} \lambda_{tb}, & \text{якщо } q_j > (\lambda_{tb} + \lambda_{esj}) \\ \lambda_{tb} + R / N_e, & \text{якщо } q_j \leq (\lambda_{tb} + \lambda_{esj}) \end{cases}.$$

Висновки. Запропонований підхід до підвищення точності моделювання забезпечує коректність моделі з точки зору уникнення «модельної втрати навантаження» («модельного утікання навантаження»). Але додавання рівних поправок також є не коректним прийомом, який значно повільніше (на декілька порядків), але буде призводити до якісного «спотворення»

результатів. При цьому на більш глобальному рівні коректність моделі забезпечена. Подальший розвиток запропонованого підходу спирається на застосування нерівномірного (адаптивного до стану системи) розподілу поправок корегування між групою вузлів, що недовантажені.

ЛІТЕРАТУРА

1. Ran Zhang, Jiang Liu, Tao Huang, Jiu Shao, Man Ouyang, Hua Lu Analysis on Requirements of Software-Defined Satellite Networking with FlowWise Real-Time Control. 3rd International Conference on Hot Information-Centric Networking 2020. DOI: 10.1109/HotICN50779.2020.9350815
2. Лабуткина Т.В., Тихонова А.А., Борщёва А.В., Косий Р.С., Лукашевич А.И. Имитационные модели спутниковой сети коммутации пакетов на основе комбинирования моделей разной точности. Системне проектування та аналіз характеристик аерокосмічної техніки. – 2015. Том XIX 2015. С. 98-113.
3. Лабуткина Т.В., Ларин В.А., Беликов В.В., Борщева А.В., Тихонова А.А., Деревяшкин Д.И. Имитационная модель спутниковой сети коммутации пакетов с разновысотными орбитальными сегментам. Научно-технический журнал «Радиоэлектронні і комп'ютерні системи». – 2016. № 1 (75). С. 66-83.
4. Лабуткіна Т.В. Спрощена імітаційна модель навантаження в замкненій мережікомутації пакетів. Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – 2024. № 4(153). С. 58 – 78. <https://doi.org/10.34185/1562-9945-4-153-2024-07>

SIMPLIFIED SIMULATION MODEL OF A LOAD-OPEN PACKET SWITCHING NETWORK

Tetiana Labutkina

Abstract. *The study is devoted to the creation of simplified simulation models of packet switching networks, which are currently actively used on Earth and implemented in satellite systems. Further development of a simplified simulation model of a load-open packet switching network is proposed. The main provisions of building a simulation model are the distribution of the node storage at the filling level, determining the number of non-empty storage levels as a node state, modeling the node load state as a superposition of two, connected through the node states, propagation and death processes (the first process is caused by the network exchange of load with users, and the other - by the passage of transit load through the network node). It is proposed to increase the adequacy of the model by developing the approach previously used for a load-closed packet switching network, according to which the transit load output is simulated for most nodes taking into account their operation with maximum throughput, and an adjustment correction is introduced for a group of lightly loaded nodes.*

Keywords: *packet switching network, network load, propagation and death processes, simulation model.*

REFERENCES

1. Labutkina T.V., Tihonova A.A., BorschYova A.V., Kosiy R.S., Lukashevich A.I. Imitatsionnyie modeli sputnikovoy seti kommutatsii paketov na osnove kombinirovaniya modeley raznoy tochnosti. Systemne proektuvannia ta analiz kharakterystyk aerokosmichnoi tekhniki. – 2015. Tom XIX. S. 98-113.
2. Ran Zhang, Jiang Liu, Tao Huang, Jiu Shao, Man Ouyang, Hua Lu Analysis on Requirements of Software-Defined Satellite Networking with FlowWise Real-Time Control. 3rd International Conference on Hot Information-Centric Networking 2020. DOI: 10.1109/HotICN50779.2020.9350815
3. Labutkina T.V., Larin V.A, Belikov V.V., Borscheva A.V., Tihonova A.A, Derevyashkin D.I. Imitatsionnaya model sputnikovoy seti kommutatsii paketov s raznovyisotnyimi orbitalnyimi segmentami. Naukovo-tekhnichnyi zhurnal «Radioelektronni i kompiuterni systemy». - 2016. S. 66-83.
4. Labutkina T.V. Sproshchena imitatsiina model navantazhennia v zamknenii merezhikomutatsii paketiv. Systemni tekhnolohii. Rehionalnyi mizhvuzivskyi zbirnyk naukovykh prats. – 2024. № 4(153). S. 58 – 78. <https://doi.org/10.34185/1562-9945-4-153-2024-07>

ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ДЛЯ ВИБОРУ МІСЦЯ РОЗТАШУВАННЯ СТАНЦІЙ СОНЯЧНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ В УКРАЇНІ

Мала Ю. А.¹, Селівьорстова Т. В.²

¹Університет митної справи та фінансів, к.т.н, доцент, Україна

²Український державний університет науки та технологій, к.т.н, доцент, Україна

Анотація. У статті розглянуто актуальність розвитку сонячної енергетики в Україні в контексті кліматичних змін, енергетичної безпеки та повоєнного відновлення. Особливу увагу приділено задачі вибору оптимального місця розташування сонячних електростанцій (СЕС) з урахуванням природних, соціально-економічних та екологічних факторів. Для обґрунтування рішень запропоновано використання методів багатокритеріального аналізу — АНР та TOPSIS. Проведено порівняння зазначених методів щодо їх доцільності застосування в задачах просторового планування. Визначено, що метод TOPSIS є ефективним при великій кількості альтернатив і наявності кількісних даних, тоді як АНР доцільний на етапі формування структури критеріїв. Також представлено сучасні інструменти для програмної реалізації обраних методів у середовищі Python, що дозволяють автоматизувати аналіз і візуалізацію результатів для ухвалення зважених рішень у сфері сталого розвитку енергетики.

Ключові слова: метод аналітичної ієрархії, метод TOPSIS, сонячна енергетика, місце розташування СЕС, бібліотеки Python.

В умовах глобальних викликів, пов'язаних зі зміною клімату, енергетичною безпекою та необхідністю скорочення викидів парникових газів, використання відновлюваних джерел енергії стало пріоритетом для більшості країн, зокрема і для України. Сонячна енергетика, як один із найдинамічніших сегментів відновлюваної енергетики, відіграє ключову роль у процесі зменшення викидів парникових газів і перехід до більш екологічно чистих джерел енергії та сталих практик, задля зменшення впливу антропогенної діяльності на зміну клімату енергосистеми. Україна має значний потенціал для розвитку сонячної енергетики завдяки сприятливим кліматичним умовам, зокрема високому рівню річної інсоляції у південних і центральних регіонах.

Однак, ефективне впровадження сонячної енергетики потребує стратегічного підходу до вибору місць розташування станцій. При цьому слід враховувати не лише природні фактори (інсоляцію, рельєф, наявність вільних

земель), а й соціально-економічні аспекти — близькість до енергетичної інфраструктури, доступ до транспортних шляхів, щільність населення, вплив на довкілля. Тому для прийняття зважених рішень у таких умовах доцільно застосовувати методи багатокритеріального прийняття рішень, які дозволяють об'єктивно оцінити та зіставити альтернативи з урахуванням різнотипових критеріїв.

Актуальність дослідження зростає і в контексті повоєнного відновлення України. Розвиток децентралізованої сонячної енергетики може забезпечити енергетичну незалежність громад, особливо у прифронтових та сільських регіонах, зменшити навантаження на центральну енергосистему та сприяти соціально-економічному зростанню регіонів. Вибір оптимального розташування станцій на основі методів багатокритеріального аналізу дозволить ефективно розпоряджатися ресурсами та формувати сталу енергетичну політику [1].

Вибір місця розташування сонячних електростанцій (СЕС) є критично важливою задачею в контексті сталого розвитку енергетики України. У світлі зростаючого попиту на чисту енергію, зменшення залежності від імпортованих джерел палива, а також урахування кліматичних зобов'язань, розвиток відновлюваної енергетики набуває стратегічного значення [2]. З огляду на географічні, економічні та соціальні особливості України, розміщення СЕС потребує глибокого аналізу великої кількості факторів — від рівня інсоляції до наявності інфраструктури та екологічної безпеки [3].

Невдалий вибір ділянки може призвести до зниження продуктивності електростанції, ускладнень у підключенні до мережі, юридичних конфліктів або незапланованих витрат. У свою чергу, врахування багатокритеріальних чинників дозволяє підвищити стійкість та ефективність реалізації проєктів, особливо в умовах територіальної неоднорідності України [3].

До ключових параметрів, які доцільно враховувати під час вибору місця розташування СЕС, відносять:

- **Кліматичні умови** (інсоляція, середньорічна температура, кількість похмурих днів);
- **Відстань до електромережі** (мінімізація витрат на підключення);

- **Наявність транспортної інфраструктури** (доступність ділянки для будівельних робіт);
- **Вартість та правовий статус землі** (землі енергетичного, промислового або сільськогосподарського призначення);
- **Геотехнічні характеристики** (рельєф, ризики ерозії, підтоплення);
- **Екологічні обмеження** (наявність природоохоронних територій);
- **Соціальні фактори** (ставлення місцевих громад, ризик протестів або конфліктів).

Багатокритеріальні методи прийняття рішень дозволяють оцінювати декілька альтернатив одночасно за багатьма критеріями з різною вагомістю. У задачі вибору місця для СЕС такі методи є незамінними, оскільки дають змогу системно враховувати фактори різної природи: від кількісних (інсоляція, відстань до ЛЕП) до якісних (підтримка населення, екологічна безпека).

Серед найпоширеніших методів багатокритеріального прийняття рішень є:

- **АНР (Analytic Hierarchy Process, метод аналітичної ієрархії)** — базується на попарному порівнянні критеріїв та альтернатив і побудові ієрархічної структури задачі.
- **TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution, Техніка впорядкування переваг за подібністю до ідеального рішення)** — дозволяє обчислити відстань кожної альтернативи до умовно найкращого та найгіршого варіанта.

Метод АНР, запропонований Т. Сааті [4, 5], дозволяє структурувати проблему у вигляді ієрархії та здійснювати парні порівняння між критеріями й альтернативами. Це особливо корисно на етапах формування критеріїв або коли ваги критеріїв повинні визначатися експертним шляхом. АНР забезпечує високий рівень пояснюваності результатів, а також дозволяє перевірити узгодженість суджень експертів. Однак, при великій кількості альтернатив (наприклад, десятках географічних локацій) метод потребує значного обсягу обчислень та є менш зручним [4].

Метод TOPSIS, розроблений Хвангом і Юном [3, 5], орієнтований на оцінювання альтернативи відносно найкращої та найгіршої з прийнятих точок. Цей метод дозволяє ефективно працювати з даним в реальному часі,

включаючи дані супутникового моніторингу (наприклад, дані щодо сонячної інсоляції чи відстані до підстанцій). У практичних кейсах з великою кількістю альтернатив метод TOPSIS демонструє вищу продуктивність і простоту реалізації, що підтверджується сучасними дослідженнями у сфері GIS-аналізу розміщення СЕС [3, 7, 8].

Таким чином, у випадках, коли головною метою є ефективне ранжування великої кількості потенційних локацій на основі доступних кількісних показників, метод TOPSIS є більш ефективним для практичного застосування. Натомість АНР доцільно використовувати на попередніх етапах, для побудови структури критеріїв та визначення їхніх ваг.

У процесі розв'язання задачі вибору оптимального місця розташування станцій сонячної енергетики особливу роль відіграє програмна реалізація методів багатокритеріального прийняття рішень. Для цього у середовищі Python існує низка ефективних інструментів і бібліотек, що дають змогу зменшити обсяг рутинної обробки даних і зосередитися на аналітичному аспекті задачі.

Для реалізації методу АНР існують такі інструменти: бібліотека Python *АНРу*, яка дозволяє будувати ієрархічні моделі, розраховувати ваги критеріїв, а також перевіряти індекс узгодженості (Consistency Ratio) також використовують бібліотеку *pyahp*, мова програмування R, Excel, пакет MATLAB [6].

Метод TOPSIS можна реалізовувати за допомогою таких інструментів: бібліотека Python *Scikit-Criteria* або *topsispy*, мова програмування R, пакет MATLAB [6].

Використовуючі мову програмування Python і відповідні бібліотеки для реалізації методів завдяки відкритості коду та інтеграції з бібліотеками візуалізації (*matplotlib*, *seaborn*, *plotly*), а також можливості обробки великих наборів геопросторових даних (у зв'язці з *geopandas*), ці бібліотеки дають змогу реалізовувати складні моделі вибору місця для СЕС, поєднуючи експертні оцінки та просторову інформацію [3]. Таким чином, використання спеціальних бібліотек Python дозволяє не лише забезпечити математичну обґрунтованість

прийняття рішень, а й вивести результати у вигляді наочних графіків, інтерактивних карт або рейтингових таблиць, що є критично важливим для планування розташування об'єктів альтернативної енергетики.

Висновки. При прийнятті рішення щодо вибору місця розташування станцій сонячної енергетики в Україні, де необхідно враховувати як кількісні показники (вартість, потенціал сонячного випромінювання, відстань до інфраструктури), так і якісні експертні оцінки (соціальний вплив, екологічні ризики), метод TOPSIS є найбільш збалансованим варіантом. Він поєднує простоту реалізації, можливість врахування кількісних даних, а також добре масштабується для великої кількості альтернатив. Метод АНР доцільно використовувати на етапі формування ієрархії критеріїв або коли доступна невелика кількість альтернатив і важливі суб'єктивні експертні оцінки.

ЛІТЕРАТУРА

1. Doronina I., Galleguillos-Torres M., Doronin V., Grêt-Regamey A. GIS-based Analysis for Identifying Priority Regions and Developing Renewable Energy in Post-war Ukraine. *Renewable Energy*. 2025. Vol. 247. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2025.122970>.
2. Cahill Ben, Dawes Allegra. Developing Renewable Energy in Ukraine. Center for Strategic and International Studies (CSIS). 2022. <https://www.csis.org/analysis/developing-renewable-energy-ukraine>. (дата звернення: 10.04.2025).
3. Drozd Sofiia, Kussul Nataliia. Solar energy potential mapping in Ukraine through integration of GIS, remote sensing, and fuzzy logic. *European journal of remote sensing*. 2024. Vol. 57, no. 1. <https://doi.org/10.1080/22797254.2024.2362390>
4. Saaty T.L. Decision Making with the Analytic Hierarchy Process. *Int. J. Services Sciences*, 2008. Vol. 1(1). pp. 83–98.
5. Dimitra G. Vagona. Comparative Multicriteria Analysis Methods for Ranking Sites for Solar Farm Deployment: A Case Study in Greece. *Energies*. 2021. Vol. 14. <https://doi.org/10.3390/en14248371>
6. Azhar N. A., Radzi N. A. M., Wan Ahmad W. S. H. M..Multi-Criteria Decision Making: A Systematic Review. *Recent Advances in Electrical & Electronic Engineering*. 2021. Vol. 14. pp. 779-801. <https://doi.org/10.2174/2352096514666211029112443>
7. Kengpol A., Rontlaong P., Tuominen M. A Decision Support System for Selection of Solar Power Plant Locations by Applying Fuzzy AHP and TOPSIS: An Empirical Study. *Journal of Software Engineering and Applications*. 2013. Vol. 6. pp. 470-481. <http://dx.doi.org/10.4236/jsea.2013.69057>
8. Hassan Imad, Alhamrouni Ibrahim, Azhan Nurul Hanis. A CRITIC–TOPSIS Multi-Criteria Decision-Making Approach for Optimum Site Selection for Solar PV Farm. *Energies*. 2023. Vol. 16. <http://dx.doi.org/10.3390/en16104245>.

APPLICATION OF DECISION-MAKING METHODS FOR SITUATION OF SOLAR POWER STATIONS IN UKRAINE

Yuliia Mala, Tatyana Selivorstova

Abstract. *The article considers the relevance of solar energy development in Ukraine in the context of climate change, energy security and post-war recovery. Particular attention is paid to the task of choosing the optimal location of solar power plants (SPP), taking into account natural, socio-economic and environmental factors. To substantiate the decisions, the use of multicriteria analysis methods - AHP and TOPSIS - is proposed. A comparison of these methods has been carried out in terms of their feasibility in spatial planning tasks. It has been determined that the TOPSIS method is effective when there are a large number of alternatives and quantitative data, while the AHP is appropriate at the stage of forming the structure of criteria. The article also presents modern tools for the software implementation of the selected methods in the Python environment, which allow automating the analysis and visualisation of results for making informed decisions in the field of sustainable energy development.*

Keywords: *analytical hierarchy method, TOPSIS method, solar energy, location of SPP, Python libraries.*

REFERENCE

1. Doronina I., Galleguillos-Torres M., Doronin V., Grêt-Regamey A. GIS-based Analysis for Identifying Priority Regions and Developing Renewable Energy in Post-war Ukraine. *Renewable Energy*. 2025. Vol. 247. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2025.122970>.
2. Cahill Ben, Dawes Allegra. Developing Renewable Energy in Ukraine. Center for Strategic and International Studies (CSIS). 2022. <https://www.csis.org/analysis/developing-renewable-energy-ukraine>. (дата звернення: 10.04.2025).
3. Drozd Sofiia, Kussul Nataliia. Solar energy potential mapping in Ukraine through integration of GIS, remote sensing, and fuzzy logic. *European journal of remote sensing*. 2024. Vol. 57, no. 1. <https://doi.org/10.1080/22797254.2024.2362390>
4. Saaty T.L. Decision Making with the Analytic Hierarchy Process. *Int. J. Services Sciences*, 2008. Vol. 1(1). pp. 83–98.
5. Dimitra G. Vagona. Comparative Multicriteria Analysis Methods for Ranking Sites for Solar Farm Deployment: A Case Study in Greece. *Energies*. 2021. Vol. 14. <https://doi.org/10.3390/en14248371>
6. Azhar N. A., Radzi N. A. M., Wan Ahmad W. S. H. M..Multi-Criteria Decision Making: A Systematic Review. *Recent Advances in Electrical & Electronic Engineering*. 2021. Vol. 14. pp. 779-801. <https://doi.org/10.2174/2352096514666211029112443>
7. Kengpol A., Rontlaong P., Tuominen M. A Decision Support System for Selection of Solar Power Plant Locations by Applying Fuzzy AHP and TOPSIS: An Empirical Study. *Journal of Software Engineering and Applications*. 2013. Vol. 6. pp. 470-481. <http://dx.doi.org/10.4236/jsea.2013.69057>
8. Hassan Imad, Alhamrouni Ibrahim, Azhan Nurul Hanis. A CRITIC–TOPSIS Multi-Criteria Decision-Making Approach for Optimum Site Selection for Solar PV Farm. *Energies*. 2023. Vol. 16. <http://dx.doi.org/10.3390/en16104245>.

ANALYSIS OF CAUSES AND CONSEQUENCES OF VOLTAGE SAGS IN INDUSTRIAL POWER SUPPLY SYSTEMS

Pilipenko Viacheslav

Lead Specialist of the R&D Department at Playtika Holding Corp, Dnipro, Ukraine

Abstract. *The article analyzes the main causes and consequences of voltage sags in industrial power supply systems. The study highlights the most typical sources of voltage disturbances, such as motor starting, short circuits, load changes, and equipment failures. The direct and indirect effects of voltage sags on industrial processes and equipment reliability are examined. Technical solutions for preventing and minimizing voltage sags, including the use of soft starters, frequency converters, reactive power compensation, and proper network design, are discussed. A systematic approach to monitoring and analyzing power quality parameters is proposed to enhance the resilience and efficiency of industrial enterprises.*

Keywords: *Voltage sag, industrial power systems, power quality, soft starters, frequency converters, short circuits, reactive power compensation, energy efficiency, equipment reliability, network design.*

Introduction. Voltage sags in industrial networks are among the most common types of power quality disturbances, significantly impacting the stability of electrical systems and the economic performance of enterprises. A voltage sag is generally understood as a short-term reduction of the root mean square voltage value to between 10% and 90% of its nominal level, lasting from a few milliseconds up to several seconds. The frequency of occurrence, duration, and amplitude of voltage sags depend directly both on the internal operating conditions of the enterprise's network and on the parameters of external power supply systems.

Research results. One of the main causes of voltage sags is the starting of powerful asynchronous motors, particularly those not equipped with soft-start systems. The starting current of such motors can exceed the nominal current by several times, immediately causing a significant voltage drop in the local network and, depending on the configuration of the electrical system, even affecting neighboring consumption areas. The simultaneous starting of several large consumers further complicates the situation, causing deeper and prolonged sags. These phenomena are particularly critical in systems with insufficient short-circuit

capacity, where the network is unable to effectively compensate for such current impulses.

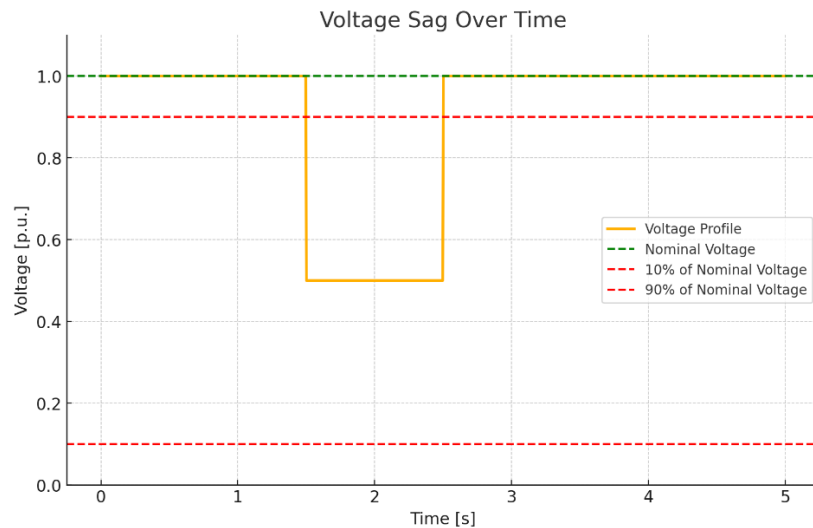


Figure 1 - Voltage Sag Profile During Short-Term Disturbance

Another common cause is short circuits in networks, even if they are transient or quickly eliminated by automatic disconnection devices. During a short circuit, a sharp increase in current occurs, accompanied by a voltage drop over a wide area of the electrical network. The consequences of such events depend on the distance to the fault location, the structure of the system, and its operating mode. It is worth noting that even a short-duration short circuit lasting only fractions of a second can cause a voltage sag capable of disabling sensitive equipment.

Load changes also frequently lead to voltage sags. The sudden connection of a powerful consumer or a sharp increase in the consumption of active or reactive power in an industrial system disturbs the balance of the network, resulting in a decrease in voltage levels. This phenomenon is particularly typical for enterprises with a large number of electrothermal devices, where switching on furnaces or heaters leads to a steep rise in load.

Emergency situations related to the failure of power network elements, such as damage to transformers, cable lines, or automatic circuit breakers, can also cause significant voltage sags. Such events are usually accompanied by deeper and longer-lasting disturbances in power quality parameters.

The consequences of voltage sags are diverse in nature and have both direct and indirect effects. The direct impact is seen in the malfunctioning of electronic

devices, computer systems, automation, and control systems, all of which require stable voltage to maintain normal operation. Even short-term voltage drops can cause device reboots, disruption of technological processes, data loss in computer systems, and control algorithm failures.

Industrial equipment such as ventilation systems, compressors, and pumps operating in continuous mode is also vulnerable to voltage sags. In the event of a voltage reduction, overload protections may activate, equipment may switch to emergency modes, or mechanical failures may occur due to loss of rotational stability.

Indirect consequences of voltage sags manifest through increased production losses, a rise in the amount of defective products, and higher costs for maintenance and repair of equipment. These consequences are particularly serious in industries with continuous technological processes, where even a brief shutdown may require a long time to restart and stabilize parameters.

From a technical perspective, repeated voltage sags contribute to premature wear of electrical equipment. Frequent short-term reductions in voltage create additional thermal and mechanical stresses on motors, power supplies, and electronic control systems. In the long term, this reduces the reliability of equipment and accelerates its physical aging.

Given the potentially serious consequences of voltage sags, enterprises implement measures for their prevention and minimization. One of the most effective methods is the use of soft starters and frequency converters for electric motors, which help limit starting currents.

SOFT STARTERS AND FREQUENCY CONVERTERS FOR ELECTRIC MOTORS

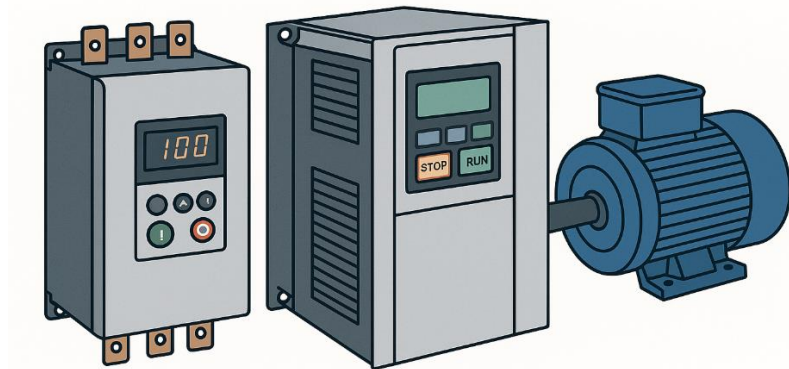


Figure 2 - Soft starters and frequency converters for electric motors

Reactive power compensation systems assist in stabilizing voltage levels under varying loads. Uninterruptible power supplies (UPS) for critical systems ensure the functionality of electronics during short-term voltage disturbances.

Equally important is the proper planning of electrical network architecture, considering possible emergency operating modes. Designing with sufficient power reserves, applying automatic transfer switches to backup power sources, correctly sizing transformers, and network sectioning all contribute to enhancing the resilience of the system against voltage sags.

For a systematic assessment of the problem, it is necessary to implement power quality monitoring systems capable of recording short-term events and accumulating statistical data. Data analysis makes it possible to identify typical sag scenarios, evaluate their depth, duration, and frequency, and detect the most vulnerable points in the power supply system, thus enabling the development of well-grounded solutions for system improvement.

Conclusion. In conclusion, it can be stated that the causes of voltage sags are multifactorial and may be associated with both internal characteristics of enterprises and external influences. The consequences of these phenomena affect not only the technical condition of equipment but also have a direct impact on production economic indicators. Therefore, minimizing the frequency and duration of voltage sags is a crucial component of the overall strategy to enhance the reliability of power supply and the efficiency of industrial enterprises.

REFERENCES

1. S. Arias-Guzman et al., "Analysis of voltage sag severity case study in an industrial circuit," 2015 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, Addison, TX, USA, 2015, pp. 1-6, doi: 10.1109/IAS.2015.7356932.
2. "IEEE Draft Guide for Economic Loss Evaluation of Sensitive Industrial Customers Caused by Voltage Sags," in IEEE P2938/D3.2, July 2022, vol., no., pp.1-71, 28 Sept. 2022.

АНАЛІЗ ПРИЧИН І НАСЛІДКІВ ПРОСАДОК НАПРУГИ В СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПРОМИСЛОВИХ ОБ'ЄКТІВ

Піліпенко В. О.

Анотація. У статті проаналізовано основні причини та наслідки просадок напруги в системах електропостачання промислових об'єктів. У дослідженні висвітлено найбільш типові джерела порушень напруги, такі як пуски двигунів, короткі замикання, зміни навантаження та відмови обладнання. Розглянуто прямі та опосередковані наслідки просадок напруги для промислових процесів та надійності обладнання. Обговорено технічні рішення для запобігання та мінімізації просадок, зокрема застосування пристроїв плавного пуску, перетворювачів частоти, компенсації реактивної потужності та правильного проєктування мережі. Запропоновано системний підхід до моніторингу та аналізу параметрів якості електроенергії для підвищення стійкості та ефективності роботи промислових підприємств.

Ключові слова: просадка напруги, промислові енергосистеми, якість електроенергії, пристрої плавного пуску, перетворювачі частоти, короткі замикання, компенсація реактивної потужності, енергоефективність, надійність обладнання, проєктування мереж.

INFLUENCE OF HIGHER HARMONICS ON POWER QUALITY IN INDUSTRIAL ELECTRICAL NETWORKS

Oleksandr Verovkin

Public joint stock company "Dniprovazhmash", Dnipro, Ukraine

Abstract. *This article examines the influence of higher harmonics on the power quality in industrial electrical networks. It highlights the causes of harmonic distortion, the types of nonlinear loads that generate harmonics, and the wide range of negative effects on energy efficiency, equipment performance, and industrial processes. Key issues such as energy losses, equipment overheating, malfunctioning of protective devices, and inaccuracies in metering systems are analyzed. The study emphasizes the importance of monitoring Total Harmonic Distortion (THD) levels according to international standards like IEEE 519-2014 and IEC 61000-4-7. Effective mitigation strategies, including the use of active and passive harmonic filters, proper network design, and continuous power quality monitoring, are discussed. A systematic and dynamic approach to managing harmonic distortion is identified as essential for maintaining energy efficiency, equipment reliability, and the stability of industrial production.*

Keywords: *Higher harmonics, power quality, industrial electrical networks, harmonic distortion, Total Harmonic Distortion (THD), active filters, passive filters, energy efficiency, equipment reliability, power monitoring, IEEE 519-2014, IEC 61000-4-7.*

Introduction. In the context of modern industry, power quality has become a critical factor that determines the reliability of equipment operation, the efficiency of production processes, and the economic viability of energy systems' operation. One of the most significant factors influencing power quality is the presence of higher harmonics in industrial electrical networks. Harmonics arise as a result of nonlinear processes occurring during the interaction of electrical current and voltage with various system elements, posing a serious threat to the stability and longevity of electrical equipment.

Research results. Higher harmonics are components of an electrical signal whose frequencies are integer multiples of the fundamental network frequency, typically 50 or 60 Hz. Nonlinear loads such as variable frequency drives (VFDs), switched-mode power supplies, electric furnaces, welding equipment, and lighting systems based on LED technologies actively generate harmonic distortions. The

presence of higher harmonics alters the ideal sinusoidal waveform of voltage and current, leading to various undesirable physical and economic consequences.

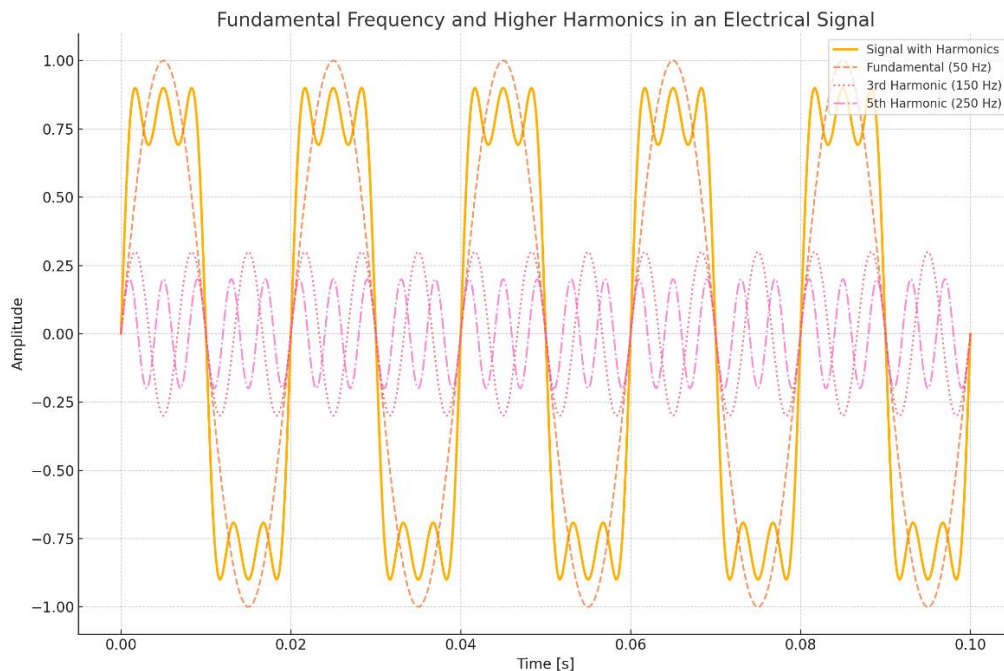


Figure 1 - Fundamental Waveform and Higher Harmonic Components in an Electrical Signal

One of the main negative effects of higher harmonics is the increase in energy losses within elements of the power supply system. Harmonic currents cause additional heating of cable lines, transformers, and electric motors due to the increased effective resistance of conductors at higher frequencies. Consequently, energy consumption increases without delivering useful work, leading to a decrease in the overall energy efficiency of industrial enterprises. In heavily loaded networks, these additional losses can reach substantial levels, necessitating increased cooling capacity and resulting in accelerated equipment aging.

Another serious consequence is the adverse impact of harmonics on the operation of protective devices. Many protection devices, such as circuit breakers and relay systems, are designed to operate with pure sinusoidal currents. The presence of harmonics can lead to the malfunctioning of these devices, reducing their sensitivity or, conversely, causing false tripping, which increases the risk of accidents and unplanned downtime in industrial electrical networks.

Higher harmonics also have a direct negative impact on the operation of electric motors, causing overheating of windings, reduction of torque, increased mechanical vibrations, and, over time, accelerated wear of motor components. In

continuous production processes, where equipment reliability is paramount, the degradation caused by harmonics can result in significant production losses and increased maintenance costs. Motors subjected to continuous harmonic stress tend to have shorter lifespans and require more frequent repairs or replacements, affecting overall productivity and profitability.

The influence of harmonics extends to the accuracy of metering and control devices. Instruments used for energy monitoring and control may provide incorrect readings when operating in distorted conditions, leading to inaccurate energy audits and making it difficult to implement effective energy management strategies. This misrepresentation of power parameters can hinder efforts to optimize energy use, detect inefficiencies, and achieve operational excellence.

To assess the level of harmonic distortion, the Total Harmonic Distortion (THD) index is used, which measures the ratio of the sum of the powers of all harmonic components to the power of the fundamental frequency. International standards such as IEEE 519-2014 and IEC 61000-4-7 establish permissible THD levels for different classes of networks and loads, setting benchmarks for the acceptable quality of supplied electricity and encouraging enterprises to monitor and control these parameters systematically.

In response to the threat posed by harmonic distortions in industrial electrical networks, a range of technical solutions has been developed and implemented. One of the most effective methods is the installation of active and passive harmonic filters. Passive filters are typically tuned to specific harmonic frequencies and provide effective attenuation at those points. Active harmonic filters, on the other hand, dynamically analyze the harmonic content and inject compensating currents in real-time, offering superior flexibility and effectiveness, especially in dynamic industrial environments with frequently changing loads.

Additional measures include the proper design and layout of electrical networks, taking into account the need to minimize the impact of nonlinear loads. This includes distributing loads evenly across phases, grouping harmonic-generating loads separately, and applying network segmentation strategies. Using isolation

transformers for critical equipment and applying phase-shifting transformers are also recognized practices for mitigating harmonic propagation.

Constant monitoring of power quality parameters is another vital component in combating harmonic issues. Advanced power quality analyzers can record voltage and current waveforms in high resolution, enabling the identification of harmonic issues, flicker, voltage sags, and other disturbances before they escalate into serious problems. Historical data collected through monitoring allows for trend analysis, predictive maintenance, and the timely implementation of corrective actions.

It is important to emphasize that addressing harmonic distortion is not a one-time project but a continuous process. As production technologies evolve and new equipment is integrated into industrial systems, the harmonic profile of electrical networks changes, requiring ongoing adaptation of mitigation measures. Implementing a holistic strategy that combines real-time monitoring, advanced filtering technologies, network optimization, and periodic reassessment is key to ensuring long-term electrical system stability.

Thus, the influence of higher harmonics on the power quality in industrial electrical networks represents a complex, multifaceted challenge that demands systematic detection, thorough analysis, and effective mitigation. The use of modern diagnostic tools, advanced filtering technologies, and strategic network management practices allows enterprises to significantly enhance energy efficiency, prolong the lifespan of critical equipment, and ensure the uninterrupted operation of production processes in the highly competitive environment of modern industry.

REFERENCES

1. IEEE Standards Association. IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems (IEEE Std 519-2014). IEEE, 2014. Available at: <https://standards.ieee.org/ieee/519/3710>
2. Gueye, A. Kebe and M. Diop, "Design of a Domestic Controlled Voltage Stabilizer," *2021 56th International Universities Power Engineering Conference (UPEC)*, Middlesbrough, United Kingdom, 2021, pp. 1-6, doi: 10.1109/UPEC50034.2021.9548231.
3. D. Thomas, K. J. Mathews, L. Thomas, G. S. Babu and S. Saji Kurian, "Automatic Voltage Stabilizer using a PWM controlled AC-AC converter topology," *2022 Third International Conference on Intelligent Computing Instrumentation and Control Technologies (ICICICT)*, Kannur, India, 2022, pp. 51-58, doi: 10.1109/ICICICT54557.2022.9917668.

ВПЛИВ ВИЩИХ ГАРМОНІК НА ЯКІСТЬ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В ПРОМИСЛОВИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ

Верьовкін Олександр

Анотація. У статті розглядається вплив вищих гармонік на якість електроенергії в промислових електричних мережах. Проаналізовано причини виникнення гармонічних спотворень, типи нелінійних навантажень, які генерують гармоніки, а також широкий спектр негативних наслідків для енергоефективності, роботи обладнання та виробничих процесів. Розглянуто основні проблеми, такі як втрати енергії, перегрів обладнання, некоректна робота захисних пристроїв і неточності в роботі вимірювальних систем. У дослідженні підкреслюється важливість моніторингу рівня повного гармонічного спотворення (THD) відповідно до міжнародних стандартів, таких як IEEE 519-2014 та IEC 61000-4-7. Обговорюються ефективні стратегії зменшення впливу гармонік, зокрема використання активних та пасивних фільтрів, правильне проектування мережі та постійний моніторинг якості електроенергії. Визначено, що системний та динамічний підхід до управління гармонічними спотвореннями є необхідним для підтримання енергоефективності, надійності обладнання та стабільності промислового виробництва.

Ключові слова: Вищі гармоніки, якість електроенергії, промислові електричні мережі, гармонічні спотворення, повне гармонічне спотворення (THD), активні фільтри, пасивні фільтри, енергоефективність, надійність обладнання, моніторинг електроенергії, IEEE 519-2014, IEC 61000-4-7.

СЕКЦІЯ 4

**ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ ІНФОРМАЦІЙНО-УПРАВЛЯЮЧІ СИСТЕМИ ТА
ПРОБЛЕМИ ІНФОРМАЦІЙНОЇ БЕЗПЕКИ**

SECTION 4

**INTELLIGENT INFORMATION MANAGEMENT SYSTEMS
AND INFORMATION SECURITY ISSUES**

DOI: 10.34185/1991-7848.itmm.2025.01.087

ДОСЛІДЖЕННЯ АЛГОРИТМІВ УПРАВЛІННЯ КОНКУРЕНТНИМ ДОСТУПОМ ТА УНИКНЕННЯ КОЛІЗІЙ У БЛОКЧЕЙН-МЕРЕЖАХ

Швачич Г.Г.¹, Битько А.М.²

¹НТУ «Дніпровська політехніка», д.т.н., професор, Україна

²НТУ «Дніпровська політехніка», Україна

Анотація. У роботі представлено системний аналіз технології блокчейн та особливості її застосування, розглянута внутрішня логіка (шифрування, консенсус). Розглядається дослідження конкурентного доступу та уникнення колізій при функціонуванні технології блокчейн. Зазначене суттєво впливає на її продуктивність, масштабованість та надійність, що є ключовими факторами для успішного впровадження цієї технології в різних сферах. Аналізується одна з основних проблем блокчейна щодо забезпечення достовірності даних, яка вимагає використання ефективних алгоритмів шифрування. Ці алгоритми повинні забезпечувати високу криптографічну стійкість інформації в мережі, підтримувати реалізацію цифрового підпису та гарантувати безпеку транзакцій. Також розглянуто спеціальні алгоритми управління конкурентним доступом і уникнення колізій у блокчейн-мережах, що сприяють підвищенню ефективності їх роботи.

Ключові слова: колізії, доступ, блокчейн-мережі, хеш, достовірність даних, шифрування, дешифрування, алгоритми, мережа.

Вступ. Як і будь-яка інноваційна технологія, блокчейн має низку задач, які необхідно розв'язати для його повномасштабного впровадження. Однією з найважливіших є проблема децентралізованого зберігання даних. Якщо в кожному вузлів мережі зберігати повний реєстр даних, то можна відновити мережу навіть після видалення останнього вузла. Однак, слід враховувати, що мережа постійно зростає, що призводить до неконтрольованих обсягів даних. Крім того, для приєднання нового учасника до мережі необхідно синхронізувати величезну кількість даних [1, 2]. Це пов'язано з необхідністю завантаження всієї історії транзакцій, щоб новий вузол міг повністю інтегруватися в мережу і забезпечити її цілісність. Як варіант вирішення цієї проблеми, можна використовувати стандартну базу даних (БД), де зберігаються реальні дані в зашифрованому вигляді, а в блокчейн заносяться лише їхні хеші.

Застарілі блоки при цьому архівуються. Це може бути локальним рішенням зазначеної проблеми.

З огляду на зазначене, можна припустити, що для розв'язування цих задач можна використовувати методи з таких технологій, як Big Data [3, 4]. Вона також орієнтована на роботу з великими обсягами зберігання та обробки даних. Крім того, цей підхід вже відпрацьований у різних архітектурах: Map Reduce, Shared Memory, Shared Nothing, Shared Disk, тощо. Основною перешкодою для інтеграції інструментів Big Data у блокчейн є тип системи: блокчейн є децентралізованою, розподіленою системою, що означає, що обчислення розподіляються між кількома вузлами і відсутні вузли, які керують роботою інших вузлів мережі. Однак тут можна розглянути інший підхід. При цьому слід враховувати, що технічно блокчейн є простою базою даних з істотною масштабованістю і відсутністю мов запитів. Проте децентралізованість, незмінність, прозорість і можливість універсального обміну даними компенсують ці недоліки. У зв'язку з цим нині ведуться розробки технологій BigchainDB і IPDB, які можуть стати базами даних глобального масштабу з децентралізованим управлінням.

Ще однією важливою задачею є забезпечення довіри до системи, яка має бути одночасно анонімною і прозорою для її учасників. Користувачі хочуть бачити рух даних у мережі, але при цьому інші користувачі не повинні знати, чим займаються вони. Для цього було вирішено застосувати алгоритми асиметричного шифрування, завдяки чому кожен користувач має пару ключів: приватний і публічний. Приватний ключ використовується для підпису блоків, що відправляються користувачем, а адреса користувача в мережі відображається за допомогою публічного ключа.

Однією з головних проблем блокчейну є достовірність даних, що визначає необхідність застосування ефективних алгоритмів шифрування. Вони повинні гарантувати достатню криптографічну стійкість інформації в мережі, а також дозволяти реалізувати цифровий підпис [5]. У зв'язку з цим розглянемо спеціальні алгоритми конкурентного доступу та вирішення колізій у мережі.

Основний матеріал досліджень. Спеціальні алгоритми конкурентного доступу та вирішення колізій в мережах блокчейн спрямовані на забезпечення ефективного обміну даними між блоками, які спільно використовують один канал передачі. Конкурентний доступ означає, що декілька пристроїв можуть одночасно намагатися передавати дані, що може призвести до конфліктів або колізій. Для мінімізації таких проблем використовуються різні алгоритми.

Нині застосовуються наступні спеціальні алгоритми конкурентного доступу і дозволу колізій в мережі:

– PBFT – запит на додавання блоку розсилається усім учасникам, і усі роблять обчислення хэша наступного блоку, після чого розсилають своє рішення іншим учасникам. У результаті кожен учасник отримує масив відповідей і приймає відповідь із загальною довірчою ймовірністю 0,5. Недолік алгоритму – час виконання транзакції збільшується залежно від розміру мережі.

– PoW – вузли мережі (майнери) розв’язують задачу з обчислення хешу наступного блоку з певною умовою. При цьому хто швидше порахує хеш, того блок і буде наступним. Недолік алгоритму – енергоємність через складності обчислень і присутність деякої централізації – майнерів.

– PoS – альтернатива PoW, алгоритм не вимагає великих обчислювальних потужностей: учасники мережі мають внутрішню системну валюту, і хто багатіший, той має пріоритет для формування блоку.

– Деякі додаткові ресурсу (Burn, Space, Bandwidth) – є різновидами PoW і PoS.

Ці алгоритми використовуються в залежності від типу мережі, вимог до швидкості передачі даних, надійності та масштабованості.

Аналіз логічної моделі «достовірності» технології блокчейн на основі асиметричного алгоритму шифрування RSA. Розглянемо алгоритм роботи асиметричного шифрування RSA [6].

На першому етапі обираються два прості числа p і q . Далі на основі співвідношень:

$$n = q \cdot p, \quad (1)$$

$$\varphi(n) = \varphi(pq) = (p-1)(q-1) \quad (2)$$

знаходять модуль для відкритого та закритого ключа і функцію Ейлера від модуля (2). Потім обирається ціле число e (відкрита експонента) від 1 до $\varphi(n)$ (взаємно просте з $\varphi(n)$). Зазвичай в якості e беруть прості числа, що містять невелику кількість одиничних біт в двійковому записі, але не занадто малі, для швидкого піднесення до ступеня.

Далі знаходиться число d , що відповідає формулі (3) :

$$d \cdot e \bmod \varphi(n) = 1. \quad (3)$$

Таким чином формується приватний ключ $\{d, n\}$ і публічний ключ $\{e, n\}$, за допомогою яких робиться шифрування:

$$c = m^e \cdot \bmod n, \quad (4)$$

і дешифрування

$$m = c^d \cdot \bmod n = c = m^{ed} \cdot \bmod n = m \cdot \bmod n = m, \quad (5)$$

даних.

При цьому $m < n$, c – шифровані дані, m – нешифровані дані, $\bmod \varphi(n)$ – множина значень (чим більше, тим краще).

При спробі ж зламати (підібрати) закритий ключ доведеться перебрати 2^N комбінацій, де N – довжина ключа. Наприклад, при довжині ключа в 256 біт і швидкості підбору паролів 1024 в секунду знадобиться $1,23e + 67$ років, що дуже і дуже багато, та і інформація на той час буде вже не актуальна.

Також можна використовувати і прогресивніші алгоритми, такі як Elliptic Curve Digital Signature Algorithm (ECDSA), які працюють схожим чином, але мають свої особливості.

Висновки. Перехід від екстенсивного до інтенсивного розвитку призводить до зменшення кількості вільних ніш, що, у свою чергу, вимагає співпраці серед багатьох раніше незалежних людей і організацій. Кожна з них має свою базу даних та інфраструктуру, що часто спричиняє неточності та невідповідність інформації. У світі, де ціна помилки перевищує вартість системи, необхідні технології, здатні управляти витратами, знижувати їх, забезпечувати ефективний обмін даними і мінімізувати помилки, що значною мірою досягається завдяки технології блокчейн.

У роботі представлено системний аналіз технології блокчейн та особливості її застосування, розглянута внутрішня логіка (шифрування, консенсус).

Перспективи впровадження блокчейн-технології є значними. Вона застосовується не тільки для реалізації традиційних розподілених фінансово-економічних систем, але й у рамках корпоративних інформаційних систем, що супроводжують життєвий цикл виробів, зокрема при впровадженні синхронних технологій проектування як розподіленої облікової книги записів. Такий підхід дозволяє забезпечити синхронізацію проектних дій між розподіленими командами розробників та виробничими процесами.

ЛІТЕРАТУРА

1. Agbo C. C., Mahmoud Q. H., Eklund, J. M. Blockchain technology in healthcare: a systematic review. Healthcare. 2020. 7(2), 56.
2. Attaran, M. Blockchain technology in healthcare: Challenges and opportunities. International Journal of Healthcare Management. 2022. 15(1). P. 70 – 83.
3. Zgurovsky M.Z., Zaychenko Y.P. Big Data: Conceptual Analysis and Applications. Springer, 2020. – 298 p.
4. Thomas Erl. Big Data Fundamentals. Concepts, Drivers & Techniques. — Prentice Hall, 2016. – 235 p.
5. Гринович А.А., Пухальська Г.В. Електронний цифровий підпис: особливості застосування, переваги та проблеми. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: http://journals.khnu.km.ua/vestnik/pdf/ekon/2009_2/zmist.files/05.pdf
6. Алгоритм шифрування RSA, види атак на нього. Реалізація мовою Python. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: https://dou.ua/forums/topic/43026/?utm_source=chatgpt.com

RESEARCH ON ALGORITHMS FOR MANAGING COMPETITIVE ACCESS AND AVOIDING COLLISIONS IN BLOCKCHAIN NETWORKS

Hennadi Shvachych, Andrii Bytko

Abstract. *The paper presents a systematic analysis of blockchain technology and its application features, examining the internal logic (encryption, consensus). The research focuses on competitive access and collision avoidance in the operation of blockchain technology. These aspects significantly influence its performance, scalability, and reliability, which are critical factors for the successful adoption of this technology in various fields. The study addresses one of the main issues of blockchain—ensuring data integrity, which requires the use of efficient encryption algorithms. These algorithms must provide high cryptographic security of information within the network, support digital signature implementation, and ensure transaction security. Additionally, the paper explores specialized algorithms for managing competitive access and avoiding collisions in blockchain networks, contributing to their operational efficiency.*

Keywords: *collisions, access, blockchain networks, hash, data integrity, encryption, decryption, algorithms, network.*

REFERENCE

1. Agbo C. C., Mahmoud Q. H., Eklund, J. M. Blockchain technology in healthcare: a systematic review. *Healthcare*. 2020. 7(2), 56.
2. Attaran, M. Blockchain technology in healthcare: Challenges and opportunities. *International Journal of Healthcare Management*. 2022. 15(1). P. 70 – 83.
3. Zgurovsky M.Z., Zaychenko Y.P. *Big Data: Conceptual Analysis and Applications*. Springer, 2020. – 298 p.
4. Thomas Erl. *Big Data Fundamentals. Concepts, Drivers & Techniques*. — Prentice Hall, 2016. – 235 p.
5. Hrynovych A.A., Pukhalska H.V. Elektronnyi tsyfrovyy pidpys: osoblyvosti zastosuvannia, perevahy ta problemy. – [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu do resursu: http://journals.khnu.km.ua/vestnik/pdf/ekon/2009_2/zmist.files/05.pdf
6. Alhorytm shyfruvannia RSA, vydy atak na noho. Realizatsiia movoiu Python. – [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu do resursu: https://dou.ua/forums/topic/43026/?utm_source=chatgpt.com

DOI: 10.34185/1991-7848.itmm.2025.01.088

ЦИФРОВА ТРАНСФОРМАЦІЯ ІНФОРМАЛЬНОЇ ОСВІТИ ЧЕРЕЗ МОБІЛЬНІ СИСТЕМИ

Швачич Г.Г.¹, Монастир'юв Г.В.²

¹ НТУ «Дніпровська політехніка», д.т.н., професор, Україна

² НТУ «Дніпровська політехніка», Україна

Анотація. Дослідження спрямовані на розробку мобільного додатку, що представляє сучасний інструмент для розвитку когнітивних навичок та інформальної освіти. Додаток поєднує жанри головоломки та пазлу, націлений на широку вікову аудиторію, включаючи дітей і дорослих. Інтеграція математичної структури *Bounds* і використання методу *Encapsulate* дозволяють моделювати пазли з високою точністю в 3D-просторі *Unity*, навіть у реалізації 2D-простору. Його функціональність включає персоналізований вибір тем, інтерактивну енциклопедію, адаптивні пазли різних рівнів складності, систему підказок та налаштування. Також передбачено збереження даних і зворотній зв'язок для покращення взаємодії користувачів. Завдяки локалізації додаток доступний українською та англійською мовами. Цей додаток сприяє розвитку пам'яті, логіки, творчості, уважності та розширенню світогляду, будучи ефективним інструментом для інтерактивного навчання. Він може бути успішно інтегрований в освітні програми, підвищуючи мотивацію особистості до саморозвитку.

Ключові слова: мобільний додаток, когнітивні здібності, інформальна освіта, візуалізація.

Вступ. Серед різноманіття мобільних застосунків особливої уваги заслуговують ті, що орієнтовані на розвиток когнітивних навичок, розширення кругозору та підвищення рівня особистої освіченості [1]. Такі програми мають високу цінність у контексті сучасного цифрового середовища, яке супроводжує людину з раннього дитинства. Вони здатні суттєво впливати на інтелектуальне зростання та особистісний розвиток користувачів.

Ці мобільні рішення виступають ефективною альтернативою традиційним формам навчання, поєднуючи освітній контент із елементами гейміфікації та інтерактивності [2]. Такий підхід робить процес пізнання більш захопливим і природним, стимулюючи користувачів до самостійного розвитку інтелектуальних здібностей.

Усе це дозволяє розглядати зазначені мобільні додатки як інструмент інформальної освіти (англ. *informal education*). Інформальна освіта – це безперервний процес засвоєння знань, що відбувається поза межами формальних навчальних інституцій. Вона є логічним доповненням до формальної та неформальної освіти, забезпечуючи швидкий доступ до актуальної інформації та навичок, необхідних у динамічному світі.

В умовах стрімких змін та постійного оновлення вимог до професійних компетенцій, здатність до самоосвіти набуває особливого значення. Завдяки розвитку інтернету та цифрових технологій можливості для інформального навчання значно зросли. До ключових переваг такого підходу належать: гнучкість, свобода у виборі тематики, відсутність оцінювання та висока практична цінність отриманих знань.

Таким чином, створення мобільної інформаційної платформи, що сприяє розвитку когнітивних здібностей, є не лише актуальним завданням, але й вагомим внеском у розвиток інформальної освіти в сучасному суспільстві.

Основний матеріал досліджень. Головною метою розробки є створення та впровадження інноваційних інформаційних технологій, що підтримують та стимулюють інформальну освіту, орієнтовану на розвиток когнітивних здібностей особистості. Це досягається через забезпечення доступу до мобільної платформи, яка надає можливості для персоналізованого, доступного та ефективного самонавчання.

Ключовий акцент проєкту полягає у формуванні навчального середовища, що сприяє розвитку критичного мислення, пам'яті, логіки, креативності та швидкості обробки інформації. Для цього використовуються сучасні підходи, зокрема гейміфікація та адаптивне навчання, що підвищують зацікавленість користувача та мотивацію до навчання.

Особлива увага в розробці приділяється впровадженню механізмів адаптивного навчання – освітнього підходу, за якого процес пізнання адаптується до індивідуальних особливостей кожного користувача: рівня знань, стилю мислення, темпу засвоєння матеріалу та освітніх потреб. Це забезпечує більш гнучкий та ефективний шлях особистісного розвитку.

Розроблений мобільний додаток створений як альтернатива традиційним методам навчання, інтегруючи освітній процес з розважальними елементами завдяки інтерактивному формату подання інформації. Він сприяє ненав'язливому розвитку інтелектуальних навичок та залучає користувачів до саморозвитку. Функціональність додатку забезпечує легке поєднання навчальної складової з ігровими елементами, що дозволяє створювати персоналізоване середовище інформальної освіти, посилюючи динаміку гри, візуальну привабливість і тривалу взаємодію з користувачами.

Мобільний додаток об'єднує жанри головоломки та пазлу і орієнтований на різновікову аудиторію – як дітей, так і дорослих. Основна мета проєкту полягає у розвитку когнітивних здібностей, таких як критичне мислення, пам'ять, логіка, творчість, швидкість обробки інформації та розширення світогляду.

Цей додаток також ідеально підходить для старшої аудиторії, яка захоплюється складанням пазлів і цікавиться пізнавальним контентом, пов'язаним з такими темами, як історія, природа, мистецтво, технології та інші сфери. Завдяки широкому вибору категорій кожен користувач може знайти тему, що відповідає його інтересам. Система автоматичного підбору пазлів спрощує процес навчання, дозволяючи швидко перейти до нових завдань.

Процес складання пазлів сприяє покращенню візуального сприйняття, розвиває координацію рук і очей завдяки точному розміщенню елементів зображення. Крім того, така діяльність зміцнює пам'ять, стимулює творчість, підвищує концентрацію та уважність, сприяючи всебічному розвитку особистості.

Основні функції мобільного додатку включають:

1. Персоналізований вибір тем. Користувач має змогу вибрати тематики пазлів, що відповідають його інтересам, що сприяє адаптивній освіті. Є також режим випадкового вибору пазлів у межах заданих тем.
2. Інтерактивна енциклопедія пазлів. Додаток надає доступ до цікавої інформації про сутності, пов'язані з пазлами, а також перелік доступних для складання пазлів за відповідною тематикою.

3. Процес складання цифрових пазлів. Елементи зображення доступні в різних рівнях складності та адаптовані для мобільних пристроїв.

4. Система підказок. Користувачі можуть скористатися функціями, такими як перемішування частин пазлу чи автоматичне розміщення окремої частинки у правильному місці.

5. Гнучке налаштування параметрів додатку. Меню дозволяє налаштувати мову, гучність звуку та вібрацій, а також вибрати улюблені теми пазлів.

6. Збереження даних користувача. Прогрес та вподобання зберігаються на пристрої, полегшуючи повторний доступ до налаштувань та історії гри.

7. Тактильний зворотній зв'язок і візуальні ефекти. Вирішення задач супроводжується вібрацією, а також анімаціями та ефектами, що додає мотивації користувачам.

8. Локалізація додатку. Додаток доступний двома мовами: українською та англійською.

Додаток може використовуватися в освітніх програмах, додаючи інтерактивності до навчального процесу й стимулюючи учнів до участі у самостійних освітніх ініціативах, сприяючи розвитку їхніх когнітивних здібностей у ненав'язливій формі.

Ключовим елементом розробки є процес моделювання, спрямований на складання пазлів. Ця задача вирішувалася наступним чином. Для визначення меж і позицій елементів головоломки на ігровому полі використовується математична структура Bounds. Вона являє собою прямокутний паралелепіпед, що окреслює межі об'єкта у 3D-просторі. Варто зазначити, що середовище Unity [3] працює у тривимірному просторі, навіть якщо сама гра реалізована у 2D – усі об'єкти мають координати у 3D-просторі (рис. 1).

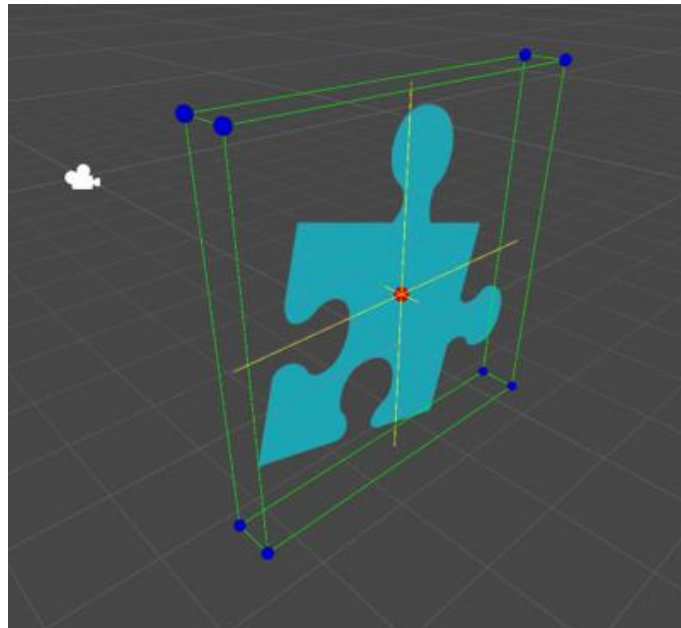


Рисунок 1 – Візуалізація обмеження структури Bounds 2D – об'єкта у 3D – середовищі

Під час поділу текстури пазла на фрагменти межі кожного з них додаються до загальної структури меж пазла. За це відповідає метод Encapsulate, що належить до структури Bounds. Він розширює об'єм меж, включаючи в них вказаний об'єкт у просторі.

Висновки. Розроблений мобільний додаток демонструє ефективність сучасних технологій у створенні інструментів для навчання та розвитку. Інтегрування математичних структур, таких як Bounds, у процес моделювання забезпечує точність і функціональність у просторі Unity, дозволяючи ефективно працювати як із 2D, так і 3D середовищем. Використання методу Encapsulate забезпечує зручність визначення меж і позицій об'єктів, що сприяє поліпшенню моделювання пазлів.

Цей підхід дозволяє створювати мобільний додаток з гнучким і багатофункціональним ігровим середовищем. Він сприяє не лише розвагам, а й розвитку когнітивних здібностей, що робить його цінним інструментом для інформальної освіти. Додаток потенційно може бути використаний у освітніх програмах, забезпечуючи інтерактивність навчального процесу, підвищуючи мотивацію користувачів до самостійного навчання та розвитку.

ЖИТЕПАТҮПА

1. Share of users worldwide accessing the internet. [Internet]. – Available from: <https://www.statista.com/statistics/1289755/internet-access-by-device-worldwide/>
2. Mobile gaming vs pc gaming. [Internet]. – Available from: <http://whimsygames.co/blog/mobile-gaming-vs-pc-gaming-key-differences/>
3. Almedia. [Internet]. – Available from: <https://www.pocketgamer.biz/71-of-the-biggest-mobile-games-use-a-unity-sdk/>

DIGITAL TRANSFORMATION OF INFORMAL EDUCATION THROUGH MOBILE SYSTEMS

Hennadi Shvachych, Hlib Monastyrov

Abstract. *The research focuses on the development of a mobile application that serves as a modern tool for cognitive skill enhancement and informal education. The application combines puzzle and jigsaw genres, targeting a wide age audience, including children and adults. The integration of the mathematical structure Bounds and the Encapsulate method enables high-precision puzzle modeling in Unity's 3D space, even when implemented in 2D environments. Its functionality includes personalized topic selection, an interactive encyclopedia, adaptive puzzles of various difficulty levels, a hint system, and customizable settings. Additionally, data preservation and feedback mechanisms enhance user interaction. With localization, the application is available in Ukrainian and English. The application fosters memory, logic, creativity, attentiveness, and broadens perspectives, making it an effective tool for interactive learning. It can be successfully integrated into educational programs, increasing individual motivation for self-development.*

Keywords: *mobile application, cognitive abilities, informal education, visualization.*

REFERENCE

1. Share of users worldwide accessing the internet. [Internet]. – Available from: <https://www.statista.com/statistics/1289755/internet-access-by-device-worldwide/>
2. Mobile gaming vs pc gaming. [Internet]. – Available from: <http://whimsygames.co/blog/mobile-gaming-vs-pc-gaming-key-differences/>
3. Almedia. [Internet]. – Available from: <https://www.pocketgamer.biz/71-of-the-biggest-mobile-games-use-a-unity-sdk/>

КОНТЕКСТНО ЗАЛЕЖНА АДАПТАЦІЯ ВІДПОВІДЕЙ ГЕНЕРАТИВНИХ LLM

Березюк М.О.¹, Гуда А.Ю.²

¹ Український державний університет науки і технологій, аспірант, Україна

² Український державний університет науки і технологій, доктор технічних наук,
професор, Україна

Анотація. В умовах кризових ситуацій оперативність реагування набуває вирішального значення. Великі мовні моделі (LLM) здатні генерувати корисні рекомендації, однак їх стандартна поведінка часто не враховує специфічний контекст надзвичайних подій. У цій доповіді пропонується Adaptive Injectable Realignment Model (Adaptive IRM) як підхід для досягнення контекстно залежної генерації відповідей. Adaptive IRM – це невеликий нейронний модуль, який інтегрується у прямий прохід LLM та ін'єктує контекстні сигнали для корекції внутрішніх представлень моделі без зміни її основних ваг. Наша розробка орієнтована на кризовий контекст, з використанням N нейронів (у нашому випадку $N = 4$), які відповідають за стихійні лиха (землетрус, повінь, пожежу та ураган). Вихідні сигнали Adaptive IRM, які додаються на різних шарах трансформера, модифікує механізми уваги з метою підсилення інформації, релевантної конкретному контексту. У доповіді окреслено архітектуру IRM, описано запропоновані розширення, а також подано план використання датасету HumAID для навчання Adaptive IRM. Експериментальні результати поки відсутні; натомість, обговорено концепцію, мотивацію та перспективи впровадження запропонованої системи.

Ключові слова: Контекстно залежна генерація; Великі мовні моделі; Адаптивне вирівнювання; Модуляція нейронів; Кризова інформатика; Датасет HumAID; Втручання на рівні шарів; Архітектури трансформера; Адаптація поведінки моделі

Вступ

У сучасних умовах надзвичайних подій оперативне реагування є критично важливим [4]. Великі мовні моделі (LLM) мають потенціал надавати користувачам корисні рекомендації, наприклад, відповідати на запитання «що мені робити?», однак їх стандартна поведінка зазвичай не адаптується під конкретний контекст кризи. У ситуаціях надзвичайних подій контекст (наприклад, тип катастрофи) визначає, яка інформація є релевантною та які рекомендації найбільш доцільні. Для забезпечення такої адаптації необхідна система, здатна «впроваджувати» контекст у внутрішні представлення LLM.

Ця робота спрямована на розробку Adaptive IRM – адаптивного модуля інжекційного переналаштування, який інтегрується у прямий прохід LLM та впливає на її механізми уваги, ін'єктуючи контекстний сигнал. Сигнал представлено у вигляді вектора з N нейронів (планується $N = 4$), де кожен нейрон відповідає за певну категорію кризової події: землетрус, повінь, пожежа, ураган. Таким чином, система зможе генерувати відповіді, які адаптовані до конкретного кризового сценарію, забезпечуючи оперативність, точність та безпеку генерованих рекомендацій.

Adaptive IRM для контекстно залежної генерації

Injectable Realignment Model (IRM) – це сучасний підхід для корекції поведінки великої мовної моделі під час її генеративного процесу [1, 5]. IRM являє собою невелику прямопрохідну нейронну мережу, яку інтегрують паралельно з попередньо натренованою LLM. Під час прямого проходу LLM IRM отримує деякі внутрішні активації моделі і генерує вектор, який ін'єктується у певні шари трансформера через додавання у залишковий потік. Такий підхід дозволяє «переналаштувати» внутрішні представлення моделі без зміни основних ваг LLM [1, 2]. Оригінальний IRM був застосований для досягнення певного стилю генерації (наприклад, емоційної тональності) та показав, що невелика мережа може ефективно модифікувати поведінку LLM за допомогою малочисельних параметрів.

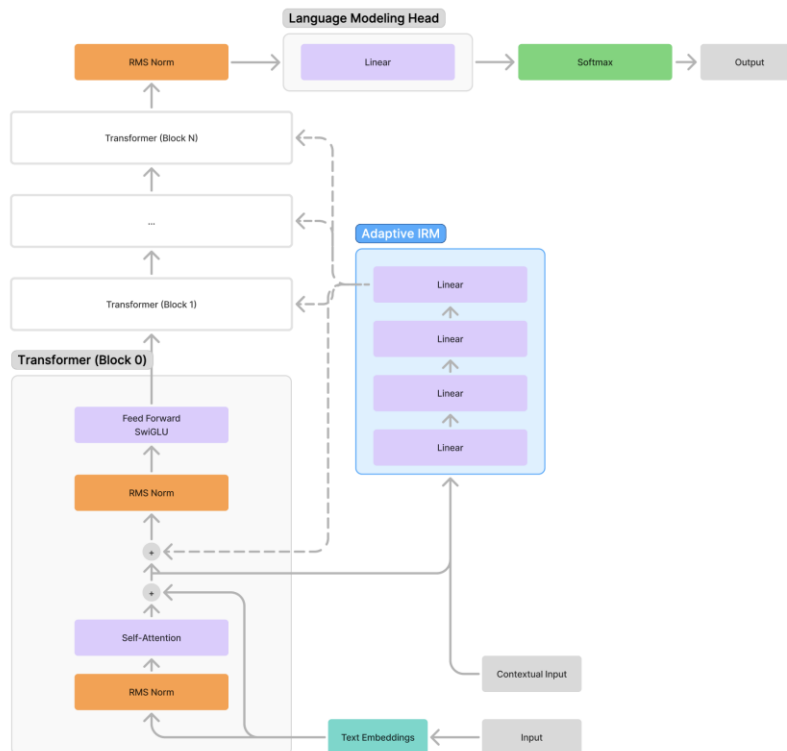


Рисунок 1 – Архітектура трансформера LLM з інтегрованим модулем Adaptive IRM. Adaptive IRM отримує на вході активації з ранніх шарів трансформера після механізму уваги та додатково — контекстний вектор. На виході модуль генерує корекційний сигнал, який додається до залишкових представлень у вибраних шарах трансформера. Таким чином Adaptive IRM впливає на увагу та генерацію LLM відповідно до заданого контексту.

Наша пропозиція полягає у розширенні концепції IRM для досягнення контекстної адаптації. Ми модифікуємо IRM так (Рисунок 1), щоб він приймав додатковий вхід – контекстний сигнал, представлений у вигляді N нейронів. Кожен з цих нейронів відповідає за конкретний кризовий контекст: землетрус, повінь, пожежа, ураган. Під час прямого проходу LLM, Adaptive IRM отримує як вихід з ранніх шарів LLM, так і контекстний вектор, який конкатенується з цим виходом. Таким чином, IRM генерує корекційний вектор, який ін'єктується на кількох шарах трансформера. Це дозволяє змінити розподіл уваги LLM, спрямовуючи її на релевантні для заданого контексту особливості. Наприклад, у випадку урагану відповідь може містити інформацію про евакуацію та повідомлення про погодні умови, а в умовах землетрусу – про безпечні зони та можливі післязсуви.

Датасет HumAID та стратегія навчання

Для навчання Adaptive IRM планується використання датасету HumAID – великої колекції кризових твітів з людською анотацією [3]. HumAID містить приблизно 77 000 твітів, зібраних під час 19 масштабних надзвичайних подій (2016–2019 рр.), охоплюючи різні типи катастроф. Кожен твіт анотовано за типом події та гуманітарними категоріями (наприклад, «пошук/термінова допомога», «підтримка», «пошкодження інфраструктури»).

Під час попередньої обробки даних ми будемо витягувати текст твітів та відповідні контекстні мітки (тип катастрофи: землетрус, повінь, пожежа, ураган). Контекстні мітки слугуватимуть вихідним сигналом для Adaptive IRM. Стандартна обробка тексту включатиме видалення URL, нормалізацію пробілів та очищення від нерелевантного контенту. Крім того, забезпечуватиметься збалансованість датасету по кожній категорії.

Під час навчання базова LLM буде заморожена, а лише параметри Adaptive IRM (включаючи контекстний вектор та ваги прямопрохідних шарів) будуть оптимізовані [1. 2]. Об'єктом оптимізації є така функція втрат, що заохочує модель до генерації відповідей, що точно відображають контекстну інформацію (наприклад, через завдання класифікації або генерації короткого звіту на основі заданого тексту). Таким чином, Adaptive IRM навчиться відображати сутність кожного типу кризи у своїх активаціях, що дозволить LLM генерувати більш адаптовані та релевантні відповіді під час надзвичайних ситуацій.

Висновки. У цій доповіді представлено концепцію та архітектурне рішення для контекстно залежної адаптації відповідей генеративних LLM за допомогою Adaptive IRM. Запропонована система дозволяє інтегрувати контекстний сигнал (у вигляді N нейронів, для нашої реалізації – 4, які відповідають за землетрус, повінь, пожежу, ураган) для корекції внутрішніх представлень LLM, що впливає на механізми уваги та генеративний процес.

Ми описали основні принципи оригінальної IRM, її впровадження та розширення для контекстної адаптації, а також подано стратегію використання датасету HumAID для навчання моделі. Хоч експериментальні

результати поки відсутні, запропонована концепція обіцяє значні переваги у застосуванні у кризових ситуаціях, де точність, релевантність та оперативність інформації мають критичне значення.

Подальші дослідження спрямовані на реалізацію та оцінку Adaptive IRM у лабораторних та польових умовах, а також на аналіз інтерпретованості отриманих активацій для розуміння того, як контекст впливає на процес генерації.

ЛІТЕРАТУРА

- 1.Smith B., Baker D., Chase C. та ін. The Mysterious Case of Neuron 1512: Injectable Realignment Architectures Reveal Internal Characteristics of Meta’s Llama 2 Model // arXiv [електронний препринт]. – 2024. – №: arXiv:2407.03621. – Режим доступу: <https://arxiv.org/abs/2407.03621> (дата звернення: [не вказано]).
- 2.Dathathri S. та ін. Plug and Play Language Models: A Simple Approach to Controlled Text Generation // Матеріали 8-ї Міжнародної конференції з питань Learning Representations (ICLR) [тезиси доповідей]. – 2020.
- 3.Alam F., Qazi U., Imran M., Ofli F. HumAID: Human-Annotated Disaster Incidents Data from Twitter with Deep Learning Benchmarks // Матеріали конференції ICWSM 2021 [тезиси доповідей]. – 2021.
- 4.Otal H. T., Canbaz M. A. LLM-Assisted Crisis Management: Building Advanced LLM Platforms for Effective Emergency Response and Public Collaboration // arXiv [електронний препринт]. – 2024. – №: arXiv:2402.10908. – Режим доступу: <https://arxiv.org/abs/2402.10908> (дата звернення: [не вказано]).
- 5.DRAGN Labs. Injectable Alignment Model – README [електронний ресурс]. – 2024. – GitHub Repository. – Режим доступу: <https://github.com/DRAGNLabs/InjectableAlignmentModel> (дата звернення: [не вказано]).

CONTEXT-AWARE ADAPTATION OF GENERATIVE LLM RESPONSES

Berezuk M.O., Guda A.I.

Abstract. *In crisis situations, the speed of response becomes critically important. Large Language Models (LLMs) are capable of generating useful recommendations; however, their default behavior often fails to account for the specific context of emergency events. This paper proposes the Adaptive Injectable Realignment Model (Adaptive IRM) as a method for achieving context-aware response generation. Adaptive IRM is a lightweight neural module that integrates into the LLM’s forward pass and injects contextual signals to adjust the model’s internal representations without modifying its original weights. Our approach is focused on disaster scenarios, using N neurons (in our case, $N = 4$) corresponding to natural hazards such as earthquakes, floods, fires, and hurricanes. The output signals from the Adaptive IRM, injected at various transformer layers, modulate*

attention mechanisms to emphasize information relevant to the given context. The paper outlines the IRM architecture, describes the proposed extensions, and presents a plan for using the HumAID dataset to train the Adaptive IRM. Experimental results are not yet available; instead, the concept, motivation, and implementation strategy of the proposed system are discussed.

Keywords: *Context-aware generation; Large Language Models; Adaptive alignment; Neuron modulation; Crisis informatics; HumAID dataset; Layerwise intervention; Transformer architectures; Model behavior adaptation*

REFERENCE:

1. Smith, B., Baker, D., Chase, C., et al. The Mysterious Case of Neuron 1512: Injectable Realignment Architectures Reveal Internal Characteristics of Meta's Llama 2 Model // arXiv [preprint]. – 2024. – ID: arXiv:2407.03621. – Available at: <https://arxiv.org/abs/2407.03621> (Accessed: [date not specified]).
2. Dathathri, S., et al. Plug and Play Language Models: A Simple Approach to Controlled Text Generation // Proceedings of the 8th International Conference on Learning Representations (ICLR). – 2020.
3. Alam, F., Qazi, U., Imran, M., Ofli, F. HumAID: Human-Annotated Disaster Incidents Data from Twitter with Deep Learning Benchmarks // Proceedings of the ICWSM 2021 Conference. – 2021.
4. Ota, H. T., Canbaz, M. A. LLM-Assisted Crisis Management: Building Advanced LLM Platforms for Effective Emergency Response and Public Collaboration // arXiv [preprint]. – 2024. – ID: arXiv:2402.10908. – Available at: <https://arxiv.org/abs/2402.10908> (Accessed: [date not specified]).
5. DRAGN Labs. Injectable Alignment Model – README [GitHub Repository, electronic resource]. – 2024. – Available at: <https://github.com/DRAGNLabs/InjectableAlignmentModel> (Accessed: [date not specified]).

ВИКОРИСТАННЯ МОДЕЛІ НА ОСНОВІ БЕЗПЕКИ ДЛЯ ЗАХИСТУ ХМАРНИХ СЕРЕДОВИЩ

Бобренко В.В.¹, Гуда І.А.²

¹ Дніпровський металургійний інститут Українського державного університету
науки і технологій, аспірант, Україна

² Дніпровський металургійний інститут Українського державного університету
науки і технологій, докт. техн. наук, проф., Україна

Анотація. Стрімкий ріст популярності хмарних середовищ вимагає приділяти особливу увагу безпеці ресурсів та даних, розташованих у хмарі. Розглянута концепція довіри та її властивості, завдяки яким вона може бути використана для опису взаємодії компонентів у хмарних середовищах. Завдяки цьому моделі на її основі можуть бути застосовані для захисту цих середовищ. Розглянуті реалізації подібних моделей, а саме: TNA-SL, InterTrust, ODTMF, Fuzz Art та їх модифікації. Були визначені вимоги до них, відомі недоліки та переваги. Як результат, був зроблений висновок, що моделі на основі довіри можуть бути використані для захисту хмарних середовищ, проте вони потребують оптимізацій як часу виконання, так і масштабування для подальшого використання. Також було визначено, що варто звернути увагу на їх використання у об'єднаних хмарних середовищах.

Ключові слова: хмарні середовища, хмарні обчислення, розподілені системи, кібербезпека, захист інформації, моделі на основі довіри.

Хмарні середовища пропонують доступ до масштабованих обчислювальних ресурсів за запитом через Інтернет. Можливості, які це надає, занадто привабливі для споживачів, щоб їх ігнорувати. Однак парадигма хмарних обчислень також має недоліки, зокрема їх непрозорий характер, що призводить до значних проблем щодо довіри та безпеки, які перешкоджають їх розвитку та поширенню. Щоб виправити це, розробляється модель оцінки та керування довірою.

По суті, довіра означає віру в здатність суб'єкта діяти певним чином у конкретному контексті [1]. Довіра, як показник, має декілька важливих властивостей:

- Довіра залежить від прямої взаємодії, спостереження або досвіду між компонентами системи.

- Компоненти системи можуть не мати історії попередніх взаємодій, однак вони можуть використовувати дані від інших об'єктів. Йдеться мова про транзитивну довіру.
- Показник довіри залежить від конкретної пари компонентів системи, на яких зосереджено увагу, і змінюється від однієї пари до іншої.
- Різні компоненти системи можуть мати різний ступінь довіри один до одного. Насправді, те, що об'єкт А довіряє об'єкту В, не означає, що об'єкт В повинен довіряти об'єкту А.
- Довіра – це за своєю суттю суб'єктивний показник, який базується на різних властивостях або доказах, і деякі з них можуть мати більшу вагу, ніж інші.
- Довіра – контекстно-залежна ознака: довіра «А» до «В» відрізняється в залежності від контексту.
- Довіра фактично є сумішшю деяких індивідуальних характеристик: правдивість, чесність, надійність, компетентність, безпека та своєчасність.
- Довіра залежить від історії: вона використовує попередній досвід, який може вплинути на поточний ступінь довіри.
- Довіра є динамічним показником, що змінюється з часом. Це дає змогу відповідати змінам у системі.

Іншим важливим аспектом є поширення довіри, що полягає в тому, як поширювати показники довіри у системі. Загалом, механізми поширення довіри поділяються на розподілені та централізовані.

- Розподілений метод: компоненти системи поширюють показники довіри без використання централізованого брокера. Адміністрування такого розповсюдження є складним, але робить можливим подальше масштабування.
- Централізований метод: для цього методу потрібен окремий компонент системи, що буде зберігати показники довіри та надавати іншим учасникам доступ до них.

Перераховані властивості довіри роблять можливим використання моделей на її основі для захисту даних та обчислювальних ресурсів. Так алгоритм TNA-SL [2] є добре відомим алгоритмом керування довірою у P2P мережах. Цей алгоритм представляє довірчу мережу між одноранговими вузлами як спрямований послідовний паралельний граф (DSPG) без циклу, що запобігає створенню кількох шляхів між кожною парою однорангових вузлів. Спрощення графіків і визначення довіри базуються на суб'єктивній логіці, згідно з якою думки кожного учасника системи про інших вимірюються та зберігаються. Сила цього алгоритму полягає в точності інформації про довіру та чіткому визначенні негативної довіри. Відомі недоліки цього алгоритму

включають його тривалий час виконання через часте множення матриць, необхідне для визначення місцезнаходження довіреного однорангового пристрою, втрату деякої довірчої інформації для уникнення циклів на графіку та обмежену масштабованість мережі. У [3] вводиться розширена суб'єктивна логіка для управління довірою (ESL-TM) у P2P мережах. Це передбачає новий фактор довіри – фактор занепаду – який використовується як частина механізму покарання після транзакції з негативним рейтингом. У роботі [4] представлено алгоритм InterTrust як потенційний інструмент для управління довірою в об'єднаних хмарних середовищах, який покращує алгоритм TNA-SL, зокрема з точки зору масштабованості та часу виконання. Ця модифікація робить алгоритм TNA-SL більш придатним у випадку об'єднаних хмарних середовищах. Алгоритм InterTrust усуває складність, з точки зору виконання та простору, пов'язану з двома матрицями $n \times n$, які потрібні для алгоритму TNA-SL. Крім того, InterTrust кумулятивно зберігає всю попередню інформацію про довіру між одноранговими вузлами, щоб подолати втрату інформації про довіру в оригінальному алгоритмі.

Інший алгоритм, заснований на розширеній суб'єктивній логіці, запропоновано в [1]. Модель довіри домену організації для федерацій (ODTMF) має на меті оцінити значення довіри доменів організації за допомогою нового оператора, який називається оператором ваги, щоб показати різний вплив кожного учасника федерації організації.

Спеціально для хмар Hadoop [5,6] було розроблено систему управління довірою в [7,8]. Для досягнення високої масштабованості всі обчислення довіри формулюються та виконуються як розподілені хмарні обчислення. Такі параметри, як час ініціації, ціна, швидкість обробки, частота помилок і пропускна здатність, використовуються для розрахунку значень довіри, які періодично оновлюються, щоб гарантувати, що довірені ресурси можуть бути призначені користувачам з вищими значеннями довіри.

У [9] модель довіри на основі домену представлена в рамках хмарної безпеки. Основна увага зосереджена на фільтрації ненадійного зворотного зв'язку довіри, щоб зробити системи більш надійними. Техніка нечіткої логіки

під назвою Fuzzy ART запропонована в [40], яка використовує довіру віртуальних машин у хмарних середовищах.

Висновки. Концепт довіри завдяки своїм властивостям дозволяє описувати взаємодію компонентів у хмарних середовищах, що за своєю природою є дуже динамічними. Завдяки цьому моделі на основі довіри можуть бути використані для захисту хмарних середовищ. Проте для цього необхідно вирішити проблеми розрахунку показника довіри а також його поширення у системі. Наведені спроби реалізації даної моделі значно збільшують час відповіді у системі, або ж є доволі спеціалізованими [5,6,7,8], що робить їх використання неможливим у загальному випадку. Також варто приділити окрему увагу об'єднаним хмарним середовищам, використання яких може ускладнити вирішення поставлених задач, проте може зробити модель кориснішою для користувачів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Hu Z, Liu L, Wang C (2011) Organization domain trust evaluation model in federated environment based on subjective logic. In: International conference on information technology, computer engineering and management sciences (ICM). IEEE, Nanjing, Jiangsu, China, pp 380-384
2. Jøsang A, Bhuiyan T (2008) Optimal trust network analysis with subjective logic. In: 2nd International conference on emerging security information, systems and technologies. IEEE, Cap Esterel, France, pp 179-184
3. Ma X, Wang Z, Liu F, Bian J (2010) A trust model based on the extended subjective logic for P2P networks. In: 2nd International conference on e-business and information system security. IEEE, Wuhan, China, pp 1-4
4. Kurdi, H., Alfaries, A., Al-Anazi, A. et al. A lightweight trust management algorithm based on subjective logic for interconnected cloud computing environments. J Supercomput 75, 3534–3554 (2019). <https://doi.org/10.1007/s11227-018-2669-y>
5. Shvachko K, Kuang H, Radia S, Chansler R (2010) The hadoop distributed file system. In: 26th Symposium on mass storage systems and technologies (MSST). IEEE, Incline Village, NV, USA, pp 1-10
6. Rao S, Wang Y, Tao XL (2010) The comprehensive trust model in P2P based on improved eigentrust algorithm. In: International conference on measuring technology and mechatronics automation. IEEE, Changsha City, China, pp 822-825
7. Khan SM, Hamlen KW (2012) Hatman: intra-cloud trust management for hadoop. In: 5th International conference on cloud computing. IEEE, Honolulu, HI, USA, pp 494-501

8. Nishikawa T, Fujita S (2010) An effective risk avoidance scheme for the eigentrust reputation management system. In: 1st International conference on networking and computing. IEEE, Higashi-Hiroshima, Japan, pp 36-43
9. Abrams Z, McGrew R, Plotkin S (2005) A non-manipulable trust system based on EigenTrust. ACM SIGecom Exch 5:21-30
10. Jaiganesh M, Aarthi M, & Kumar AVA (2015) Fuzzy ART-Based User Behavior Trust in Cloud Computing. in Artificial Intelligence and Evolutionary Algorithms in Engineering Systems, Eds. New Delhi: Springer:341-348.

TRUST BASED MODEL FOR CLOUD SECURITY

Viacheslav Bobrenok, Anton Guda

Abstract. *The rapid growth in the popularity of cloud environments requires special attention to be paid to the security of resources and data located in the cloud. The concept of trust and its properties, thanks to which it can be used to describe the interaction of components in cloud environments, are considered. Due to this, models based on this concept can be used to protect these cloud environments. Implementations of such models, namely: TNA-SL, InterTrust, ODTMF, Fuzz Art and their modifications, were considered. Requirements for them were determined, disadvantages and advantages were known. As a result, it was concluded that trust-based models can be used to protect cloud environments, but they require optimizations of both execution time and scalability for further use. It was also determined that it is worth paying attention to their use in federated cloud environments.*

Keywords: *cloud environments, cloud computing, distributed systems, cybersecurity, data security, trust based models*

REFERENCES

1. Hu Z, Liu L, Wang C (2011) Organization domain trust evaluation model in federated environment based on subjective logic. In: International conference on information technology, computer engineering and management sciences (ICM). IEEE, Nanjing, Jiangsu, China, pp 380-384
2. Jøsang A, Bhuiyan T (2008) Optimal trust network analysis with subjective logic. In: 2nd International conference on emerging security information, systems and technologies. IEEE, Cap Esterel, France, pp 179-184
3. Ma X, Wang Z, Liu F, Bian J (2010) A trust model based on the extended subjective logic for P2P networks. In: 2nd International conference on e-business and information system security. IEEE, Wuhan, China, pp 1-4
4. Kurdi, H., Alfaries, A., Al-Anazi, A. et al. A lightweight trust management algorithm based on subjective logic for interconnected cloud computing environments. J Supercomput 75, 3534–3554 (2019). <https://doi.org/10.1007/s11227-018-2669-y>

5. Shvachko K, Kuang H, Radia S, Chansler R (2010) The hadoop distributed file system. In: 26th Symposium on mass storage systems and technologies (MSST). IEEE, Incline Village, NV, USA, pp 1-10
6. Rao S, Wang Y, Tao XL (2010) The comprehensive trust model in P2P based on improved eigentrust algorithm. In: International conference on measuring technology and mechatronics automation. IEEE, Changsha City, China, pp 822-825
7. Khan SM, Hamlen KW (2012) Hatman: intra-cloud trust management for hadoop. In: 5th International conference on cloud computing. IEEE, Honolulu, HI, USA, pp 494-501
8. Nishikawa T, Fujita S (2010) An effective risk avoidance scheme for the eigentrust reputation management system. In: 1st International conference on networking and computing. IEEE, Higashi-Hiroshima, Japan, pp 36-43
9. Abrams Z, McGrew R, Plotkin S (2005) A non-manipulable trust system based on EigenTrust. ACM SIGecom Exch 5:21-30
10. Jaiganesh M, Aarthi M, & Kumar AVA (2015) Fuzzy ART-Based User Behavior Trust in Cloud Computing. in Artificial Intelligence and Evolutionary Algorithms in Engineering Systems, Eds.New Delhi: Springer:341-348.

ПРОТОКОЛИ КОНСЕНСУСУ ТА ЇХ ЗАСТОСУВАННЯ У СИСТЕМАХ УПРАВЛІННЯ ВАНТАЖОПОТОКАМИ

Велегура Є.А.¹, Горячкін В.М.²

¹Український державний університет науки і технологій, Україна

²Український державний університет науки і технологій, ² к.т.н., доцент, Україна

Анотація. У тезах розглянуто сучасні протоколи консенсусу та їх використання в управлінні вантажопотоками на основі блокчейну. Проаналізовано технічні аспекти впровадження смарт-контрактів у логістичних процесах з акцентом на безпеку даних і транзакцій. Показано, що децентралізована мережа, в якій всі учасники повинні досягти згоди щодо змін у реєстрі, забезпечує високу цілісність інформації та захист від несанкціонованих втручань. Наведено приклади використання блокчейну в логістиці (відстеження вантажів, автоматизація документів) та обговорено переваги консенсусних алгоритмів у підвищенні прозорості, довіри між сторонами й стійкості систем вантажоперевезень. Зроблено висновок про перспективність застосування протоколів консенсусу для побудови захищених та ефективних систем управління ланцюгами постачання.

Ключові слова: блокчейн, консенсус-протокол, смарт-контракт, логістика, вантажопотоки, безпека, прозорість.

Вступ. Управління вантажопотоками є критично важливим аспектом логістики та ланцюгів постачання, що включає координацію перевезень, зберігання і передачу товарів від виробника до споживача. Традиційні централізовані системи управління логістикою часто стикаються з проблемами браку прозорості, довіри та безпеки даних. Вразливість таких систем полягає в існуванні єдиної точки відмови, що може призвести до збоїв або маніпуляцій даними з боку зловмисників. Наприклад, несинхронність інформації між різними учасниками (виробниками, перевізниками, складами) призводить до помилок та затримок, а централізована база даних може стати мішенню для кібератак. В останнє десятиліття технологія блокчейну пропонує рішення цих проблем шляхом розподіленого зберігання даних і використання протоколів консенсусу для їх узгодження між учасниками мережі. Блокчейн є незмінним розподіленим реєстром транзакцій, захищеним криптографічними методами, який усуває потребу в єдиному довіреному посереднику. Це особливо привабливо для логістики, де задіяно багато незалежних сторін.

Метою даної роботи є аналіз протоколів консенсусу, що застосовуються в блокчейн-системах управління вантажопотоками, та оцінка їх ролі у забезпеченні безпеки і надійності логістичних процесів. Основна увага приділяється технічним деталям реалізації смарт-контрактів у логістиці, питанням безпеки та практичним прикладам впровадження технології.

Протоколи консенсусу в блокчейн-логістиці. Протокол консенсусу визначає механізм, за яким вузли розподіленої мережі досягають згоди щодо актуального стану реєстру транзакцій. В публічних блокчейнах (наприклад, біткоїн, Ethereum) поширені енергоємні алгоритми консенсусу на зразок Proof-of-Work (PoW, доказ виконання роботи). PoW забезпечує високий рівень захисту від підробки записів, проте потребує значних обчислювальних ресурсів і часу для підтвердження блоків [2]. Це робить його малопридатним для швидкоплинних логістичних процесів, які вимагають високої пропускну здатності і низьких затримок. Натомість у корпоративних (приватних або консорціумних) блокчейн-системах управління ланцюгами постачання набули розвитку альтернативні протоколи консенсусу, що не потребують значних затрат енергії та часу. Прикладами є Proof-of-Stake (доказ частки володіння), Proof-of-Authority (доказ повноваження) та алгоритми на основі візантійської відмовостійкості (PBFT, RAFT тощо). Такі підходи дозволяють обмеженому колу відомих учасників (вузлів) швидко узгоджувати між собою блоки транзакцій, зберігаючи при цьому високий рівень довіри і незмінності даних. Застосування полегшених і масштабованих алгоритмів консенсусу підвищує продуктивність блокчейн-системи та зменшує витрати, що є критичним для глобальних логістичних мереж [2].

Безпека та довіра через децентралізацію. Розподілений характер блокчейну означає, що жоден окремий учасник не контролює всю систему – кожна транзакція повинна бути підтверджена більшістю або визначеною кворумом вузлів. Це забезпечує захист від несанкціонованих змін: для внесення підробленого запису зловмиснику потрібно скоординувати атаку на більшість вузлів мережі, що практично неможливо у добре спроектованій системі. Кожна зміна даних у реєстрі підтверджується консенсусом усіх

учасників, тому фальсифікація або видалення інформації стає надзвичайно складним. Таким чином, консенсусні протоколи підвищують цілісність даних і знижують ризики шахрайства, контрафакту чи несанкціонованого доступу. Крім того, використання криптографічних підписів і хеш-ланцюжків блоків означає, що будь-яка спроба змінити інформацію буде одразу виявлена іншими учасниками. Довіра між сторонами, що беруть участь у вантажоперевезеннях, забезпечується не централізованим посередником, а математично обґрунтованими механізмами перевірки та спільної верифікації транзакцій [1].

Смарт-контракти в логістичних процесах. Смарт-контракт – це програмний алгоритм, який автоматично виконує умови угоди при настанні визначених подій. У контексті логістики смарт-контракти застосовуються для автоматизації та контролю виконання типових процесів: оформлення транспортних документів, відстеження місцезнаходження та стану вантажу в режимі реального часу, управління запасами на складах, розрахунків між контрагентами тощо [1]. Наприклад, після відправлення партії товару смарт-контракт може сформувати електронну транспортну накладну і записати її у блокчейн-реєстр, де вона буде доступна всім учасникам перевезення (вантажовідправнику, перевізнику, отримувачу). Будь-які зміни в цьому документі можливі тільки за взаємною згодою (консенсусом) всіх сторін, що гарантує автентичність даних. Інший приклад – моніторинг умов перевезення: датчики IoT (температури, вологості, GPS тощо) можуть передавати дані до блокчейну; якщо параметри виходять за допустимі межі (скажімо, температура в рефрижераторі піднялася вище критичної), смарт-контракт автоматично сповістить перевізника та вантажоотримувача або ініціює інші наперед визначені дії. Таким чином, смарт-контракти підвищують оперативність реагування на події та виключають людський фактор у рутинних операціях, що зменшує кількість помилок і затримок.

Аспекти безпеки та довіри. Використання блокчейну у вантажній логістиці суттєво підвищує прозорість і підзвітність процесів. Усі транзакції (наприклад, передача товару, зміна статусу замовлення, підписання

документу) незмінно фіксуються в розподіленому реєстрі, що дає можливість аудиту кожного кроку постачання в майбутньому. Журнал транзакцій є спільним для всіх учасників, тому інформаційні розбіжності між сторонами усуваються – кожен має доступ до однаково достовірних даних про рух вантажів, що сприяє співпраці між учасниками ланцюга постачання.

З точки зору безпеки, консенсусний підхід і криптографічний захист роблять мережу стійкою до більшості кібератак: відомо, що однорангове зберігання даних без центрального вузла виключає єдину точку відмови і ускладнює несанкціонований доступ. Проте, слід враховувати і нові виклики безпеки. Смарт-контракти, будучи програмним кодом, можуть містити вразливості, що потребують ретельної перевірки перед впровадженням [4].

Помилки в коді смарт-контрактів вже ставали причиною інцидентів (як-от в Ethereum), тому для логістичних систем важливо застосовувати формальні методи верифікації контрактів та кращі практики програмування [5]. Крім того, в публічних ланцюгах можливі атаки типу 51%, коли один учасник концентрує більшість обчислювальних потужностей, але в корпоративних (приватних) системах це ризик мінімізовано шляхом контролю за колом вузлів.

Конфіденційність даних також є важливим питанням: у відкритому блокчейні вся інформація доступна всім вузлам, що неприпустимо для деяких комерційних даних. В таких випадках застосовуються гібридні рішення – приватні блокчейни або шифрування даних, коли чутлива інформація зберігається поза ланцюгом, а в блокчейні фіксуються лише хеші чи підтвердження.

Практичне впровадження. Блокчейн-технологія вже починає застосовуватися у сфері логістики. Відомий приклад – платформа TradeLens, створена компаніями IBM та Maersk для відстеження глобальних контейнерних перевезень. Ця система на базі блокчейну Hyperledger забезпечувала спільний доступ учасників галузі до даних про рух контейнерів і пов'язані документи. Вже протягом кількох місяців після запуску (2018 р.) до TradeLens приєдналися десятки портів, транспортних компаній та імпортерів для тестування рішення [6]. Хоча згодом проект було згорнуто, він продемонстрував потенціал

технології у зменшенні паперового документообігу та прискоренні операцій завдяки єдиному джерелу правди (англ. *single source of truth*).

Інші приклади включають використання блокчейну для відстеження походження продуктів у роздрібних мережах (для забезпечення якості та безпеки харчових продуктів), а також платформи на зразок VeChain, що застосовують консенсус Proof-of-Authority для моніторингу поставок у режимі реального часу. У наукових дослідженнях запропоновано чимало прототипів: зокрема, у дослідженні [3] описано блокчейн-протокол з консенсусним механізмом і розподілом ключів для захищеного обміну інформацією в фармацевтичному ланцюгу постачання, а в дослідженні [4] продемонстровано концепцію децентралізованого відстеження товарів із використанням смарт-контрактів на спільному реєстрі. Ці приклади підтверджують, що поєднання протоколів консенсусу та смарт-контрактів здатне вирішити низку практичних проблем логістики – від підробки документів до затримок у передачі інформації – та закласти основу для нових бізнес-моделей у вантажоперевезеннях.

Висновки. Впровадження блокчейн-технологій у системи управління вантажопотоками відкриває нові можливості для підвищення надійності та ефективності логістичних операцій. Протоколи консенсусу відіграють ключову роль у цих системах, забезпечуючи узгодженість даних між усіма учасниками мережі та створюючи довірене середовище без необхідності централізованого контролю. Смарт-контракти дозволяють автоматизувати виконання логістичних угод і процедур, зменшуючи вплив людського фактору та пришвидшуючи процеси. Децентралізована модель, підкріплена криптографією, гарантує високий рівень захисту інформації: дані про переміщення вантажів стають прозорими, але водночас захищеними від несанкціонованого втручання. З точки зору безпеки, блокчейн усуває багато вразливостей традиційних систем (таких як єдина точка відмови, можливість прихованої зміни записів), хоча і вимагає уваги до нових аспектів, зокрема безпеки смарт-контрактів та конфіденційності.

Таким чином, протоколи консенсусу та смарт-контракти мають значний потенціал у сфері логістики: їх застосування сприяє створенню стійких, прозорих та ефективних систем управління вантажопотоками. Подальші дослідження і пілотні проекти в цьому напрямі допоможуть вдосконалити масштабованість блокчейн-рішень, стандартизувати обмін даними між різними учасниками ланцюга постачання та вирішити поточні обмеження (наприклад, продуктивність та сумісність з існуючими системами). Безпекові аспекти залишаються пріоритетними: розвиток більш стійких алгоритмів консенсусу, аудит смарт-контрактів і комбінування блокчейну з іншими технологіями (IoT, хмарними сервісами) сприятиме ширшому впровадженню цих рішень у галузі вантажних перевезень. У підсумку, використання протоколів консенсусу в управлінні вантажопотоками є перспективним напрямом, що здатен революціонізувати глобальні ланцюги постачання, підвищуючи їх прозорість, безпеку та довіру між усіма сторонами.

ЛІТЕРАТУРА

- 1.Smart Contracts: Automation and Security in Freight Forwarding. Supply & Transport Logistics Blog, 15 жовтня 2024. URL: <https://supplyx.info/en/smart-contracts>.
- 2.Alqarni M.A., Alkathiri M.S., Chauhdary S.H., Saleem S. Use of Blockchain-Based Smart Contracts in Logistics and Supply Chains. Electronics, 12(6), 1340, 2023. URL: <https://www.mdpi.com/2079-9292/12/6/1340>.
- 3.Dwivedi S.K., Amin R., Vollala S. Blockchain based secured information sharing protocol in supply chain management system with key distribution mechanism. Journal of Information Security and Applications, 54:102554, 2020. DOI: 10.1016/j.jisa.2020.102554.
- 4.Chang S.E., Chen Y.-C., Lu M.-F. Supply chain re-engineering using blockchain technology: a case of smart contract based tracking process. Technological Forecasting and Social Change, 144: 1–11, 2019. DOI: 10.1016/j.techfore.2019.03.015
- 5.Atzei N., Bartoletti M., Cimoli T. A survey of attacks on Ethereum smart contracts (SoK). Proc. Intl. Conf. Principles of Security and Trust (POST), LNCS 10204, pp. 164–186, 2017. DOI: 10.1007/978-3-662-54455-6_8.
- 6.Lopez E. Business Decision of the Year: Maersk and IBM team up to form TradeLens. Supply Chain Dive, 3 грудня 2018. URL: <https://www.supplychaindive.com/news/dive-award-2018-business-decision-ibm-maersk-blockchain/542162>.

CONSENSUS PROTOCOLS AND THEIR APPLICATION IN FREIGHT FLOW MANAGEMENT SYSTEMS

Velehura Yevhenii, Horiachkin Vadym

Abstract. *This paper presents a study of modern consensus protocols and their use in blockchain-based freight flow management. The technical aspects of implementing smart contracts in logistics processes are analyzed with a focus on data and transaction security. We show that a decentralized network, in which all participants must agree on updates to the ledger, ensures high data integrity and protection against unauthorized tampering. Examples of blockchain usage in logistics (cargo tracking, document automation) are provided, and the advantages of consensus algorithms in increasing transparency, trust among parties, and the resilience of freight systems are discussed. It is concluded that the application of consensus protocols is promising for building secure and efficient supply chain management systems.*

Keywords: *blockchain, consensus protocol, smart contract, logistics, freight flow, security, transparency.*

REFERENCES

1. Smart Contracts: Automation and Security in Freight Forwarding. Supply & Transport Logistics Blog, 15 October 2024. URL: <https://supplyx.info/en/smart-contracts>.
2. Alqarni, M.A., Alkatheiri, M.S., Chauhdary, S.H., Saleem, S. Use of Blockchain-Based Smart Contracts in Logistics and Supply Chains. *Electronics* 12(6), 1340 (2023). URL: <https://www.mdpi.com/2079-9292/12/6/1340>
3. Dwivedi, S.K., Amin, R., Vollala, S. Blockchain based secured information sharing protocol in supply chain management system with key distribution mechanism. *J. Inf. Security and Applications* 54, 102554 (2020). DOI: 10.1016/j.jisa.2020.102554.
4. Chang, S.E., Chen, Y.-C., Lu, M.-F. Supply chain re-engineering using blockchain technology: a case of smart contract based tracking process. *Technol. Forecast. Soc. Change* 144, 1–11 (2019). DOI: 10.1016/j.techfore.2019.03.015.
5. Atzei, N., Bartoletti, M., Cimoli, T. A survey of attacks on Ethereum smart contracts (SoK). In *Proc. International Conference on Principles of Security and Trust (POST)*, LNCS 10204, 164–186 (2017). DOI: 10.1007/978-3-662-54455-6_8
6. Lopez, E. Business Decision of the Year: Maersk and IBM team up to form TradeLens. *Supply Chain Dive*, 3 Dec 2018. URL: <https://www.supplychaindive.com/news/dive-award-2018-business-decision-ibm-maersk-blockchain/542162/>.

СУЧАСНІ ТЕНДЕНЦІЇ ВИКОРИСТАННЯ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ В КІБЕРБЕЗПЕЦІ

Вдовиченко І.Н.

Криворізький національний університет, к.т.н., доцент, Україна

Анотація. Представлене дослідження є одним з кроків у розумінні та оптимізації систем безпеки, які використовують ШІ для протидії непередбаченим кіберзагрозам та забезпечення безпеки від витоку інформації на підприємстві.

Проаналізовано сучасні методи забезпечення безпеки в контексті запобігання витоку даних, а також розглянуто актуальність використання штучного інтелекту у цьому процесі. Досліджено переваги використання ШІ для захисту інформації. У дослідженні підкреслюється, що ефективність системи запобігання витокам даних значною мірою залежить від якості та обсягу зібраної інформації з таких основних джерел даних, як лог-файли системи, мережевий трафік, історії дій користувачів.

Для проведення дослідження використано три основних підходи: SVM, CNN, LSTM та їх комбінації, проведена перевірка їх ефективності.

Ключові слова: штучний інтелект, кіберзагрози, виток інформації, захист, аномальні процеси, аналіз.

Вступ. У сучасному світі, де цифровізація охоплює всі сфери діяльності, питання забезпечення інформаційної безпеки стають критично важливими. Кількість кібератак та витоків даних постійно зростає, що створює серйозні виклики для компаній та організацій. Традиційні методи захисту інформації, такі як системи запобігання витокам даних (DLP) та засоби захисту кінцевих точок (EDR), демонструють обмежену ефективність у виявленні складних загроз, зокрема, аномальної поведінки користувачів та внутрішніх загроз. У зв'язку з цим виникає потреба у впровадженні інтелектуальних систем аналізу поведінки користувачів (UEBA), що базуються на алгоритмах штучного інтелекту.

Організації всіх рівнів, від малих підприємств до великих корпорацій, залежать від своєї здатності безпечно зберігати та використовувати дані. Проте з розвитком технологій зростає і кількість загроз, спрямованих на отримання несанкціонованого доступу до цих даних. Згідно зі звітом IBM 2023 року, середня вартість витоку даних для компанії становить понад 4,35 мільйона

доларів, що підтверджує актуальність цієї проблеми. Сьогодні кіберзлочинність є одним із найактуальніших викликів для бізнесу та суспільства загалом.

Основний матеріал

Штучний інтелект є саме тим інструментом, який дозволяє організаціям вирішувати складні завдання кібербезпеки.

Серед переваг використання ШІ для захисту інформації можна виділити наступні:

1. Автоматизація інформаційних процесів. ШІ можна використовувати для автоматизованого виявлення загроз та відповіді на них, це скорочує час реагування та розвантажує працівників системи захисту.

2. Швидке виявлення аномальних процесів. Завдяки ШІ скануються великі інформаційні масиви на нестандартні дані чи ситуації, які можуть вказувати на спроби несанкціонованого доступу.

3. Підвищення результативності шифрування. ШІ сприяє створенню більш криптостійких шифрів.

Але, проблема інформаційної безпеки з використанням штучного інтелекту враховує як його переваги, так і потенційні обмеження. Використання ШІ дозволяє забезпечити проактивний захист даних, підвищуючи адаптивність і точність систем кібербезпеки.

У дослідженні пропонується виконати розробку, моделювання та впровадження інтелектуальної системи аналізу поведінки користувачів для запобігання витокам інформації з використанням технологій штучного інтелекту.

Глибинне навчання (Deep Learning) є однією з найбільш перспективних технологій для аналізу складних даних і виявлення прихованих закономірностей у сфері інформаційної безпеки. Його здатність адаптуватися до змін у кіберсередовищі та обробляти великі обсяги даних у реальному часі робить цю технологію надзвичайно ефективною у запобіганні витокам інформації та протидії кіберзагрозам.

У сучасних умовах кібербезпеки, аналіз поведінки користувачів (UBA, User Behavior Analytics) є важливим підходом для виявлення загроз і запобігання витокам даних. UBA використовує алгоритми машинного навчання для моніторингу дій користувачів, виявлення аномалій і створення профілів поведінки. Виявлення аномалій у поведінці користувачів представлено на рис.1. Це дозволяє системам реагувати на внутрішні ризики, які традиційні методи захисту часто ігнорують.



Рисунок 1 – Використання глибинного навчання для виявлення аномалій у поведінці користувачів

Ефективність системи запобігання витокам даних значною мірою залежить від якості та обсягу зібраної інформації. Збір та обробка даних є важливими етапами, що забезпечують основу для подальшого аналізу і виявлення аномалій. Для системи на основі ШІ, спрямованої на виявлення аномалій, необхідні різноманітні дані, які охоплюють інформацію про діяльність користувачів, поведінкові патерни, мережевий трафік та логи системи. Основні джерела даних включають: Лог-файли системи; Мережевий трафік; Історії дій користувачів.

Велике значення має попередня обробка даних в інтелектуальних системах захисту від витоків даних на основі аналізу поведінки користувачів (UEBA). Ці системи використовують машинне навчання та глибинне навчання для забезпечення точного виявлення аномалій, що дозволяє зменшити

кількість хибнопозитивних спрацьовувань та підвищити ефективність реакції на загрози.

Перспективи розвитку систем ШІ у сфері інформаційної безпеки є надзвичайно широкими. Інтеграція з технологіями розширеної аналітики відкриває можливості не лише для виявлення аномалій, але й для прогнозування потенційних загроз. Наприклад, використання прогностичної аналітики дозволяє системам передбачати сценарії атак на основі аналізу попередніх інцидентів. Це дає змогу підприємствам запобігати кіберзагрозам на ранніх етапах.

Суттєвим напрямом розвитку є впровадження алгоритмів самонавчання, здатних адаптуватися до змін у середовищі. Завдяки цьому системи можуть ефективно протидіяти атакам типу "zero-day", які є невідомими для традиційних рішень. Інтеграція таких технологій дозволяє створювати проактивний захист, що є критичним у динамічному цифровому середовищі.

В роботі була виконана оцінка ефективності різних алгоритмів ML у реальному середовищі з урахуванням таких параметрів, як точність виявлення загроз, швидкість

реагування та ресурсомісткість.

Для проведення дослідження використовувалися реальні корпоративні дані, які були поділені на навчальну та тестову вибірки. Використано три основних підходи:

1. Класифікаційні алгоритми (SVM, Decision Trees) для створення профілів поведінки користувачів.

2. Глибинні нейронні мережі (CNN, LSTM) для аналізу великих обсягів даних і виявлення прихованих закономірностей.

3. Комбіновані підходи, що використовують переваги як простих класифікаторів, так і нейронних мереж.

Результати дослідження показали, що ефективність алгоритмів варіюється залежно від типу завдань. Наприклад, для швидкого виявлення нетипової активності на робочих станціях найбільш ефективними виявилися дерева рішень, які забезпечили:

Точність: 82%. Час реакції: 3 секунди

Однак для складніших загроз, пов'язаних із послідовними аномаліями у великому масиві даних, LSTM продемонстрували значно вищу точність (91%) при середньому часі обробки запиту 7 секунд.

На базі проведеного аналізу було виконано реалізацію та впровадження системи захисту інформації. Архітектура системи захисту інформації побудована за модульним принципом, який забезпечує її гнучкість, масштабованість і простоту інтеграції у корпоративну інфраструктуру. Такий підхід дозволяє адаптувати систему до змін у кіберсередовищі, додаючи нові функціональні компоненти без порушення роботи існуючих. Архітектура системи містить: модуль збору даних, модуль аналізу, модуль виявлення аномалій, модуль автоматичного реагування. Елемент модуля виявлення аномалій представлений на рис. 2.

```
from sklearn.ensemble import IsolationForest

def detect_anomalies(data):
    """
    Виявляє аномалії у наборі даних за допомогою Isolation Forest.
    """
    model = IsolationForest(n_estimators=100, contamination=0.1, random_state=42)
    model.fit(data)
    predictions = model.predict(data)
    anomaly_indices = [i for i, x in enumerate(predictions) if x == -1]
    print(f"Виявлено {len(anomaly_indices)} аномалій.")
    return anomaly_indices
```

Рисунок 2 – Виявлення аномалій

Висновки. Таким чином, використання штучного інтелекту у сфері інформаційної безпеки демонструє значні переваги, забезпечуючи більш високий рівень захисту та адаптивність у динамічному кіберсередовищі. Водночас виклики, пов'язані з його впровадженням, вимагають подальших досліджень і вдосконалень, щоб максимально розкрити потенціал цієї технології.

Підсумовуючи, успішне впровадження системи ШІ для інформаційної безпеки вимагає системного підходу. Розв'язання викликів, пов'язаних із сумісністю, ресурсами, якістю даних, підготовкою персоналу та

конфіденційністю, дозволяє організаціям отримати максимальну користь від інноваційних рішень і створити безпечне інформаційне середовище.

ЛІТЕРАТУРА

1. Богуш В.М., Богуш В.В., Бровко В.Д., Настратін В.П. Основи кіберпростору, кібербезпеки та кіберзахисту. Київ: Ліра-К, 2021. 554с.
2. CISCO Annual Cybersecurity Report. (2023). "Analytics in Modern Data Security". Retrieved from <https://cisco.com>.
3. Microsoft Azure Security Blog. (2023). "UEBA Solutions: Enhancing Data Security". Retrieved from <https://azure.microsoft.com>.
4. IBM Security Report. (2023). "Cost of a Data Breach". Retrieved from <https://ibm.com>.

CURRENT TRENDS IN THE USE OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN CYBERSECURITY

Vdovychenko I.N.

Abstract. *The presented study is one of the steps in understanding and optimizing security systems that use AI to counter unforeseen cyber threats and ensure security against information leakage in the enterprise.*

Modern security methods in the context of data leakage prevention are analyzed, and the relevance of using artificial intelligence in this process is also considered. The advantages of using AI for information protection are investigated. The study emphasizes that the effectiveness of a data leakage prevention system largely depends on the quality and volume of information collected from such basic data sources as system log files, network traffic, and user action histories.

Three main approaches were used to conduct the study: SVM, CNN, LSTM and their combinations, and their effectiveness was tested.

Keywords: *artificial intelligence, cyber threats, information leakage, protection, anomalous processes, analysis.*

REFERENCE

1. Bohush V.M., Bohush V.V., Brovko V.D., Nastradin V.P. Osnovy kiberprostoru, kiberbezpeky ta kiberzakhystu. Kyiv: Lira-K, 2021. 554s.
2. CISCO Annual Cybersecurity Report. (2023). "Analytics in Modern Data Security". Retrieved from <https://cisco.com>.
3. Microsoft Azure Security Blog. (2023). "UEBA Solutions: Enhancing Data Security". Retrieved from <https://azure.microsoft.com>.
4. IBM Security Report. (2023). "Cost of a Data Breach". Retrieved from <https://ibm.com>.

МАТЕМАТИКО-КОГНІТИВНА ОСНОВА ДЛЯ СИСТЕМАТИЗАЦІЇ ОНТОЛОГІЧНИХ ВІДНОШЕНЬ

Галушка О.В.¹, Шинкаренко В.І.²

¹Український державний університет науки і технологій, аспірант, Україна

²Український державний університет науки і технологій, д.т.н, професор, Україна

Анотація. У даній роботі проаналізовано способи та підходи до систематизації онтологічних відношень, що базуються на інтеграції їх математичних властивостей, когнітивної та семантичної природи. Відношення розглядаються як множини кортежів певної арності, що задають зв'язки між елементами. Алгебра відношень допомагає зрозуміти смислові закономірності цих зв'язків і узагальнити правила їхнього комбінування. Аналізуються базові відношення, сформовані шляхом узагальнення образних когнітивних схем, та похідні від них. Також розглядаються синтетичні та мета-відношення (відношення між відношеннями). Особлива увага приділяється логічній композиції відношень і властивостям цього процесу. Окремо звернено увагу на зв'язок між базовими відношеннями, які є результатом узагальнення сенсорного досвіду сприйняття інформації, та відношеннями, синтезованими штучно з використанням аксіоматики на рівні онтології та комбінування на основі формальної логіки. Запропонована таксономія орієнтована на впорядкування множини відношень для формування універсальних і несуперечливих онтологій, які можуть застосовуватися у різних предметних областях.

Ключові слова. Онтологія, таксономія, відношення, образні схеми, формалізація знань, семантика, алгебра відношень.

Вступ. Розробка онтологій стикається із серйозною проблемою: через нескінченну кількість можливих онтологічних відношень та великого об'єму розробленої онтології з'являється її невпорядкованість, що призводить до суперечливості описаних знань, та неможливості підтримки такої онтології. За умов, коли інформаційні системи вимагають високої ступені структурованості та логічної несуперечливості, з'являється необхідність у чіткому

методологічному підході для впорядкування цих відношень. Запропонований матеріал спрямований на вирішення цієї проблеми шляхом розробки математико-когнітивної основи для систематизації онтологічних відношень.

Основний матеріал. Відношення розглядаються як множини кортежів певної арності. Транзитивність, рефлексивність та симетричність є фундаментальними властивостями відношень у математичному сенсі [1]. Саме ці властивості та їх комбінації визначають семантичну і когнітивну природу відношень у контексті логіки, на базі якої будуються виводи в онтологіях. Висновки щодо цих властивостей спираються на алгебру відношень (зокрема, роботи А. Тарського[2]), що дозволяє формалізувати композицію, обернення і комбінування відношень, а також на теорію категорій, де відношення розглядаються як морфізми заданими на множині об'єктів.

Виділяються базові відношення [3], що ґрунтуються на сенсорному досвіді людини й представлені образними схемами [4, 5, 6]: «частина-ціле», «контейнер», «шлях», «вгору-вниз», «сила» тощо. Вони формуються шляхом узагальнення від конкретної сенсорної інформації до абстрактних образних схем, які, у свою чергу, набувають формального вигляду відношень з визначеною семантикою. Таким чином, напрямок узагальнення для базових відношень веде від інформації до семантики. Похідні відношення, навпаки, формуються як результат уточнення вже наявних абстрактних відношень шляхом додавання контексту, метаданих або аксіоматичних обмежень, тобто напрямок узагальнення для них йде у зворотному порядку – від семантики до конкретизації.

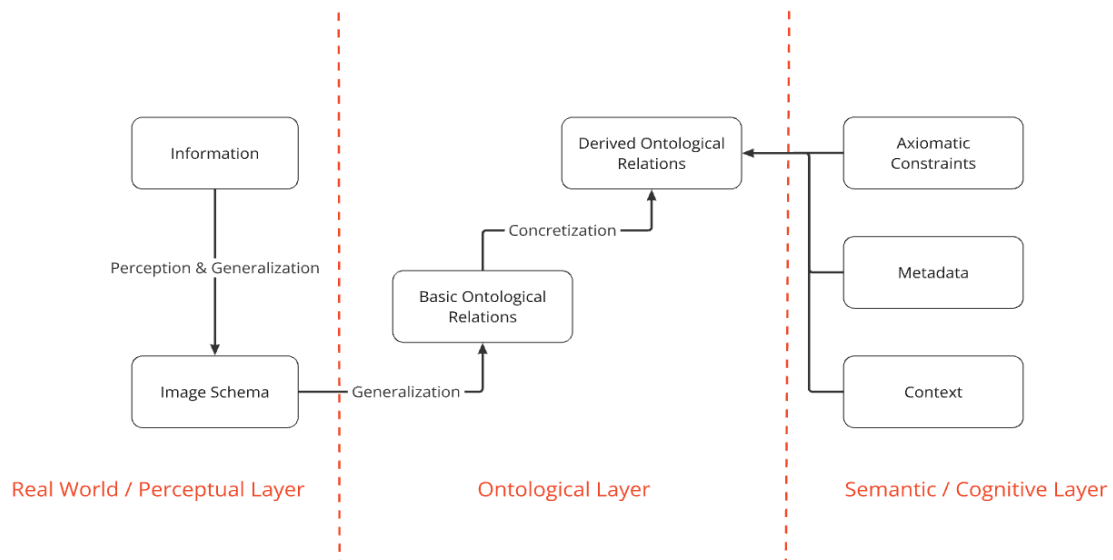


Рисунок 1 – Базові та похідні онтологічні відношення

Окрема увага приділяється синтетичним відношенням, які утворюються як композиції інших відношень на основі формальних правил логіки першого порядку [7]. Прикладом є відношення «більше або дорівнює», яке формується як поєднання відношень «більше» та «дорівнює». Синтетичні відношення мають особливе положення, оскільки на відміну від базових узагальнених відношень, що виникають із сенсорного сприйняття та образних схем, вони є продуктом логічного конструювання. Такі відношення перебирають частину властивостей своїх складових: наприклад, якщо обидва відношення є транзитивними, то їх логічна композиція також є транзитивною. Однак, у випадку конфлікту властивостей (наприклад, симетрії та антисиметрії), таке відношення не перебирає жодну з конфліктуючих властивостей. Таким чином, логічне конструювання відношень схоже на інтерференцію по наявним властивостям.

Проаналізовано прояви відношень у різних модальностях людського сприйняття, зокрема у візуальній, слуховій та тактильній сферах. Продемонстровано, що просторові та часові відношення можуть бути осмислені як структурно споріднені через універсальні когнітивні образні схеми. Зокрема, відношення «ліворуч» у просторі та «раніше» в часі є проявами однієї й тієї ж узагальненої схеми порядку або впорядкування. Іншим прикладом такого узагальнення є відношення «вище-нижче» у просторі [8] та

«вище-нижче» в ієрархічному вимірі, наприклад, у соціальних чи організаційних структурах («вище за посадою»). У першому випадку це просторове розміщення об'єктів, що сприймається сенсорно, у другому – абстрактний порядок, який відображає підпорядкування або відмінність у статусі. Таким чином, когнітивна основа багатьох базових відношень є універсальною, а їх модальне вираження (в просторі, часі, смислового вираженні) лише конкретизує загальну логіку впорядкування, що зумовлює семантичну єдність цих зв'язків.

Існують також мета-відношення – відношення між самими відношеннями. Як правило, такі відношення задаються аксіоматично [9] на рівні онтології, забезпечуючи її внутрішню узгодженість і логічну несуперечливість. Прикладами мета-відношень є інверсія (наприклад, відношення `hasParent` і його обернене `hasChild`), композиція (наприклад, відношення `uncleOf`, яке формується як композиція `brotherOf` і `parentOf`), ієрархія відношень (відношення спеціалізації, наприклад, «`isA`» як субвідношення до більш загального «`relatedTo`»), та еквівалентність (встановлення тотожності між різними формулюваннями одного й того ж зв'язку). Мета-відношення виконують роль механізму, який дозволяють формувати надбудову над множиною відношень створюючи основи для формального аналізу сумісності і виводу фактів в рамках онтології.

Висновки. Розроблена систематизація онтологічних відношень [10] є основою для побудови універсальної системи онтологічних моделей, які можуть бути використані для формалізації знань у різних сферах діяльності – від науки до інженерії знань. Вона дозволяє навести порядок у великій кількості відношень, ґрунтуючись на їх математичних, семантичних та когнітивних властивостях, і тим самим створити єдиний каркас для узгодженого представлення знань. Запропонована таксономія допомагає уникати протиріч в онтологіях, підвищуючи їх логічну узгодженість. Таким чином, така систематизація є не лише теоретичним підходом до класифікації відношень, але й практичним керівництвом для побудови гнучких онтологій,

які можуть легко оновлюватися та використовуватися в реальних інформаційних системах для обробки знань.

ЛІТЕРАТУРА

1. Russell, B. (2020). Principles of mathematics. Routledge.
2. Tarski, A. (1994). Introduction to Logic and to the Methodology of the Deductive Sciences (Vol. 24). Oxford university press.
3. Herre, H., Heller, B., Burek, P., Hoehndorf, R., Loebe, F., & Michalek, H. (2006). General formal ontology (GFO). Part I: Basic Principles. Onto-Med Report, 8.
4. Lakoff, G., & Johnson, M. (2008). Metaphors we live by. University of Chicago press.
5. Johnson, M. (2013). The body in the mind: The bodily basis of meaning, imagination, and reason. University of Chicago press.
6. Hoffman, D. D., Singh, M., & Prakash, C. (2015). The interface theory of perception. Psychonomic bulletin & review, 22, 1480-1506.
7. Sowa, J. F. (2000). Knowledge Representation: Logical, Philosophical, and Computational Foundations. Brooks/Cole.
8. Hayes, P. J. (1989). Naive physics I: Ontology for liquids. In Readings in qualitative reasoning about physical systems (pp. 484-502).
9. Baader, F., Horrocks, I., & Sattler, U. (2008). Description logics. Foundations of Artificial Intelligence, 3, 135-179.
10. Guarino, N., & Welty, C. (2002). Evaluating ontological decisions with OntoClean. Communications of the ACM, 45(2), 61-65.

MATHEMATICAL AND COGNITIVE FOUNDATION FOR THE SYSTEMATIZATION OF ONTOLOGICAL RELATIONS

Oleksandr Halushka, Viktor Shynkarenko

Abstract. *This paper analyzes the methods and approaches for the systematization of ontological relations, based on the integration of their mathematical properties, cognitive foundations, and semantic nature. Relations are considered as sets of tuples of a given arity that define links between elements. Relation algebra helps to understand the semantic patterns underlying these connections and to generalize the rules of their composition. The study examines fundamental relations formed by generalizing image-based cognitive schemas and derived relations based on them. Synthetic and meta-relations (relations between relations) are also considered. Special attention is given to the logical composition of relations and the properties of this process. The paper highlights the connection between basic relations, which emerge from the generalization of sensory experience, and relations artificially synthesized using axiomatic definitions at the ontology level and formal logic-based composition. The proposed taxonomy is aimed at organizing sets of relations to support the construction of universal and consistent ontologies applicable across various domains.*

Keywords: *Ontology, taxonomy, relations, image schemas, knowledge formalization, semantics, relation algebra.*

REFERENCE

1. Russell, B. (2020). Principles of mathematics. Routledge.
2. Tarski, A. (1994). Introduction to Logic and to the Methodology of the Deductive Sciences (Vol. 24). Oxford university press.
3. Herre, H., Heller, B., Burek, P., Hoehndorf, R., Loebe, F., & Michalek, H. (2006). General formal ontology (GFO). Part I: Basic Principles. *Onto-Med Report*, 8.
4. Lakoff, G., & Johnson, M. (2008). *Metaphors we live by*. University of Chicago press.
5. Johnson, M. (2013). *The body in the mind: The bodily basis of meaning, imagination, and reason*. University of Chicago press.
6. Hoffman, D. D., Singh, M., & Prakash, C. (2015). The interface theory of perception. *Psychonomic bulletin & review*, 22, 1480-1506.
7. Sowa, J. F. (2000). *Knowledge Representation: Logical, Philosophical, and Computational Foundations*. Brooks/Cole.
8. Hayes, P. J. (1989). Naive physics I: Ontology for liquids. In *Readings in qualitative reasoning about physical systems* (pp. 484-502).
9. Baader, F., Horrocks, I., & Sattler, U. (2008). Description logics. *Foundations of Artificial Intelligence*, 3, 135-179.
10. Guarino, N., & Welty, C. (2002). Evaluating ontological decisions with OntoClean. *Communications of the ACM*, 45(2), 61-65.

АНАЛІЗ НАСТРОЇВ КОРИСТУВАЧІВ TWITTER НА ОСНОВІ ТЕКСТОВИХ ДАНИХ З ВИКОРИСТАННЯМ ЗГОРТКОВОЇ НЕЙРОННОЇ МЕРЕЖІ

Гнатушенко В.В.¹, Каштан В.Ю.², Овчаренко М.А.³, Іванько А.М.⁴

¹Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», ¹д.т.н., проф.,
Україна

²Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», к.т.н., доц.,
Україна

³Національний технічний університет ³«Дніпровська політехніка», Україна

⁴Національний технічний університет ⁴«Дніпровська політехніка», Україна

Анотація. Розглянуто застосування згорткових нейронних мереж (CNN) для аналізу настроїв користувачів на основі текстових даних соціальної мережі Twitter. Актуальність роботи зумовлена зростаючим обсягом неструктурованих текстових даних у соціальних мережах та необхідністю їх ефективної обробки для розуміння громадської думки. Запропонована модель CNN включає представлення текстових даних у векторному просторі, згорткові та пулінгові шари для вилучення релевантних ознак, а також повністю зв'язані шари для класифікації настроїв на позитивні та негативні. Для запобігання перенавантаженню застосовано шари випадкового виключення нейронів (Dropout). Експериментальна оцінка моделі проводилася на спеціально підготовленому наборі даних із Twitter. Результати тестування демонструють перспективність використання CNN для автоматизованого аналізу настроїв користувачів соціальних мереж.

Ключові слова: настрої користувачів, згорткова мережа, неструктуровані дані.

Актуальність дослідження, представленого в даній роботі, зумовлена необхідністю обробки неструктурованої текстової інформації, сформованої в результаті користувацької активності в соціальних мережах, зокрема на платформі Twitter. У цьому контексті особливого значення набуває задача аналізу настроїв користувачів за текстовими повідомленнями, яка дозволяє отримати цінну інформацію про поведінкові тенденції користувачів та їхню реакцію на актуальні події. Велика кількість таких даних ускладнює застосування традиційних методів аналізу та потребує переходу до інтелектуальних методів автоматизованої обробки, таких як глибинне навчання і обробка природної мови [1]. Використання згорткових нейронних мереж (CNN) у задачах аналізу тексту відкриває нові можливості для

високоточної класифікації емоційних станів, що є важливим як для бізнес-аналітики, так і для соціально-гуманітарних досліджень. Однією з переваг CNN є здатність обробляти багатовимірні дані, що робить ці мережі ефективними для роботи з неструктурованими даними.

В роботі використано CNN модель для аналізу настроїв користувачів за текстовими наборами даних. Для реалізації цього завдання в роботі використано текстові набори даних із соціальної мережі Twitter [2]. Модель CNN для класифікації настроїв складається з кількох шарів. Початковий шар векторних представлень перетворює ціле число з словника в векторне представлення, з вхідною розмірністю 5000 (розмір словника) і виходом 50-вимірних векторів. Наступним шаром у моделі застосовується шар випадкового виключення нейронів (Dropout), який є методом регуляризації, спрямованим на запобігання перенавчанню. Під час навчання цей шар випадковим чином встановлює значення 20% вхідних нейронів на нуль. Згортковий шар (Conv1D) використовує 250 фільтрів із розміром ядра 3 для обробки послідовностей векторних представлень, застосовуючи функцію активації ReLU (Rectified Linear Unit). Операція глобального макспулінгу (GlobalMaxPooling1D) вздовж часової осі зменшує розмірність вихідних ознакових карт згорткового шару, обираючи максимальне значення для кожної карти. Наступним компонентом є повністю зв'язаний (Dense) шар, що складається з 250 нейронів з функцією активації ReLU, забезпечуючи повне з'єднання між усіма елементами попереднього шару та нейронами поточного. Для подальшої регуляризації додано шар Dropout з коефіцієнтом 0.2 під час тренування. Вихідним є щільний (Dense) шар із трьома нейронами та функцією активації Softmax для здійснення багатокласової класифікації вхідних даних, що відповідають категоріям настроїв: позитивний та негативний. Для оптимізації процесу навчання обрано оптимізатор Adam [3], що забезпечує стабільне навчання навіть при великій кількості параметрів і складних структурах даних.

У ході проведення експериментальних досліджень порівняно дві моделі згорткових нейронних мереж для класифікації настроїв: стандартну модель

CNN та модель з оптимізатором Adam. Для оцінки ефективності класифікації були використані основні метрики, зокрема точність, повнота та F1-міра [4]. Стандартна модель CNN показала результати з високими значеннями точності (0.84) та повноти (0.85) для позитивного настрою користувача, що свідчить про її здатність правильно класифікувати позитивні настрої. Проте її F1-міра позитивного настрою користувача (0.83) свідчить про певну дисбалансованість між точністю і повнотою. Використання оптимізатора Adam в CNN моделі підвищило точність до 0.85 і повноту до 0.84, що підтверджує покращену здатність моделі правильно класифікувати позитивні настрої.

Висновки. У роботі використано модель згорткової нейронної мережі для аналізу настроїв користувачів на основі текстових даних із Twitter. Проведено перетворення слів на числові вектори, що дозволило передати текстову інформацію у зручний формат для навчання. Модель була оцінена за допомогою метрик: точність, повнота та F1-міра, що продемонструвало її високу ефективність у класифікації настроїв. Використання оптимізатора Adam дозволило досягти більш стабільного навчання та кращої збіжності моделі, навіть при великій кількості параметрів. Це відкриває нові можливості для практичного застосування таких моделей у реальних завданнях, таких як моніторинг суспільних настроїв у соціальних мережах, маркетингові дослідження та політичний аналіз.

ЛІТЕРАТУРА

- 1.Salloum, S.A., et al. Using text mining techniques for extracting information from research articles, in Intelligent natural language processing: Trends and Applications. – 2018, Springer. P. 373-397
- 2.Coronavirus tweets NLP [Електронний ресурс]: <https://www.kaggle.com/datasets/datatattle/covid-19-nlp-text-classification>.
- 3.Saxena P., Sharma S. Systematic Literature Review for Sentiment Analysis Using Big Data social media Streams. In Proceedings of the 2022 5th International Conference on Contemporary Computing and Informatics (IC3I), Uttar Pradesh, India, 14–16 December 2022.
- 4.Tiwari, D., Nagpal, B., Bhati, B.S. et al. A systematic review of social network sentiment analysis with comparative study of ensemble-based techniques. Artif Intell Rev 56. – 2023, P. 13407–13461.

ANALYSIS OF TWITTER USERS' SENTIMENT BASED ON TEXT DATA USING CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORK

Hnatushenko V., Kashtan V., Ovcharenko M., Ivanko A.

Abstract. *The article considers using convolutional neural networks (CNN) to analyze user sentiment on the Twitter platform based on text data. The relevance of the work is due to the growing amount of unstructured text data in social networks and the need for their effective processing to understand public opinion. The proposed CNN model includes representing text data in vector space, convolutional and pooling layers for extracting relevant features, and fully connected layers for classifying sentiment into positive and negative. To prevent overfitting, we applied the Dropout layers to exclude neurons randomly. An experimental evaluation of the model was conducted on a specially prepared dataset from Twitter. The test results demonstrate the prospects of using CNN for automated analysis of social media users' sentiments.*

Keywords: *user sentiment, convolutional network, unstructured data.*

REFERENCE

- 1.Salloum, S.A., et al. Using text mining techniques for extracting information from research articles, in Intelligent natural language processing: Trends and Applications. – 2018, Springer. P. 373-397
- 2.Coronavirus tweets NLP [Электронный ресурс]: <https://www.kaggle.com/datasets/datatattle/covid-19-nlp-text-classification>.
- 3.Saxena P., Sharma S. Systematic Literature Review for Sentiment Analysis Using Big Data social media Streams. In Proceedings of the 2022 5th International Conference on Contemporary Computing and Informatics (IC3I), Uttar Pradesh, India, 14–16 December 2022.
- 4.Tiwari, D., Nagpal, B., Bhati, B.S. et al. A systematic review of social network sentiment analysis with comparative study of ensemble-based techniques. Artif Intell Rev 56. – 2023, P. 13407–13461.

DOI: 10.34185/1991-7848.itmm.2025.01.095

АВТОМАТИЧНА СЕМАНТИЧНА СЕГМЕНТАЦІЯ ЗОБРАЖЕНЬ SENTINEL-2: ІНТЕГРАЦІЯ МЕТОДІВ КЛАСТЕРИЗАЦІЇ ТА ВЕЛИКИХ МОВНИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ІНТЕРПРЕТАЦІЇ КЛАСТЕРІВ

Гончаров О. Г.¹, Гнатушенко В. В.²

¹Український державний університет науки і технології, аспірант, Україна

²Український державний університет науки і технології, доктор технічних наук,
професор, Україна

Анотація. Семантична сегментація супутникових зображень, зокрема даних Sentinel-2, є важливим інструментом екологічного моніторингу та управління земними ресурсами. У роботі запропоновано метод автоматичної класифікації земного покриття без використання маркованих даних. Підхід ґрунтується на поєднанні кластеризації (K-Means, DBSCAN, автоенкодеру) та мультимодального маркування за допомогою великих мовно-візуальних моделей (GPT-4, Claude, Gemini 2.0 тощо). Інтерпретація кластерів здійснюється на основі візуалізацій, що автоматично аналізуються моделями. Методологія дозволяє досягти точності сегментації на рівні 85–90%, порівнянної з супервізованими підходами, та забезпечує інтерпретованість і масштабованість. Система також підтримує нормалізацію термінів і голосування кількох моделей для підвищення надійності. Результати валідуються з використанням карт ESA WorldCover. Підхід є перспективним для швидкого картографування в умовах обмежених ресурсів.

Ключові слова: семантична сегментація, кластеризація, Sentinel-2, земний покрив, мультимодальні моделі

Семантична сегментація супутникових зображень, зокрема даних Sentinel-2, є критично важливою для картографування земного покриття та екологічного моніторингу. Проте отримання анотацій на рівні пікселів для навчання моделей сегментації є трудомістким і дорогим процесом. У цій роботі пропонується новий підхід до автоматизації класифікації земного покриття шляхом інтеграції невизначених методів кластеризації з великими мультимодальними моделями (Anthropic Claude, OpenAI GPT, Google Gemini 2.0, QWEN 2.5-VL, Phi-4).

Мета дослідження — розробка методології для автоматичної сегментації та класифікації земного покриття на зображеннях Sentinel-2 без потреби у маркованих навчальних даних.

Методи дослідження: проведено огляд існуючих підходів до невизначеної сегментації зображень Sentinel-2 і кластеризації — від традиційних (K-Means, DBSCAN) до глибоких нейронних мереж (автоенкодера, U-Net). Запропонована методологія об'єднує кластеризацію супутникових зображень з автоматичним маркуванням кластерів за допомогою мультимодальних моделей. Для кожного кластера формується візуалізація, яка передається до моделей для інтерпретації класу земного покриву.

Алгоритм складається з трьох етапів: (1) підготовка даних Sentinel-2 L2A, включно з маскуванням хмар, вибором спектральних каналів (окрім атмосферних) та обчисленням вегетаційних індексів; (2) кластеризація пікселів методом K-Means, DBSCAN, автоенкодера з K-Means або попередньої сегментації з U-Net/SAM; (3) автоматичне маркування кластерів за допомогою мультимодальних моделей, які отримують зображення із виділеним кластером і визначають його категорію на основі просторового контексту та кольору.

Для узгодження відповідей моделей із заданими класами (вода, рослинність, міська забудова тощо) реалізовано механізм нормалізації термінів і голосування більшості при використанні кількох моделей. Для валідації використовуються карти ESA WorldCover. Аналізується вплив вибору кластеризаційної стратегії на якість сегментації.

Очікувані результати: комбінація автоенкодера з K-Means дозволить фіксувати тонкі спектральні відмінності, мультимодальні моделі — точно інтерпретувати класи, а ансамбль моделей — підвищити стабільність класифікації. Прогнозована точність сегментації основних класів — 85–90%, що порівнянно з результатами супервізованих методів.

Переваги: метод не вимагає навчальних даних, гнучкий щодо джерел зображень, не прив'язаний до регіону, забезпечує інтерпретованість кластерів і підвищену автоматизацію процесу класифікації. Методологія перспективна для швидкого картографування в умовах обмежених ресурсів або надзвичайних ситуацій.

Висновки. Запропоновано інноваційний підхід до семантичної сегментації зображень Sentinel-2 на основі кластеризації та мультимодального

маркування. У подальших дослідженнях планується: 1) провести експериментальну верифікацію; 2) оптимізувати візуалізацію кластерів; 3) додати зворотній зв'язок моделей; 4) перевірити можливість використання отриманих анотацій для навчання моделей типу U-Net.

ЛІТЕРАТУРА

- 1.Zhang, S., Wang, Q., Liu, J., & Xiong, H. (2024). ALPS: An Auto-Labeling and Pre-training Scheme for Remote Sensing Segmentation With Segment Anything Model. arXiv preprint. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2406.10855>
- 2.Nagar, S., Farahbakhsh, E., Awange, J., & Chandra, R. (2024). Remote sensing framework for geological mapping via stacked autoencoders and clustering. *Advances in Space Research*, 74(10), 4502–4516. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2024.09.013>
- 3.Osco, L. P., de Lemos, E. L., Gonçalves, W. N., Ramos, A. P. M., & Junior, J. M. (2023). The Potential of Visual ChatGPT For Remote Sensing. arXiv preprint. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2304.13009>
- 4.Radford, A., Kim, J. W., Hallacy, C., Ramesh, A., Goh, G., Agarwal, S., Sastry, G., Askell, A., Mishkin, P., Clark, J., Krueger, G., & Sutskever, I. (2021). Learning Transferable Visual Models from Natural Language Supervision. arXiv preprint. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2103.00020>
- 5.Duan, X., Huang, X., & Zhang, L. (2015). Unsupervised Global Urban Area Mapping via Automatic Labeling from ASTER and PALSAR Satellite Images. *Remote Sensing*, 7(2), 2171–2192. <https://doi.org/10.3390/rs70202171>

AUTOMATIC SEMANTIC SEGMENTATION OF SENTINEL-2 IMAGES: INTEGRATION OF CLUSTERING AND LARGE MULTIMODAL MODELS FOR CLUSTER INTERPRETATION

Honcharov O.H., Hnatushenko V.V.

Abstract. *Semantic segmentation of satellite imagery, particularly Sentinel-2 data, is crucial for environmental monitoring and land cover mapping. This paper presents an unsupervised method for land cover classification that eliminates the need for pixel-level annotations. The approach combines clustering techniques (K-Means, DBSCAN, autoencoders) with automated cluster labeling using large vision-language models (e.g., GPT-4, Claude, Gemini 2.0). Clusters are visualized and interpreted by these models based on spatial context and color. The methodology achieves segmentation accuracy of 85–90%, comparable to supervised methods, while ensuring interpretability and scalability. A majority voting mechanism and terminology normalization improve consistency across model outputs. Validation is performed using ESA WorldCover maps. The proposed approach is promising for rapid land cover mapping in resource-constrained or emergency situations.*

Keywords: *semantic segmentation, clustering, Sentinel-2, land cover, multimodal models*

REFERENCE

1. Zhang, S., Wang, Q., Liu, J., & Xiong, H. (2024). ALPS: An Auto-Labeling and Pre-training Scheme for Remote Sensing Segmentation With Segment Anything Model. arXiv preprint. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2406.10855>
2. Nagar, S., Farahbakhsh, E., Awange, J., & Chandra, R. (2024). Remote sensing framework for geological mapping via stacked autoencoders and clustering. *Advances in Space Research*, 74(10), 4502–4516. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2024.09.013>
3. Osco, L. P., de Lemos, E. L., Gonçalves, W. N., Ramos, A. P. M., & Junior, J. M. (2023). The Potential of Visual ChatGPT For Remote Sensing. arXiv preprint. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2304.13009>
4. Radford, A., Kim, J. W., Hallacy, C., Ramesh, A., Goh, G., Agarwal, S., Sastry, G., Aspell, A., Mishkin, P., Clark, J., Krueger, G., & Sutskever, I. (2021). Learning Transferable Visual Models from Natural Language Supervision. arXiv preprint. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2103.00020>
5. Duan, X., Huang, X., & Zhang, L. (2015). Unsupervised Global Urban Area Mapping via Automatic Labeling from ASTER and PALSAR Satellite Images. *Remote Sensing*, 7(2), 2171–2192. <https://doi.org/10.3390/rs70202171>

ВИКОРИСТАННЯ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ РЕАЛЬНОГО ЧАСУ У СИСТЕМАХ ВИЯВЛЕННЯ МЕРЕЖЕВИХ ВТОРГНЕНЬ

Горбатов В.С.¹, Журба А.О.²

¹УДУНТ, аспірант, Україна

²УДУНТ, кандидат технічних наук, доцент, Україна

Анотація. В роботі розглянуто нагальні обмеження сучасних систем виявлення вторгнень (NIDS), які зазвичай базуються на статичних текстових правилах. Такий підхід перешкоджає виявленню нових або модифікованих атак, оскільки зловмисники можуть легко обійти ці статичні правила за допомогою мінімальних модифікацій. Як перспективний напрям розглянуто впровадження нейронних мереж, оснащених можливостями онлайн-навчання. Проаналізовано декілька найсучасніших рішень, у тому числі Online Sequential Extreme Learning Machine (OS-ELM), T-DFNN і різні інкрементні моделі глибоких нейронних мереж, усі з яких демонструють здатність адаптуватися в реальному часі. Робота не лише узагальнює поточні методології, але й підкреслює значний потенціал онлайн-навчання для підвищення ефективності та гнучкості систем кібербезпеки, зокрема в динамічному виявленні zero-day загроз.

Ключові слова: нейронні мережі, онлайн-навчання, NIDS, виявлення вторгнень, інкрементальне навчання, кібербезпека, Extreme Learning Machine, T-DFNN.

Зі зростанням кількості та різноманітності рішень, що використовуються в сфері інформаційних технологій, одночасно зростає й варіативність мережових атак, які можуть бути непомітно вбудовані, на перший погляд, в безпечний трафік. Системи виявлення мережових вторгнень (NIDS) розроблені для виявлення та зупинення таких атак, проте більшість сучасних корпоративних NIDS базуються на текстових правилах, які спрямовані на конкретні атаки [1].

Правила є статичними, заздалегідь заданими наборами патернів або умов, написаними спеціалістами з мережової безпеки. Проте цей підхід ускладнює процес виявлення атак, оскільки текстові патерни, орієнтовані на конкретну атаку, можна легко обійти, мінімально змінивши програмний код[2]. Тож, інженери мережової безпеки повинні писати правила таким чином, щоб вони були не занадто вузько спрямовані і не занадто загальні. А враховуючи ширину

можливостей сучасних мов програмування і методів обфускації, зробити правило таким стає задачею, що майже не виконується.

Потенційним шляхом вирішення проблеми з правилами є нечіткий текстовий пошук з використанням нейро-нечітких мереж. Такі системи існують на даний час [3], але вони обмежені моделлю, яку складно оновлювати і навчити на всіх вже існуючих атаках. Тож наразі є декілька робіт, що пропонують інтеграцію так званих нейронних мереж реального часу у системи виявлення мережевих вторгнень.

Нейронна мережа реального часу — це мережа, що може навчатися по ходу роботи програми. Так, у статті «Online Sequential Extreme Learning Machine for Intrusion Detection» [4] було розроблено систему, де застосовано варіант ELM для оперативного виявлення атак. Система демонструє здатність навчатися «на льоту» — з кожним новим зразком мережевого трафіку модель миттєво оновлюється, що дозволяє виявляти невідомі раніше атаки з мінімальними затримками.

Робота [5], у свою чергу, пропонує інший, інкрементальний підхід до навчання мереж для NIDS. T-DFNN — це алгоритм, здатний вивчати нові вторгнення поступово в міру їх появи у мережі. Модель T-DFNN складається з кількох моделей нейронної мережі глибокого прямого зв'язку (DFNN), з'єднаних у деревоподібну структуру. Схожий, але простіший підхід запропоновано у роботі [6], де описано використання двоетапної системи з використанням глибокої нейронної мережі (DNN) і інкрементального навчання (IL). Модель було навчено за допомогою даних CAN на стадії офлайн. Після цього модель оновлюється новими даними за допомогою методів інкрементального навчання на етапі онлайн [7].

Висновки. Сучасні дослідження підтверджують ефективність застосування нейронних мереж з онлайн-навчанням у системах виявлення мережевих вторгнень. Вони здатні адаптуватися до нових загроз у реальному часі, що значно підвищує гнучкість та стійкість NIDS до новітніх атак. Попри це, у сфері корпоративних NIDS все ще домінують системи на основі правил.

ЛІТЕРАТУРА

- 1.Sagar N. Shah, Ms. Purnima Singh. Signature-Based Network Intrusion Detection System Using SNORT And WINPCAP. INTERNATIONAL JOURNAL OF ENGINEERING RESEARCH & TECHNOLOGY (IJERT). 2012. T. 01, № 10.
- 2.Kothamali, P. Reddy & Banik, S. Limitations of Signature-Based Threat Detection. 2022.
- 3.Detecting Zero-days with SnortML White Paper. Cisco. URL: <https://www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/security/firewalls/detecting-zero-days-with-snortml-wp.html> (дата звернення: 13.04.2025).
- 4.Li Y., Qiu R., Jing S. Intrusion detection system using Online Sequence Extreme Learning Machine (OS-ELM) in advanced metering infrastructure of smart grid. PLOS ONE. 2018. T. 13, № 2. C. e0192216. URL: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0192216> (дата звернення: 13.04.2025).
- 5.Data M., Aritsugi M. T-DFNN: An Incremental Learning Algorithm for Intrusion Detection Systems. IEEE Access. 2021. T. 9. C. 154156–154171. URL: <https://doi.org/10.1109/access.2021.3127985> (дата звернення: 13.04.2025).
- 6.Intrusion Detection System Based on Deep Neural Network and Incremental Learning for In-Vehicle CAN Networks / J. Lin та ін. Communications in Computer and Information Science. Singapore, 2022. C. 255–267. URL: https://doi.org/10.1007/978-981-19-0468-4_19 (дата звернення: 13.04.2025).
- 7.Malialis K., Panayiotou C. G., Polycarpou M. M. Nonstationary Data Stream Classification with Online Active Learning and Siamese Neural Networks. Neurocomputing. 2022. URL: <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2022.09.065> (дата звернення: 13.04.2025).

USING REAL-TIME NEURAL NETWORKS IN INTRUSION DETECTION SYSTEMS

Vitalii Gorbатов, Anna Zhurba

Abstract. *This paper addresses the pressing limitations of modern intrusion detection systems (NIDS), which are typically based on predefined text-based rules. Such an approach hinders the detection of new or modified attacks, as these static rules can easily be evaded by attackers using minimal modifications. As a promising direction, the study explores the implementation of neural networks equipped with online learning capabilities. Several state-of-the-art solutions are analyzed, including Online Sequential Extreme Learning Machine (OS-ELM), T-DFNN, and various incremental deep neural network models, all of which demonstrate the ability to adapt in real time. The work not only summarizes current methodologies but also emphasizes the significant potential of online learning to enhance the effectiveness and flexibility of cybersecurity systems, particularly in the dynamic detection of emerging network threats.*

Keywords: *neural networks, online learning, NIDS, intrusion detection, incremental learning, cybersecurity, Extreme Learning Machine, T-DFNN.*

REFERENCE:

- 1.Sagar N. Shah, Ms. Purnima Singh. Signature-Based Network Intrusion Detection System Using SNORT And WINPCAP. INTERNATIONAL JOURNAL OF ENGINEERING RESEARCH & TECHNOLOGY (IJERT). 2012. T. 01, № 10.
- 2.Kothamali, P. Reddy & Banik, S. Limitations of Signature-Based Threat Detection. 2022.
- 3.Detecting Zero-days with SnortML White Paper. Cisco. URL: <https://www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/security/firewalls/detecting-zero-days-with-snortml-wp.html> (date of access: 13.04.2025).
- 4.Li Y., Qiu R., Jing S. Intrusion detection system using Online Sequence Extreme Learning Machine (OS-ELM) in advanced metering infrastructure of smart grid. PLOS ONE. 2018. Vol. 13, no. 2. P. e0192216. URL: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0192216> (date of access: 13.04.2025).
- 5.Data M., Aritsugi M. T-DFNN: An Incremental Learning Algorithm for Intrusion Detection Systems. IEEE Access. 2021. Vol. 9. P. 154156–154171. URL: <https://doi.org/10.1109/access.2021.3127985> (date of access: 13.04.2025).
- 6.Intrusion Detection System Based on Deep Neural Network and Incremental Learning for In-Vehicle CAN Networks / J. Lin et al. Communications in Computer and Information Science. Singapore, 2022. P. 255–267. URL: https://doi.org/10.1007/978-981-19-0468-4_19 (date of access: 13.04.2025).
- 7.Malialis K., Panayiotou C. G., Polycarpou M. M. Nonstationary Data Stream Classification with Online Active Learning and Siamese Neural Networks. Neurocomputing. 2022. URL: <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2022.09.065> (date of access: 13.04.2025).

ОЦІНКА СТАНУ ЗАБРУДНЕННЯ ВОДНИХ ОБ'ЄКТІВ НА ОСНОВІ СПЕКТРАЛЬНИХ ІНДЕКСІВ

Кавац Ю.В.¹, Сергеева К.Л.², Фененко Т.М.³, Дібрій Д.А.⁴

¹ Український державний університет науки і технологій, к.т.н., доцент, Україна

² Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», к.т.н., доцент,
Україна

³ Український державний університет науки і технологій, старший викладач,
Україна

⁴ Український державний університет науки і технологій, аспірант, Україна

Анотація. У дослідженні описано основні забруднювачі водних ресурсів України та методи оцінки ступеня забруднення за допомогою супутникового моніторингу. Супутникові дані дозволяють швидко отримувати дані з високою просторовою роздільною здатністю і великим просторовим покриттям для важкодоступних ділянок земної поверхні. Суттєвим аспектом супутникового моніторингу є можливість отримання інформації про зміни поверхневих вод на основі аналізу їх забруднення. Різномасштабні дані, в тому числі архівні, дають змогу оцінити стан водойм за кілька років. В якості основного масиву даних запропоновано мультиспектральні зображення супутника Sentinel-2, спектральні характеристики яких дозволяють отримати широкий спектр інформації. Проаналізовано приклади застосування дистанційного підходу для оцінки ступеня забруднення водойм на великих територіях. Вказано перспективні методи подальших досліджень для вирішення прикладних задач.

Ключові слова: Водні ресурси, водойми, водний дефіцит, супутниковий моніторинг, оцінка стану забруднення, екологічне навантаження, методи ДЗЗ, спектральні індекси, валідація, Sentinel-2.

Вступ. Україна посідає тридцять друге місце із сорока країн Європи, в яких фіксується нестача водних ресурсів. Запаси води поповнюються переважно через опади, а аномальні температури, які спостерігаються останніми роками в Україні, лише посилює водний дефіцит. За останні десять років кількість опадів в Україні влітку зменшилася на 15–27%, що напряму означає підвищення концентрації забруднення поверхневих вод у водоймах. Слід зазначити, що не лише зовнішні та природні фактори впливають на кількість і якість водних ресурсів в Україні. Господарська діяльність робить

значний внесок у загальну картину стану поверхневих вод і змін водних ресурсів. За даними державної статистики, серед основних забруднювачів водних ресурсів можна відокремити житлово-комунальне господарство (77%), промисловість (22%) та сільське господарство (0.5%). Ці цифри не відображають реального впливу аграрного сектору на водне середовище. Специфіка використання води у сільському господарстві ускладнює підрахунок реального обсягу забруднення. Частина агрохімікатів змивається з полів у водойми з поверхневим чи підземним стоком води. Поверхневі води за своєю природою є динамічним об'єктом, зміни якого впливають на інші природні ресурси та навколишнє середовище. Це обумовлює важливість ефективного визначення обсягу поверхневих вод і відстеження їх динаміки і ступеню забруднення.

Відповідно до Водної рамкової директиви Європейського Союзу (ВРД ЄС) [1], екологічний стан водойм оцінюється на основі трьох основних груп параметрів: гідробіологічних, гідрохімічних і гідроморфологічних [2]. У рамках державної системи моніторингу довкілля України оцінювання якості поверхневих вод ведеться окремо за гідрохімічними й гідробіологічними показниками. Основний принцип аналізу якості водного середовища, що використовується вже тривалий час у водоохоронній практиці, полягає у визначенні в окремих точках водного об'єкта хімічного складу, фізичних властивостей і бактеріологічних показників води та зіставлення результатів з нормативними величинами відповідних показників [1-4]. Враховуючи дороговартість та складність отримання показників, постає актуальна задача по розробці методології оцінки ступеню забруднення водних ресурсів на основі спектральних характеристик супутникових даних.

Основна частина. Останніми роками все більшої популярності набуває використання супутникового моніторингу для вирішення широкого спектру задач оцінки стану навколишнього середовища. Аналіз змін водних ресурсів не став виключенням, оскільки він надає можливість оперативно отримувати інформацію з певною періодичністю. Супутники, обладнані різними оптичними та тепловими датчиками, є перспективними в порівнянні з

вимірюванням на місці, оскільки забезпечують постійно зростаючий потік геопросторових даних з високою роздільною здатністю, що охоплюють великі території, а їх використання є більш економічно доцільним [5]. Дистанційне зондування Землі (ДЗЗ) дозволяє проводити аналіз масштабних території за допомогою спектрального відбиття, яке комбінується у різного роду спектральні індекси. Широкий спектр використання спектральних індексів дозволяє отримувати інформацію про процеси, які проходять у водах поверхневих водойм. Фіксуючи спектральне відбиття за набором різночасових супутникових зображень, можна отримати інформацію про зміни, які відбулися в певний проміжок часу. Один із спектральних індексів, що широко використовується та дозволяє проводити моніторинг змін, пов'язаних із вмістом води у водоймах – Normalized Difference Water Index (NDWI). Оскільки водойми сильно поглинають світло у видимому та інфрачервоному електромагнітному спектрі, NDWI використовує зелені та ближні інфрачервоні смуги для виділення водойм. Він чутливий до присутності забруднюючих домішок та може призвести до не завжди коректного картування водойм. Додатні значення індексу зазвичай відповідають водним об'єктам. Рослинність і забудовані території зазвичай відповідають від'ємним значенням NDWI. Виходячи з вищесказаного для оцінки стану забрудненості водних об'єктів обрано використання спектрального водного індексу, який дозволяє оцінити ступінь каламутності води – Normalized Difference Turbidity Index (NDTI). Каламутність означає ступінь оптичної прозорості води. Хоча індекс не пов'язаний строго із зависями, вмістом хлорофілу чи іншими показниками, він часто використовується в поєднанні для забезпечення більш цілісного аналізу якості води. Розрахунок NDTI базується на використанні зеленого та ближнього інфрачервоного діапазонів електромагнітного спектру. На відміну від інших спектральних водних індексів, NDTI базується на значенні електромагнітного відображення, яке для чистої води в зеленому діапазоні спектру є вищим, ніж у червоному. Отже, зі збільшенням каламутності збільшуються коефіцієнти відбиття у червоному діапазоні спектру. Слід зазначити, що більшість хімічних сполук, які через різні аспекти людської діяльності потрапляють в водойми, не

є оптично активними (азот, аміак, фосфор та інші). Визначення їх вмісту за допомогою спектральних індексів залишаються складною задачею для комплексної оцінки якості води.

Висновки. В роботі запропоновано використання даних супутникового моніторингу водних ресурсів для оцінки стану поверхневих вод, зокрема їхнього забруднення, на базі розрахунку спектральних індексів NDWI та NDTI. Подальші дослідження будуть спрямовані на розробку методології оцінки якості води в закритих водоймах з урахуванням сезонності та лабораторних показників для подальшої валідації. А використання часових рядів в поєднанні із моделями глибинного машинного навчання дозволяє оцінювати зміни в водних об'єктах

ЛІТЕРАТУРА

1. EU Water Framework Directive 2000/60/EC. Official Journal of the European Communities, 22.12 2000. L 327/1. 118 p.
2. Бреус Д.С., Левченко М.В. Методи оцінювання та нормування якості природних водних ресурсів Таврійський науковий вісник Випуск № 110. Том 2 , 2019 р. Стр.126-131.
3. Berka C. Relationships between agricultural land use and surface water quality using a GIS. Sumas River watershed, Abbotsford, B.C.MSc thesis, Resource Management and Environmental Studies, University of British Columbia, Vancouver, B.C., 1996. 174 p.
4. EPA: 1996, Environmental Indicators of Water Quality in the United States. USEPA Rep. 841-R-96-002. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Water, Washington, D.C.
5. Sun, X., Zhang, Y., Shi, K., Zhang, Y., Li, N., Wang, W., Huang, X., Qin, B. Monitoring water quality using proximal remote sensing technology. Sci. Total Environ. 2022, 803, 149805.
6. Subhasmita Das, Debabrata Nandi, Rakesh Ranjan Thakur, Dillip Kumar Bera, Duryadhan Behera, Bojan Đurin and Vlado Cetl, Novel Approach for Ex Situ Water Quality Monitoring Using the Google Earth Engine and Spectral Indices in Chilika Lake, Odisha, India, ISPRS Int. J. Geo-Inf. 2024, 13(11), 381; <https://doi.org/10.3390/ijgi13110381>.

ASSESSING WATER POLLUTION BASED ON SPECTRAL INDEXES

Yurii Kavats, Kateryna Sergieieva, Tatjana Fenenko, Danilo Dibrii

Abstract. *The study describes the primary pollutants of water resources in Ukraine and methods for assessing the degree of pollution using satellite monitoring. Satellite data allows to quickly obtain data with high spatial resolution and large spatial coverage for hard-to-reach areas of the Earth's surface. An essential aspect of satellite monitoring is*

the ability to obtain information on changes in surface waters based on the analysis of their pollution. Multi-temporal data, including archival data, makes it possible to assess the state of water bodies over several years. Multispectral images from the Sentinel-2 satellite are proposed as the primary data set, whose spectral characteristics allow for obtaining a wide range of information. Examples of the application of a remote sensing approach to assess the degree of pollution of water bodies over large areas are analyzed. Promising methods for further research to solve applied problems are pointed out.

Keywords: *Water resources, water bodies, water scarcity, satellite monitoring, pollution assessment, environmental stress, remote sensing methods, spectral indices, validation, Sentinel-2.*

REFERENCE

1. EU Water Framework Directive 2000/60/EC. Official Journal of the European Communities, 22.12 2000. L 327/1. 118 p.
2. Breus D.S., Levchenko M.V. Metody otsinyuvannya ta normuvannya yakosti pryrodnykh vodnykh resursiv Tavriys'kyy naukovyy visnyk Vypusk № 110. Tom 2 , 2019 r. Str.126-131.
3. Berka C. Relationships between agricultural land use and surface water quality using a GIS. Sumas River watershed, Abbotsford, B.C.MSc thesis, Resource Management and Environmental Studies, University of British Columbia, Vancouver, B.C., 1996. 174 p.
4. EPA: 1996, Environmental Indicators of Water Quality in the United States. USEPA Rep. 841-R-96-002. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Water, Washington, D.C.
5. Sun, X., Zhang, Y., Shi, K., Zhang, Y., Li, N., Wang, W., Huang, X., Qin, B. Monitoring water quality using proximal remote sensing technology. Sci. Total Environ. 2022, 803, 149805.
6. Subhasmita Das, Debabrata Nandi, Rakesh Ranjan Thakur, Dillip Kumar Bera, Duryadhan Behera, Bojan Đurin and Vlado Cetl, Novel Approach for Ex Situ Water Quality Monitoring Using the Google Earth Engine and Spectral Indices in Chilika Lake, Odisha, India, ISPRS Int. J. Geo-Inf. 2024, 13(11), 381; <https://doi.org/10.3390/ijgi13110381>.

ВИКОРИСТАННЯ ЧАСОВИХ РЯДІВ ТА НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ LSTM ДЛЯ ІДЕНТИФІКАЦІЇ СТАНІВ ВУЛИКА

О.О. Жуков¹, В.І. Горбенко²

¹Запорізький національний університет, асистент, Україна

²Запорізький національний університет, к.ф.м.н, доцент, Україна

Анотація. Бджоли є надзвичайно важливими для екосистем та сільського господарства, проте їх популяції скорочуються через різноманітні загрози. Це зумовлює критичну потребу в ефективних системах моніторингу стану бджолиних сімей для своєчасного сповіщення пасічника. Традиційні методи мають обмеження, тому зростає інтерес до застосування нейронних мереж для цієї задачі. Метою даної роботи є розробка моделей на основі архітектури LSTM для ідентифікації різних станів вулика за допомогою аналізу часових рядів даних сенсорів (вага, температура). Було використано набір даних, що пройшов попередню обробку, включаючи агрегацію, інтерполяцію, розрахунок похідних ознак та сегментацію. Навчені дві LSTM-моделі - для точкових (роїння, підгодовування, забір меду) та глобальних станів (нормальний, загибель, весняний розвиток, медозбір) – продемонстрували високу точність (96% та 92% відповідно), підтверджуючи ефективність підходу.

Ключові слова: моніторинг бджіл, стан вулика, часові ряди, LSTM, нейронні мережі, машинне навчання, бджільництво, RNN.

Бджоли відіграють значну роль у підтримці біорізноманіття та забезпеченні продовольчої безпеки через запилення. Однак світові популяції бджіл зазнають значного скорочення через комплексні фактори, включаючи втрату середовища існування, пестициди та зміни клімату [1]. Це створює нагальну потребу в розробці ефективних систем моніторингу бджолиних колоній, що дозволить виявляти проблеми на ранніх стадіях та відповідних заходів. Існуючі методи моніторингу часто є інвазивними, трудомісткими або недостатньо інформативними. Тому використання технологій штучного інтелекту, зокрема нейронних мереж LSTM, для аналізу даних з сенсорів вулика є перспективним напрямком для безперервного та неінвазивного контролю стану бджолиних сімей. Попередні дослідження показували ефективність використання температурних даних для ідентифікації станів вулика. [2]

В якості джерела даних в дослідженні було використано відкритий датасет з Kaggle[3], що містить анотовані дані з вулика за 2019-2022 роки. Процес підготовки даних включав: 1) агрегацію похвилинних даних до 15-хвилинних (для точкових станів) та 4-годинних (для глобальних станів) інтервалів; 2) селективний експорт стабільних діапазонів; 3) інтерполяцію пропусків та згладжування; 4) розрахунок похідних ознак (відносна зміна ваги, співвідношення температур); 5) сегментацію даних з використанням рухомого вікна (6 годин для точкових, 96 годин для глобальних станів) та застосуванням буферу; 6) рандомізацію та балансування класів для уникнення зміщення; 7) розділення на навчальну (80%) та тестову (20%) вибірки. Було розроблено та навчено дві моделі на основі рекурентної архітектури LSTM. Перша модель для ідентифікації точкових станів (роїння, підгодовування, забір меду) була тренувана з використанням відносної зміни ваги, місяця та години. Друга модель для класифікації глобальних станів (нормальний, загибель, весняний розвиток, медозбір) використовує відносну зміну ваги, співвідношення зовнішньої та внутрішньої температур, місяць та має модифіковану архітектуру нейронної мережі зі збільшеною кількістю нейронів. Обидві моделі навчались протягом 100 епох. Тестування на відкладеній вибірці показало загальну точність 96% для моделі точкових станів та 92% для моделі глобальних станів.

Висновки. У ході дослідження було успішно розроблено та протестовано дві моделі на базі нейронних мереж LSTM для ідентифікації точкових та глобальних станів бджолиного вулика за допомогою аналізу часових рядів. Продемонстровано ефективність запропонованого підходу: моделі досягли загальної точності 96% та 92% відповідно на тестових даних. Результати підтверджують перспективність використання LSTM та даних про вагу і температуру для створення автоматизованих систем моніторингу стану бджолиних сімей, що може сприяти своєчасному виявленню проблем та збереженню популяцій бджіл.

ЛІТЕРАТУРА/ REFERENCES

1. Overview of Bee Pollination and Its Economic Value for Crop Production / S. A. M. Khalifa et al. // Insects. 2021. Vol. 12, iss. 8. Art. 688. URL: <https://doi.org/10.3390/insects12080688>
2. Kviesis A. Application of neural networks for honey bee colony state identification / A. Kviesis, A. Zacepins // 2016 17th International Carpathian Control Conference (ICCC) (High Tatras, Slovakia, 29 May–1 June 2016) : матеріали. Piscataway : IEEE, 2016. P. 413–417. URL: <https://doi.org/10.1109/CarpathianCC.2016.7501133>
3. Senger D., Gruber C., Kluss T., Johannsen C. Weight, temperature and humidity sensor data of honey bee colonies in Germany, 2019–2022 / D. Senger, C. Gruber, T. Kluss, C. Johannsen // Data in Brief. 2024. T. 52. Art. 110015. URL: <https://doi.org/10.1016/j.dib.2023.110015>

USING TIME SERIES AND LSTM NEURAL NETWORKS FOR IDENTIFICATION OF HIVE STATES

O.O. Zhukov, V.I. Horbenko

Abstract. *Bees are extremely important for ecosystems and agriculture, yet their populations are declining due to various threats. This creates a critical need for effective systems to monitor honeybee colony health, allowing beekeepers to react promptly. Traditional methods have limitations, leading to growing interest in artificial intelligence applications. This work aims to develop models based on the LSTM architecture to identify different beehive states by analyzing time-series data from sensors (weight, temperature). Data from Kaggle was used, undergoing thorough preparation including aggregation, interpolation, derivative feature calculation, and segmentation. Two LSTM models were trained – one for point states (swarming, feeding, honey harvesting) and another for global states (normal, colony collapse, spring build-up, honey flow). They demonstrated high accuracy (96% and 92% respectively), confirming the approach's effectiveness.*

Keywords: *bee monitoring, hive state, time series, LSTM, neural networks, machine learning, beekeeping.*

АЛГОРИТМ СЕГМЕНТАЦІЇ ДАНИХ ПРИ МОНІТОРИНГУ РІВНЯ ПАЛИВА

Іващев Д. В.¹, Герасимов В. В.²

¹Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, Україна

²Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, к. т. н., доцент,
Україна

Анотація. У статті представлено алгоритм автоматичної сегментації сигналів від датчиків рівня палива транспортних засобів, що базується на аналізі похідних та адаптивному визначенні моментів змін у поведінці сигналу. Метод дозволяє з достатньою точністю виділяти однорідні ділянки сигналу, що є основою для подальшого аналізу шумових характеристик. Алгоритм забезпечує прийнятний рівень точності та демонструє стійкість до короточасних аномалій і типових перешкод, які часто виникають у реальних умовах експлуатації. Проведене порівняння результатів сегментації з емпіричними оцінками підтвердило ефективність і надійність розробленого підходу. Запропоноване рішення є достатньо універсальним, що дозволяє застосовувати його до різних типів систем збору даних, включаючи умови підвищеної складності, характерні для роботи сучасних транспортних засобів.

Ключові слова: сегментація сигналу, рівень палива, похідна, аналіз даних, обробка сигналів.

Вступ

Сучасні системи контролю використовують різноманітні датчики для моніторингу даних та діагностики стану обладнання. Проте отримані дані часто зашумлені, що ускладнює їх аналіз. Тому важливо розробляти ефективні алгоритми попередньої обробки, зокрема сегментації та фільтрації сигналів. В нашому випадку сегментація необхідна для поділу масиву даних на ділянки роботи транспортного засобу, його простою та екіпірування (поповнення палива). У роботі запропоновано алгоритм сегментації даних з метою виділення різних режимів роботи системи для подальшого очищення сигналів і аналізу шуму. Це сприяє підвищенню ефективності моніторингу й надійності роботи паливного обладнання.

Постановка задачі

Перед початком аналізу даних, отриманих від дачика рівня палива транспортного засобу з певною періодичністю, важливо розділити ці дані на сегменти, що відрізняються рівнем шумового забруднення, тобто:

- Виділити сегменти, пов'язані з заправкою, які вважаються нешумними через стандартизовані умови експлуатації (двигун не працює).
- Визначити шумні сегменти, де високе динамічне навантаження та зовнішні фактори призводять до появи аномалій, викидів та шумів.

Огляд існуючих методів для розбиття даних на сегменти:

1. К-середніх (K-means): Розділяє дані на кластери шляхом мінімізації дисперсії всередині груп.
 - Плюси: Простота реалізації, ефективність на великих даних.
 - Мінуси: Чутливий до шуму та потребує попереднього завдання числа кластерів (K) [1].
2. Ієрархічна кластеризація: Будує древоподібну структуру кластерів, об'єднуючи або розділяючи групи.
 - Плюси: Не вимагає вказівки числа кластерів наперед, візуалізація через дендрограму.
 - Мінуси: Висока обчислювальна складність для великих наборів даних [2].

Через перелічені обмеження вказаних кластеризаційних алгоритмів, було прийнято рішення розробити власний алгоритм, орієнтований на аналіз структурних змін у сигналі рівня пального.

Було розроблено програму з комбінованим методом аналізу та виділення сегментів.

Етапи обробки даних в програмі

- 1) З масиву завантажених даних відкидаються рядки, де рівень пального менше межі, визначеної конструктивними особливостями паливного баку. Відфільтровані таким чином дані сортуються часом.
- 2) **Гауссове згладжування.** Початковий сигнал рівня пального обробляється за допомогою гауссового фільтра. Це дозволяє усунути короточасний шум, забезпечуючи більш точне виявлення змін тренду [3].
- 3) **Сегментація за зміною приросту.** Сигнал розбивається на вікна фіксованого розміру. Для кожного вікна обчислюється середня різниця між сусідніми значеннями. На основі локального стандартного відхилення цих різниць встановлюється адаптивний поріг, перевищення якого сигналізує про ймовірну зміну тренду.
- 4) **Аналіз третьої похідної.** Для уточнення меж сегментів виконується аналіз третьої похідної сигналу поблизу точок, де виявлено порогове перевищення. Це дає змогу виявити точку перегину — місце зміни нахилу.
- 5) **Визначення напрямку сегмента.** Після знаходження точки перегину порівнюються кути нахилу до та після неї. Якщо різниця між ними

перевищує заданий поріг, сегмент класифікується як перехід від спадного до висхідного тренду або навпаки.

Результати

Для аналізу роботи програми було обрано масив даних (11 наборів) в якості вхідних даних. З кожного набору було взято фіксовано кількість точок, що відповідає двом місяцям вимірювань (89280 точок). Вихідні дані та межі сегментів після обробки за вказаним алгоритмом одного з транспортних засобів наведено на рис. 1.

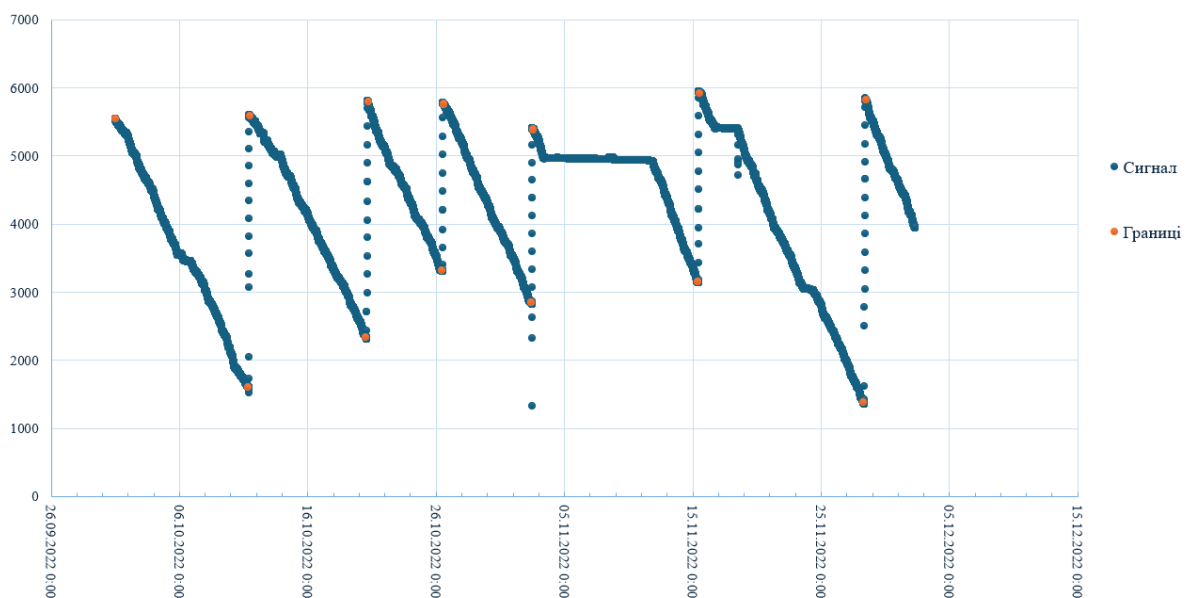


Рисунок 1 - Графік вихідного сигналу та границь сегментів для першого транспортного засобу

Після чого емпірично, шляхом візуального спостереження, масиви даних від всіх транспортних засобів теж були розбиті на сегменти.

Надалі було проведено порівняння сегментів, отриманих за допомогою запропонованого алгоритму, та вирахованих емпірично. В більшості випадків сегменти, які відповідають заправці паливом, визначаються "із запасом" на початку і в кінці, що для дослідження характеристик має позитивний ефект, так як дозволяє уникнути перехідних зон.

Висновки. Розроблений алгоритм сегментації масиву даних, отриманих від датчиків рівня палива транспортних засобів ефективно виконує сегментацію, використовуючи адаптивний поріг та третю похідну для точного виявлення змін тренду. Алгоритм стійкий до більшості шумів, хоча незначна частина сегментів були класифіковані неправильно через різкі аномалії.

Загалом, розроблений алгоритм дозволяє досить ефективно розділяти дані на сегменти з шумовим забрудненням (стоянка та рух транспортного засобу) та без (заправка) для подальших досліджень.

ЛІТЕРАТУРА

- 1.MathWorks Documentation. k-Means Clustering. URL: https://de.mathworks.com/help/stats/k-means-clustering.html?spm=a2ty_o01.29997173.0.0.b7825c31fP2dip (дата звернення: 24.03.2025)
- 2.MathWorks Documentation. Hierarchical Clustering. URL: https://de.mathworks.com/help/stats/hierarchical-clustering.html?spm=a2ty_o01.29997173.0.0.b7825c31fP2dip (дата звернення: 25.03.2025)
- 3.MathWorks Documentation. Filtering and Smoothing Data. URL: https://de.mathworks.com/help/curvefit/smoothing-data.html?spm=a2ty_o01.29997173.0.0.b7825c31fP2dip (дата звернення: 25.03.2025)

DATA SEGMENTATION ALGORITHM FOR FUEL LEVEL MONITORING

Ivashchev D. V., Herasymov V. V.

Abstract. *The article presents an algorithm for the automatic segmentation of signals from vehicle fuel level sensors based on derivative analysis and adaptive detection of changes in signal behavior. The method allows for sufficiently accurate identification of homogeneous segments, which serves as a basis for further noise characteristic analysis. The algorithm ensures an acceptable level of accuracy and demonstrates robustness against short-term anomalies and typical interferences commonly encountered in real operating conditions. A comparison of the segmentation results with empirical estimates confirmed the effectiveness and reliability of the proposed approach. The solution is sufficiently universal, making it suitable for application across various types of data acquisition systems, including those operating under complex and demanding conditions typical of modern vehicles.*

Keywords: *signal segmentation, fuel level, derivative, data analysis, signal processing.*

REFERENCES

1. MathWorks Documentation. k-Means Clustering. Available at: <https://de.mathworks.com/help/stats/k-means-clustering.html> (accessed March 24, 2025).
2. MathWorks Documentation. Hierarchical Clustering. Available at: <https://de.mathworks.com/help/stats/hierarchical-clustering.html> (accessed March 25, 2025).
3. MathWorks Documentation. Filtering and Smoothing Data. Available at: <https://de.mathworks.com/help/curvefit/smoothing-data.html> (accessed March 25, 2025).

НОВІ СПОСОБИ ВИЗНАЧЕННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ЛІНІЇ ПРИВОДУ ПРОКАТНИХ КЛІТЕЙ

Коренной В.В.

ІЧМ ім.З.І.Некрасова НАНУ, науковий співробітник, Україна

Анотація. На базі промислових досліджень безперервних широкоштабових станів гарячої прокатки розроблено кілька способів визначення технічного стану, перш за все величини кутових зазорів в лінії приводу валків прокатних клітей. Способи використовують данні вимірювань в перехідний період роботи прокатних клітей, під час захвату штаби прокатними валками. Перший спосіб спирається на вимірювання швидкості розповсюдження пружної деформаційної хвилі вздовж елементів лінії приводу, другий використовує технологічні особливості одночасної прокатки у двох клітях, третій - відносне зменшення періоду коливань перехідного процесу електромагнітного моменту двигуна.

Ключові слова: технічний стан, кутові зазори, лінія приводу, промислові вимірювання, момент сил пружності, вібрація, електромагнітний момент, прокатна кліть.

Спосіб визначення технічного стану лінії приводу за часом розповсюдження деформаційної пружної хвилі під час захвату штаби прокатними валками.

Відома дослідно-промислова система визначення технічного стану головних ліній клітей за часом запізнення реакції ділянок лінії приводу на захват металу прокатними валками [1]. При її реалізації на станині кліті, корпусі шестеренної кліті та редуктора встановлювали вібродатчики, при спрацьовуванні яких визначався цей час. У той же час реальні лінії приводу прокатних клітей мають різні кінематичні схеми та відрізняються розмірами своїх головних елементів. Додатково до цього частота обертання прокатних валків згідно з технологією прокатки варіюється у широкому діапазоні. Для уточнення раніше запропонованого способу, а також з метою його практичного використання на прокатному обладнанні, розробили інший спосіб, що враховує швидкість поширення деформаційної хвилі у лінії приводу. При цьому кутові зазори, що знаходяться на її шляху, збільшують час проходження ударного імпульсу вздовж ділянок лінії приводу.

На рисунку 1 представлено загальний вид лінії приводу кліті дуо стану 1680, де вказані всі наявні довжини та діаметри основних елементів лінії приводу.

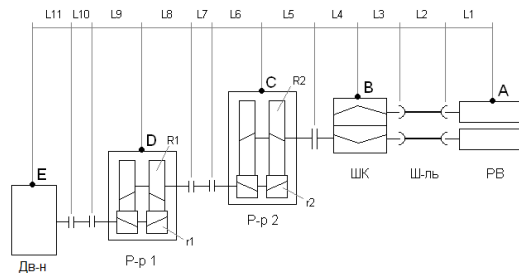


Рисунок 1 – Загальний вигляд лінії приводу кліті дуо стану 1680.

Відомо, що швидкість поширення крутильних коливань вздовж стрижня збігається зі швидкістю пружних поперечних збурень у необмеженому твердому середовищі (також зі швидкістю деформації зсуву у стрижні). При деформації кручення шлях дорівнює сумарній довжині валу, а при деформації зсуву - додатку радіусів зубчастих коліс. Наявність зазорів на шляху збільшуватиме час проходження деформаційної пружної хвилі T (1).

$$T = \sum_i \frac{L_i}{C_{КРУТ}} + \sum_j \frac{R_j}{C_{ЗГ}} + \sum_k \left(\Delta k \times \frac{60}{N_{ДВ}} \times \frac{l_k}{2\pi} \right), C \quad (1)$$

де, L – довжина валу, мм; R – радіус зубчатого колеса, мм; $C_{КРУТ}$, $C_{ЗГ}$ – швидкість розповсюдження крутильних та згинальних деформацій у металі, Δ – кутовий зазор, рад; $N_{ДВ}$ – частота обертання електродвигуна, об/хв; I – передавальне число редуктора; i, j, k – кількість елементів.

Час розповсюдження деформаційної хвилі вздовж лінії приводу є параметром, що залежить від технічного стану – зносу і зазорів в зчленуваннях прокатної кліті. Використання цього параметру дозволить підвищити точність діагностування.

Спосіб визначення технічного стану лінії приводу першої кліті при безперервній прокатці штаби у двох суміжних клітях.

Відомий спосіб, у якому здійснюють періодичне вимірювання під час захвату металу прокатними валками, принаймні, у двох точках лінії приводу вібраційного параметра, визначення часу запізнення реакцій ділянок лінії приводу на захват металу прокатними валками та визначення технічного стану лінії приводу за величиною часу запізнення [2].

Запропоновано удосконалити цей спосіб, використовуючи особливості одночасної прокатки в двох клітках. Під час захвату штаби в другій клітці, в лінії приводу першої клітки через натяг чи підпор теж відбуваються досить значні коливання моменту сил пружності чи вібрації, але менші, оскільки зазори в її лінії замкнуті і не впливають на динаміку. За рахунок цього час запізнення реакції ділянок значно менше. Ідея запропонованого способу полягає у порівнянні часу запізнення реакції ділянок, одержаних при захваті штаби і при взаємодії клітей - чим більша ця різниця тим більше кутові зазори.

На рисунку 2 схематично представлений загальний вид ліній головного приводу двох суміжних клітей та вібраційні сигнали встановлених у ній датчиків.

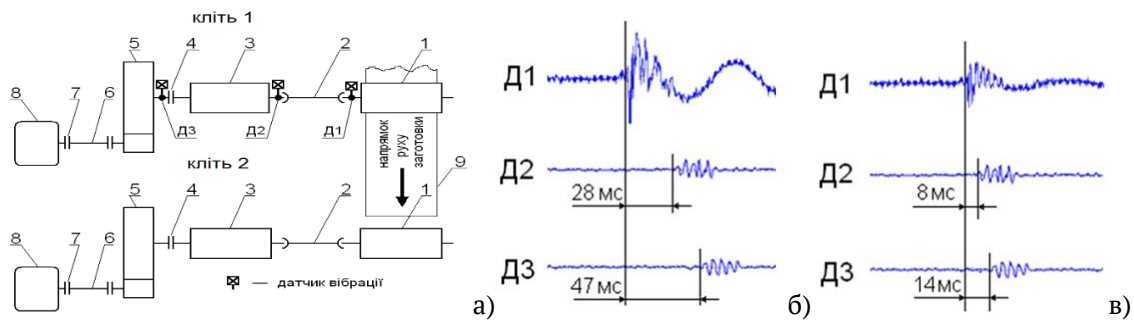


Рисунок 2 – Загальний вид ліній приводу клітці 1 та клітці 2 та технологія одночасної безперервної прокатки: 1 - валкова система, 2 - шпинделі, 3 - шестеренна клітка, 4 - корінна муфта, 5 - редуктор, 6 - проміжний вал, 7 - зубчаста напівмуфта, 8 - електродвигун, 9 – штаба (а); вібраційні сигнали реакції лінії приводу першої клітці у точках Д1, Д2, Д3 при захваті заготовки у першій клітці (б), у другій клітці (в).

На стані 1680 впроваджена прокатка штаб подвійної довжини, внаслідок чого спочатку відбувається захват заготовки у прокатних валках клітці 1. Потім відбувається захват заготовки прокатними валками клітці 2. У заготовці формується подовжнє зусилля, яке у вигляді збурення діє на прокатні валки клітці 1. В результаті цього уздовж її лінії приводу розповсюджується додатковий імпульс, на який реагують датчики в точках Д1, Д2 і Д3.

Виконали вимірювання віброшвидкості на корпусному обладнанні лінії приводу клітці 1 стану 1680 при прокатці штаб подвійної довжини. Датчики вібрації встановили на станину прокатної клітці (Д1), на кришку підшипникової опори шестеренної клітці (Д2) та кришку підшипникової опори редуктора (Д3). Приклад отриманих сигналів представлено на рисунку 2а та 2б. Добре видно,

що прокатне обладнання лінії приводу кліті 1 із запізненням реагує на захват штаби як у власних прокатних валках, так і у наступній кліті 2. Також характерно, що запізнення при захваті у кліті 2 (рис. 2б) суттєво менше у порівнянні з основним захватом у кліті 1 (рис. 2а).

Таким чином, запропонований спосіб дозволяє швидше визначити технічний стан ділянок лінії приводу та його зміну в процесі експлуатації прокатного стану при істотному зменшенні кількості вимірювань.

Спосіб визначення загального технічного стану лінії приводу за відношенням періодів коливань сигналу електромагнітного моменту двигуна.

У клітках чистової групи стану 1680 встановлені двигуни змінного струму з частотним регулюванням швидкості. У результаті потужність приводу зросла до 7 МВт, проти 5 МВт двигунів постійного струму, момент інерції роторів двигунів дещо зменшився. Поряд із двигунами, модернізації зазнала і система управління. Застосування мікропроцесорної техніки дозволило реєструвати електромагнітні параметри всіх двигунів чистової групи протягом прокатки штаби і записувати одночасно багато каналів з достатньою частотою дискретизації (близько 1000 Гц).

При захваті кількох штаб виконали запис електромагнітного моменту двигуна та моменту сил пружності з високою частотою дискретизації. Для 2-х параметрів вона становила $1000 \text{ Гц} / 2 = 500 \text{ Гц}$ [3]. Аналіз результатів вимірювань показав, що амплітуда коливань електромагнітного моменту двигуна значно менше амплітуди коливань моменту сил пружності. За піками сигналу електромагнітного моменту двигуна не можна оцінити максимальне пікове навантаження у механічній системі. Однак частота коливань моменту двигуна та моменту в механічній системі співпадає на протязі всього перехідного процесу.

Поеднали початок сигналу електромагнітного моменту двигуна (Мд) та моменту сил пружності (М) (рис. 3). Насправді, при захваті штаби прокатними валками реакція двигуна (електромагнітний момент, сила струму, частота обертання) запізнюється відносно початку реакції моменту сил пружності на моторній ділянці лінії приводу.

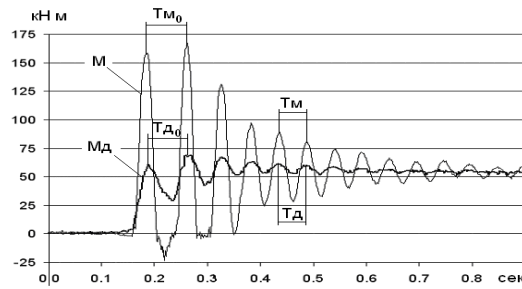


Рисунок 3 – Електромагнітний момент двигуна (M_d) кліті 6, що обчислюється у системі керування та момент сил пружності (M) на моторній ділянці лінії приводу.

При великому зносі зубчастого зчеплення в моторній муфті і редукторі на сигналі моменту сил пружності моторної ділянки після першого (іноді другого і третього) піку момент сил пружності падає до нуля, потім відбувається удар у зворотний бік. Це вказує на короткочасне розкриття зазору у зчленуванні. На цій ділянці період коливань моменту T_{m0} (особливо час між першим та другим піками) більше, ніж період T_m коливань на ділянці, де зазор не розмикається. Електромагнітний момент двигуна після першого піку до нуля не падає, однак за збільшеним періодом T_{d0} між першим і другим піками помітно, що двигун реагує на зазначене розмикання зазору. З практичних вимірювань встановлено, що у процесі експлуатації прокатної кліті T_{m0} і T_{d0} поступово збільшуються і можуть у 1,5-1,8 рази перевищувати відповідно T_m і T_d . Після капітального ремонту ця відмінність найменша (у 1,05-1,1 рази).

Запровадили показник відносного зменшення періоду коливань перехідного процесу електромагнітного моменту двигуна (2):

$$\Delta T_d = T_{d0}/T_d \quad (2)$$

Поділити загальний технічний стан лінії приводу на три рівні при таких значеннях ΔT_d : $\Delta T_d = 1,05 \dots 1,2$ (добрий технічний стан), $\Delta T_d = 1,25 \dots 1,4$ (задовільний технічний стан), $\Delta T_d = 1,45 \dots 1,8$ (поганий технічний стан).

Отримано діагностичний показник (ΔT_d) з чіткими межами визначення та суттєвою числовою різницею між рівнями технічного стану. Встановлено, що сигнал електромагнітного моменту двигуна є діагностичним параметром, за яким можливо визначати загальний технічний стан лінії приводу прокатної кліті.

Висновки. Досвід промислових досліджень та особливості перехідних процесів в лініях приводу прокатних клітей сприяють подальшому пошуку способів діагностування технічного стану прокатних станів, використання яких збільшить ресурс прокатного обладнання та зменшить кількість раптових відмов прокатних клітей.

ЛІТЕРАТУРА

1. Діагностика і динаміка прокатних станів : монографія. / В. В. Вереньов, В. І. Большаков, О. Ю. Путнокі та ін. Дніпропетровськ : ІМА пресс, 2007. 144 с.
2. Вереньов В.В., Юнаков О.М., Далічук А.П., Путнокі О.Ю., Мацко С.В., Борщов О.В. & Будаква С.А. (2004). Спосіб визначення технічного стану устаткування крутильної системи лінії головного приводу прокатної кліті (Патент України № 70137).
3. Далічук А. П., Коренной В. В., Мацко С. В., Цымбал П. П., Антонюк А. А. Переходные процессы в главных приводах чистовых клетей стана 1680. Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні. Краматорськ : ДДМА. 2008. № 1(19). С. 304–307.

NEW METHODS OF DETERMINING THE TECHNICAL CONDITION OF THE DRIVING LINE OF THE ROLLING STANDS

Korennoi Volodymyr

Abstract. *Based on industrial research of continuous wide-stand hot rolling mills, several methods have been developed to determine the technical condition, primarily the value of the angular gaps in the drive line of the rolls of the rolling stands. The methods use measurement data during the transitional period of the rolling stands operation, during the capture of the stand by the rolling rolls. The first method is based on measuring the propagation velocity of the elastic deformation wave along the elements of the drive line, the second uses the technological features of simultaneous rolling in two stands, the third - the relative reduction of the period of oscillations of the transient process of the electromagnetic torque of the engine.*

Keywords: *technical condition, angular gaps, drive line, industrial measurements, moment of elastic forces, vibration, electromagnetic torque, rolling stand.*

REFERENCE

1. Diahnostyka i dynamika prokatnykh staniv : monohrafiya. / V. V. Veren'ov, V. I. Bol'shakov, O. YU. Putnoki ta in. Dnipropetrovs'k : IMA press, 2007. 144 s. [in Russian].
2. Veren'ov V.V., Yunakov O.M., Dalichuk A.P., Putnoki O.YU., Matsko S.V., Borshchov O.V. & Budakva S.A. (2004). Sposib vyznachennya tekhnichnoho stanu ustatkuvannya krutyl'noyi systemy liniyi holovnoho pryvodu prokatnoyi kliti (Patent Ukrayiny № 70137). [in Ukrainian].

3. Dalychuk A. P., Korennoy V. V., Matsko S. V., TSymbal P. P., Antonyuk A. A. Perekhodnye protsessy v glavnykh pryvodakh chystovykh kletey stana 1680. Udoskonalennya protsesiv i obladnannya obrobky tyskom v metalurhiyi i mashynobuduvanni. Kramators'k : DDMA. 2008. № 1(19). S. 304–307. [in Russian].

ПРОЄКТУВАННЯ ТА РОЗРОБКА ІНФОРМАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ЗАМОВЛЕННЯМИ У ЗАКЛАДАХ ХАРЧУВАННЯ З КРОСПЛАТФОРМЕНИМ ДОСТУПОМ

Корчев Є.А.¹, Божуха Л.М.²

¹ДНУ імені Олеся Гончара, студент, Україна

²ДНУ імені Олеся Гончара, кандидат фізико-математичних наук, доцент, Україна

Анотація. У роботі розглянуто проєктування та реалізацію інформаційної системи управління замовленнями для закладів харчування, орієнтованої на підвищення ефективності обслуговування, зручність користування та дотримання вимог інформаційної безпеки. Запропоноване рішення забезпечує взаємодію користувачів із різними рівнями доступу, підтримує обробку замовлень, бронювань і пов'язаних бізнес-процесів, а також дозволяє працювати з різних типів пристроїв у єдиному середовищі. Особливу увагу приділено побудові безпечної архітектури доступу, уніфікації каналів взаємодії, валідації даних та адаптивності інтерфейсів. Розроблена система демонструє гнучке рішення, що може бути інтегроване для будь-якого сучасного закладу харчування та адаптоване до майбутніх функціональних і технологічних змін. Архітектура системи підтримує масштабування, майбутню інтеграцію нових модулів і забезпечує високий рівень зручності для користувачів незалежно від платформи чи пристрою.

Ключові слова: інформаційна система, FastAPI, React, Android, клієнт-серверна архітектура, кросплатформенність, API, фреймворк.

Вступ. У сучасних умовах сфера обслуговування має тенденцію стрімкого зростання попиту на автоматизовані рішення, які здатні оперативно обробляти замовлення та надавати доступ із різних пристроїв для користувачів різних рівнів доступу. Для закладів харчування особливо важливо забезпечити безперебійне управління процесами, водночас дотримуючись вимог захисту даних та контролю доступу. Кросплатформені технології, що дають змогу працювати через веб-інтерфейси й мобільні додатки, відкривають широкі можливості для створення інтелектуальних систем керування, орієнтованих на ефективність, безпеку й зручність користувачів. У цій роботі розглянуто проєктування подібної системи із застосуванням сучасних клієнт-серверних технологій.

Основний матеріал. Інформаційна система управління замовленнями розроблена за принципом клієнт-серверної архітектури. Основу серверної частини складає REST API, реалізований з використанням фреймворку FastAPI, який забезпечує взаємодію з базою даних та клієнтськими застосунками [1]. Система підтримує асинхронну обробку запитів завдяки використанню ASGI. Такий підхід здатен забезпечити масштабоване та максимально ефективне рішення для роботи з великою кількістю одночасних користувачів. На рис. 1 наведено загальну архітектуру системи.

Клієнтська частина включає веб-інтерфейс, реалізований з використанням React разом з додатковими бібліотеками для навігації та інтерфейсної взаємодії, а також мобільні застосунки для Android, створені з використанням мови програмування Kotlin. Вебзастосунок забезпечує багатосторінкову навігацію завдяки React Router, що дозволяє ефективно розділяти логіку інтерфейсу та підвищує зручність користування. Таке рішення дозволяє реалізувати динамічну маршрутизацію на стороні клієнта, що дає змогу створити односторінковий застосунок (SPA) із навігацією без перезавантаження сторінки. Компоненти інтерфейсу відображаються згідно зі структурою маршрутів, що дозволяє будувати гнучкий та масштабований UI.

Android додатки орієнтовані на клієнтів та персонал закладу, і забезпечують доступ до основних функцій системи шляхом інтеграції з розробленим API. Завдяки обраній архітектурі вдалося досягти того, що два окремих застосунки на базі різних технологій забезпечують однакову функціональність із вебверсією. Користувачі можуть оформлювати замовлення, переглядати їх статус, залишати відгуки, бронювати столи, використовувати бонуси та взаємодіяти з іншими компонентами системи – незалежно від того, чи вони працюють у браузері, чи через мобільний застосунок. Обидві клієнтські платформи взаємодіють із сервером через HTTP-запити до REST API. Обмін даними відбувається у форматі JSON, із застосуванням токен-авторизації. Такий підхід забезпечує кросплатформенність та уніфіковану логіку доступу, незалежно від типу пристрою користувача [2].

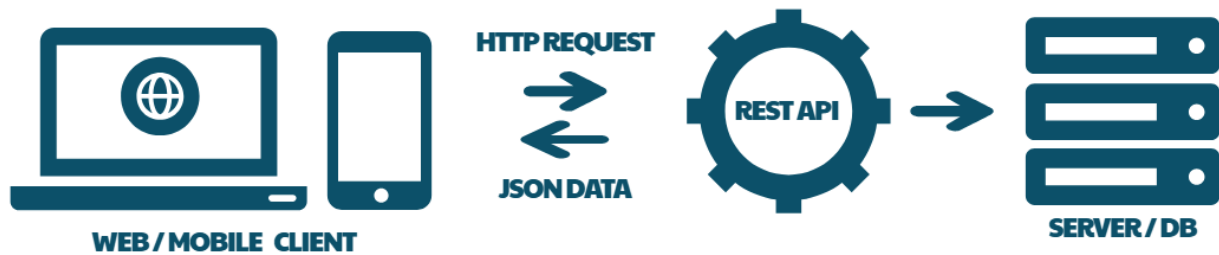


Рисунок 1 – Архітектура системи

Оскільки система працює з персональними даними користувачів та замовленнями, одним із ключових аспектів її розробки стало впровадження надійної моделі доступу до ресурсів. Для цього реалізовано рольову модель авторизації, яка включає чотири основні типи користувачів:

- Гість має лише ознайомчий доступ,
- Клієнт може оформлювати замовлення, використовувати бонуси, переглядати історію, залишати відгуки, бронювати столики,
- Офіціант обробляє замовлення, змінює їх статуси, взаємодіє зі столами,
- Адміністратор має повний контроль над даними, включно з управлінням користувачами, меню, тощо.

Доступ до ресурсів обмежується на рівні серверної частини за допомогою JWT-токенів, які видаються після успішної авторизації. Кожен запит до захищених маршрутів перевіряється на наявність, коректність та надійність токена, а також на відповідальність ролі користувача до дозволених дій. Такий підхід дозволяє уникнути несанкціонованого доступу до ресурсів, та уникнути зберігання сесій на сервері, що значно спрощує масштабування системи [3].

Для додаткового захисту використано перевірку даних за допомогою моделей Pydantic, що забезпечують валідацію типів, обов'язкових полів і допустимих значень. Застосування цієї бібліотеки дозволило позбутися потенційних проблем які можуть виникнути через динамічну типізацію мови Python. Обмін даними між клієнтами та сервером здійснюється у форматі JSON через зашифровані HTTPS з'єднання, що в свою чергу гарантує конфіденційність та цілісність інформації.

З точки зору безпеки з яких джерел можуть надходити запити до API, було застосовано обмеження CORS-запитів, що дозволяє контролювати джерела з яких здійснюється доступ до API, і таким чином запобігати несанкціонованим зверненням з небажаних доменів [4].

Висновки. Розроблена інформаційна система демонструє можливість побудови масштабованого та безпечного рішення для автоматизації процесів обслуговування у закладах харчування. Завдяки застосуванню сучасних інструментів та фреймворків вдалося реалізувати клієнт-серверну архітектуру з кросплатформеним доступом, розмежуванням прав користувачів та захищеним обміном даних.

ЛІТЕРАТУРА

1. McLaughlin P. FastAPI. FastAPI: Modern Python Web Development. – O'Reilly Media, 2021. – С. 27–47.
2. Kleppmann M. Розробка надійних, масштабованих та підтримуваних додатків. – К.: Видавництво "Наш Формат", 2020. – 592 с.
3. Jones M., Bradley J., Sakimura N. JSON Web Token (JWT). [Електронний ресурс]. – 2015. – 33 р. – Режим доступу: [<https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc7519>].
4. van Kesteren A. Cross-Origin Resource Sharing (CORS). [Електронний ресурс]. – W3C Recommendation, 2014. – 13 р. – Режим доступу: [<https://www.w3.org/TR/cors/>].

Design and Development of an Order Management Information System for Food Service Establishments with Cross-Platform Access

Yevhenii Korchev, Liliya Bozhukha

Abstract. *The paper considers the design and implementation of an order management information system for catering establishments focused on improving service efficiency, ease of use, and compliance with information security requirements. The proposed solution provides user interaction with different levels of access, supports the processing of orders, reservations, and related business processes, and allows working from different types of devices in a single environment. Particular attention was paid to building a secure access architecture, unifying interaction channels, data validation, and interface adaptability. The developed system demonstrates a flexible solution that can be integrated for any modern food establishment and adapted to future functional and technological changes. The system architecture supports scalability, future integration of new modules, and provides a high level of user experience regardless of platform or device.*

Keywords: *information system, FastAPI, React, Android, client-server architecture, cross-platform, API, framework*

REFERENCE

1. McLaughlin P. FastAPI. FastAPI: Modern Python Web Development. – O'Reilly Media, 2021. – P. 27–47. [in English].

2. Kleppmann M. Designing Data-Intensive Applications. – Kyiv: Nash Format, 2020. – 592 p. [in English].
3. Jones M., Bradley J., Sakimura N. JSON Web Token (JWT). [Online resource]. – 2015. – 33 p. – Available at: [<https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc7519>]. [in English].
4. van Kesteren A. Cross-Origin Resource Sharing (CORS). [Online resource]. – W3C Recommendation, 2014. – 13 p. – Available at: [<https://www.w3.org/TR/cors/>]. [in English].

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ АКТИВАЦІЙНИХ ФУНКЦІЙ НА ТОЧНІСТЬ СЕГМЕНТАЦІЇ ВОДНИХ ОБ'ЄКТІВ НА СУПУТНИКОВИХ ЗОБРАЖЕННЯХ

Кунденко П.Р.¹, Гнатушенко Вік.В.²

¹Український державний університет науки і технологій, аспірант, Україна

²Український державний університет науки і технологій, д.т.н. проф., Україна

Анотація. Проведено порівняльний аналіз активаційних функцій (ReLU, Leaky ReLU, ELU, PReLU, Swish, RReLU) у складі нейромережі U-Net при виконанні задачі бінарної сегментації водних об'єктів за супутниковими знімками Sentinel-2. Для тренування моделей використано фіксовану кількість епох та стабільний набір зображень, що дозволило провести об'єктивне порівняння результатів. Отримані результати свідчать, що вибір активаційної функції суттєво впливає на ефективність нейромережевого сегментування. Найвищий показник метрики F1 отримано з функцією Leaky ReLU, яка також продемонструвала найкращі результати за точністю (Precision) та показником IoU. Функція ELU мала найвищий показник наповненості (Recall), проте значно нижчу точність, що вказує на її тенденцію до помилкового виявлення об'єктів. Проведене дослідження рекомендує використовувати функцію Leaky ReLU як оптимальний вибір для задач сегментації водних об'єктів за супутниковими знімками.

Ключові слова: нейронна мережа, сегментація, активаційна функція, U-Net, супутникові зображення, Sentinel-2

Завдання моніторингу водних об'єктів є актуальним в контексті зміни клімату та екологічної безпеки. Сучасні нейромережеві методи забезпечують високу точність сегментації, проте вибір активаційної функції суттєво впливає на якість отриманих результатів.

Для дослідження було використано архітектуру нейромережі U-Net, яка є поширеною для завдань сегментації у дистанційному зондуванні. Моделі з різними активаційними функціями (ReLU, Leaky ReLU, ELU, PReLU, Swish, RReLU) навчалися на однакових фрагментах супутникових зображень Sentinel-2, отриманих шляхом нормалізації та поділу на патчі розміром 512×512 пікселів. Загалом було використано стабільний набір із 16 патчів, навчання проводилося у 50 епох. Оцінювання проводилося за допомогою таких метрик: F1-score, Precision, Recall та IoU (Intersection over Union).

Таблиця 1

Порівняння результатів моделей з різними функціями активації

Функція	F1	Precision	Recall	IoU
ReLU	0.6881	0.6705	0.7067	0.5246
Leaky ReLU	0.7386	0.8395	0.6594	0.5856
ELU	0.6132	0.5293	0.7286	0.4421
PReLU	0.7253	0.7712	0.6845	0.5690
Swish	0.6792	0.6571	0.7028	0.5142
RReLU	0.7131	0.8261	0.6273	0.5541

Найвищий показник метрики F1 отримано з функцією Leaky ReLU (0.7386), найбільшу точність (Precision) показала Leaky ReLU (0.8395), тоді як найвищий показник наповненості (Recall) – ELU (0.7286). За значенням метрики IoU найкращий результат забезпечила Leaky ReLU (0.5856).

Висновки. Найкращі результати за більшістю метрик показала активаційна функція Leaky ReLU, що робить її оптимальним вибором для задач сегментації водних об'єктів. Функція ELU показала високу наповненість, але низьку точність, що свідчить про схильність до надлишкового виявлення об'єктів.

ЛІТЕРАТУРА

- 1.Viktoriia Hnatushenko, Oleksandr Honcharov. Land cover mapping with Sentinel-2 imagery using deep learning semantic segmentation models.// Proceedings of the X International Scientific Conference "Information Technology and Implementation" (IT&I 2024). - Kyiv, Ukraine, - November 20-21, 2024. – p.1-18 CEUR-WS.org/Vol-3909 - Information Technology and Implementation (IT&I 2024)
- 2.Ronneberger O., Fischer P., Brox T. U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation. Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention. 2015. Vol. 9351. P. 234–241.
- 3.Zhou Z., Siddiquee M.M.R., Tajbakhsh N., Liang J. UNet++: A Nested U-Net Architecture for Medical Image Segmentation. Deep Learning in Medical Image Analysis and Multimodal Learning for Clinical Decision Support. 2018. P. 3–11.
- 4.Zhang Z., Liu Q., Wang Y. Road Extraction by Deep Residual U-Net. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. 2018. Vol. 15, Issue 5. P. 749–753.
- 5.Shanmugamani R. Deep Learning for Computer Vision: Expert techniques to train advanced neural networks using TensorFlow and Keras. Packt Publishing, 2018. 472 p.
- 6.Chollet F. Deep Learning with Python. Manning Publications Co., 2018. 384 p.

RESEARCH ON THE EFFECT OF ACTIVATION FUNCTIONS ON THE ACCURACY OF WATER BODY SEGMENTATION FROM SATELLITE IMAGES

Pavlo Kundenko, Viktoria Hnatushenko

Abstract. *A comparative analysis of various activation functions (ReLU, Leaky ReLU, ELU, PReLU, Swish, RReLU) was conducted within a U-Net neural network architecture for the purpose of binary segmentation of water bodies in Sentinel-2 satellite imagery. The experimental design employed a fixed number of training epochs and a consistent set of images, thereby enabling an objective assessment of the results. The findings demonstrate that the selection of the activation function substantially influences the effectiveness of neural network-based segmentation. Among the evaluated functions, Leaky ReLU produced the highest F1 score, as well as superior Precision and IoU values. In contrast, while the ELU function exhibited the highest Recall, its markedly lower Precision indicates a tendency toward over-segmentation. Based on these observations, Leaky ReLU is recommended as the optimal choice for water-body segmentation in satellite images.*

Keywords: *neural network, segmentation, activation function, U-Net, satellite images, Sentinel-2*

REFERENCES

1. Viktoriia Hnatushenko, Oleksandr Honcharov. Land cover mapping with Sentinel-2 imagery using deep learning semantic segmentation models.// Proceedings of the X International Scientific Conference "Information Technology and Implementation" (IT&I 2024). - Kyiv, Ukraine, - November 20-21, 2024. – p.1-18 CEUR-WS.org/Vol-3909 - Information Technology and Implementation (IT&I 2024)
2. Ronneberger O., Fischer P., Brox T. U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation. Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention. 2015. Vol. 9351. P. 234–241.
3. Zhou Z., Siddiquee M.M.R., Tajbakhsh N., Liang J. UNet++: A Nested U-Net Architecture for Medical Image Segmentation. Deep Learning in Medical Image Analysis and Multimodal Learning for Clinical Decision Support. 2018. P. 3–11.
4. Zhang Z., Liu Q., Wang Y. Road Extraction by Deep Residual U-Net. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. 2018. Vol. 15, Issue 5. P. 749–753.
5. Shanmugamani R. Deep Learning for Computer Vision: Expert techniques to train advanced neural networks using TensorFlow and Keras. Packt Publishing, 2018. 472 p.
6. Chollet F. Deep Learning with Python. Manning Publications Co., 2018. 384 p.

АНАЛІЗ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ В ЗАДАЧІ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО УПРАВЛІННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ

Швачич Г.Г.¹, Мороз Б.І.¹, Щербина П.О., Мороз Д.М.²

¹НТУ «Дніпровська політехніка», д.т.н., професор, Україна

²НТУ «Дніпровська політехніка», д.PhD., доцент, Україна

Анотація. Розглядаються основні особливості застосування мови програмування Python у сфері моделювання штучних нейронних мереж. Показано, що розвинена система бібліотек мови програмування Python значно спрощує процес розробки нейромереж. Відзначається, що однією з ключових переваг мови Python є її зручність для швидкого прототипування. В той же час інтерпретований характер мови дозволяє оперативно тестувати різні архітектури нейромереж, змінювати параметри та отримувати результати в режимі реального часу. Представлені дослідження зосереджені на спільному використанні бібліотек TensorFlow та Keras. Показано, що бібліотеки TensorFlow та Keras є потужними інструментами для моделювання та навчання нейронних мереж. Вони значно спрощують процес розробки, забезпечуючи широкий набір функцій для створення, оптимізації та впровадження моделей машинного навчання.

Ключові слова: програмне забезпечення, нейронна система, штучний інтелект, технологічний процес.

Вступ. Потреба у впровадженні сучасних систем контролю параметрів технологічних процесів є визначальним чинником стратегічного розвитку галузі, оскільки має вагоме науково-технологічне та економічне значення. У металургійному виробництві існує ряд викликів, пов'язаних із моніторингом параметрів технологічних процесів і системами їх керування. Серед основних проблем варто виділити: відхилення геометричних параметрів прокату, порушення плоскостності, поверхневі дефекти через механічні пошкодження, а також нерівномірний температурний розподіл, що спричиняє внутрішні напруження.

Сучасні підходи до вирішення цих завдань передбачають застосування розподілених систем із кластерними мережами датчиків для первинної обробки даних. Інтеграція нейронних мереж з інфрачервоними датчиками та лазерними сканерами відкриває нові перспективи для оптимізації процесів

вальцювання та прокатки металів, що сприяє зниженню виробничих витрат і покращенню якості продукції.

Водночас виникає питання ефективного використання програмного забезпечення для інтелектуального управління технологічними процесами на базі штучних нейронних мереж. Дане дослідження спрямоване на аналіз таких програмних рішень.

Основний матеріал. На сьогодні Python є однією з найпопулярніших мов програмування для моделювання та розробки нейронних мереж, що пояснюється її простотою, великою екосистемою бібліотек та активною спільнотою. Використання Python як основної мови для створення нейронних мереж зумовлене низкою факторів, зокрема зручністю моделювання, наявністю спеціалізованих бібліотек і широкими можливостями для обробки великих обсягів даних [1 – 3]. Популярність цієї мови зростає паралельно з розвитком штучного інтелекту, що робить її оптимальним вибором як для наукових досліджень, так і для комерційних рішень у сфері глибокого навчання.

Розглянемо основні особливості застосування мови програмування Python у сфері моделювання штучних нейронних мереж. Насамперед це розвинена система бібліотек для машинного навчання, яка значно спрощує процес розробки нейромереж. До найпопулярніших бібліотек належать:

- TensorFlow – одна з найпоширеніших бібліотек, що дозволяє створювати як прості, так і складні нейромережі.
- PyTorch – гнучка бібліотека, яка активно використовується у наукових дослідженнях і навчанні моделей.
- Keras – високорівнева бібліотека, що працює поверх TensorFlow і полегшує процес створення моделей.
- Scikit-learn – набір інструментів для базового машинного навчання та аналізу даних.

Однією з ключових переваг Python є його зручність для швидкого прототипування. Інтерпретований характер мови дозволяє оперативно тестувати різні архітектури нейромереж, змінювати параметри та отримувати результати в режимі реального часу.

Крім того, Python забезпечує легку інтеграцію з іншими мовами програмування та фреймворками. Завдяки модулям на кшталт Cython, Python

ефективно взаємодіє з C/C++, що дозволяє підвищити продуктивність розрахунків. Також мова добре інтегрується з популярними інструментами для обробки великих даних, такими як Apache Spark.

Ще однією важливою особливістю є широкі можливості для візуалізації та аналізу результатів. Серед найпоширеніших інструментів:

- Matplotlib, Seaborn – для створення графіків та візуалізації навчального процесу.

- TensorBoard – для моніторингу та налагодження глибоких нейронних мереж.

Завдяки цим перевагам Python залишається однією з ключових мов у сфері машинного навчання та штучного інтелекту.

Ці дослідження зосереджені на спільному використанні бібліотек TensorFlow та Keras. Зокрема, бібліотека TensorFlow є наскрізною платформою з відкритим кодом, призначеною для створення програм машинного навчання. Це символічна математична бібліотека, яка використовує потоки даних і диференційоване програмування для виконання різноманітних завдань, пов'язаних із навчанням та функціонуванням глибоких нейронних мереж. Завдяки цьому розробники можуть створювати ефективні програми машинного навчання, використовуючи широкий набір інструментів, бібліотек та ресурсів спільноти.

Процес застосування TensorFlow можна поділити на дві основні фази:

1. Фаза розвитку – етап навчання нейромережі. Навчання зазвичай відбувається на настільному комп'ютері або ноутбучі.

2. Фаза запуску (інференсу) – після завершення навчання модель може бути розгорнута на різних платформах для подальшого використання.

Важливо відзначити, що процес навчання можна виконувати на кількох машинах, а потім запускати модель на іншому пристрої. Навчання моделі можливе як на центральних (CPU), так і на графічних процесорах (GPU). Оскільки глибоке навчання передбачає виконання великої кількості операцій множення матриць, TensorFlow забезпечує їхню високу швидкість завдяки реалізації цих обчислень мовою C++. Водночас доступ до бібліотеки та керування нею здійснюється переважно через інші мови програмування, зокрема Python.

З іншого боку, Keras є високорівневою бібліотекою, яка активно використовується як у дослідницьких, так і в промислових проєктах. Саме ця властивість робить її ефективним інструментом для розробки інтелектуальних систем управління технологічними процесами на основі штучних нейронних мереж.

Приймаючи до уваги зазначене, у даних дослідженнях бібліотека Keras використовувалася для створення нейронних моделей, а TensorFlow – для їх навчання та реалізації. Важливо зазначити, що бібліотеки TensorFlow та Keras мають тісний зв'язок, оскільки Keras є високорівневою бібліотекою для глибокого навчання, яка працює поверх TensorFlow. Така інтеграція має кілька ключових переваг:

- Простота використання пояснюється тим, що бібліотека Keras забезпечує простий та інтуїтивний інтерфейс для створення нейронних мереж, тоді як бібліотека TensorFlow надає потужні інструменти для обчислень та масштабованості.

- Гнучкість реалізації процесу програмування пояснюється тим, що використовуючи бібліотеку Keras поверх бібліотеки TensorFlow, отримують доступ до всіх функцій бібліотеки TensorFlow, включаючи розподілене навчання, обробку великих даних та підтримку різних апаратних платформ.

На рис. 1 представлено код, який демонструє базові принципи використання бібліотек TensorFlow та Keras для побудови простої нейромережі.

```
import tensorflow as tf
from tensorflow import keras
from tensorflow.keras.models import Sequential
from tensorflow.keras.layers import Dense
import numpy as np
```

Рисунок 1 – Особливості імпортування бібліотек для побудови нейронної мережі

Розроблена мережа функціонує наступним чином. На першому етапі здійснюється імпорт бібліотек для підключення необхідних модулів. Далі створюється модель, визначаючи архітектуру нейромережі (шари, кількість нейронів, функції активації). Наступним кроком є компіляція, де задаються алгоритм навчання (оптимізатор, функція втрат). Після цього проводиться навчання моделі, під час якого передаються вхідні дані, і мережа налаштовує

свої ваги. На завершальному етапі здійснюється прогнозування, коли модель використовується для передбачення нових значень.

Висновки. Дослідження показали, що бібліотеки TensorFlow та Keras є потужними інструментами для моделювання та навчання нейронних мереж. Вони значно спрощують процес розробки, забезпечуючи широкий набір функцій для створення, оптимізації та впровадження моделей машинного навчання.

Основні переваги сумісного використання бібліотек TensorFlow та Keras полягають у наступному:

- Зручність та гнучкість.
- Висока продуктивність.
- Масштабованість та підтримка різних платформ.
- Інтерактивність та можливість швидкого прототипування.
- Широкий набір інструментів для моніторингу та аналізу.

Отже, завдяки зазначеним широким можливостям бібліотеки TensorFlow та Keras є ідеальним вибором як для дослідників, так і для розробників комерційних рішень у сфері машинного навчання та штучного інтелекту.

ЛІТЕРАТУРА/REFERENCE

1. Shollet F. Deep Learning with Python. Manning, 2022. 469 p.
2. Raschka S., Mirjalili V. Python Machine Learning. Pask Publishing, 2019. – 770 p.
3. McKinney Wes Python for Data Analysis. O'Reily Media. 2022. 579 p.

SOFTWARE ANALYSIS FOR THE TASK OF INTELLECTUAL CONTROL OF TECHNOLOGICAL PROCESSES

Hennadi Shvachych, Borys Moroz, Pavlo Shcherbyna, Dmytro Moroz

Abstract. The main features of the use of the Python programming language in the field of modeling artificial neural networks are considered. It is shown that the developed system of libraries of the Python programming language significantly simplifies the process of developing neural networks. It is noted that one of the key advantages of the Python language is its convenience for rapid prototyping. At the same time, the interpreted nature of the language allows you to quickly test different architectures of neural networks, change parameters and obtain results in real time. It is noted that the Python programming language provides easy integration with other programming languages and frameworks. It is shown that the TensorFlow and Keras libraries are powerful tools for modeling and training neural networks. They greatly simplify the development process by providing a wide range of features for creating, optimizing, and deploying machine learning models.

Keywords: software, neural system, artificial intelligence, technological process.

МЕТОДИ КЕРУВАННЯ ПІДКЛЮЧЕННЯМ АЛЬТЕРНАТИВНИХ ДЖЕРЕЛ ЖИВЛЕННЯ ДО ІСНУЮЧОЇ МЕРЕЖІ

Налбандян М.В.¹, Мазуренко В.Б.²

¹Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, аспірант, Україна

²Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, к.т.н., доцент,
Україна

Анотація. Децентралізація виробництва електричної енергії є одним з найбільш ефективних способів підвищення надійності систем енергопостачання. У сучасних умовах найбільш поширеною стає енергетична модель, коли кінцевий споживач поєднує як споживання, так і виробництво енергії з використанням альтернативних джерел. При цьому виникає низка технічних проблем, пов'язаних з автоматичним керуванням генерацією, з оцінкою якості енергії, отриманої від різноманітних джерел та з робастною комутацією цих джерел. Існуючі методи комутації розраховані на єдину точку підключення усіх джерел до комутаційної системи, що суттєво ускладнює приєднання нових джерел та створення розподіленої системи генерації енергії. З метою удосконалення існуючих схем запропонована модель, яка дозволяє розподілене підключення джерел живлення до мережі у багатьох точках комутації, забезпечує їхню синхронізацію та моніторинг якості енергії від кожного джерела.

Ключові слова: розподілена система, альтернативні джерела живлення, керування, метод, автоматизована система, комутація, інтеграція, якість, модель.

На сьогоднішній день глобальна енергетична інфраструктура переважно функціонує за принципом централізованого електропостачання, що передбачає виробництво основної частини електроенергії на великих генерувальних об'єктах. Після генерації електроенергія транспортується через магістральні лінії електропередачі до розподільчих систем, які забезпечують її постачання кінцевим споживачам. Централізована енергетична модель передбачає концентрацію виробничих потужностей у великих енергогенерувальних центрах, з подальшим транспортуванням електроенергії через багаторівневу систему магістральних та розподільчих мереж. Така структура дозволяє досягти високої економічної ефективності завдяки реалізації «ефекту масштабу» – зниження питомих витрат на одиницю

виробленої електроенергії внаслідок великого обсягу виробництва. Крім того, розміщення електростанцій у районах із сприятливими природними або ресурсними умовами – наприклад, теплових електростанцій поблизу вугільних або газових родовищ, а гідроелектростанцій на потужних водних артеріях – дозволяє раціонально використовувати доступні енергетичні ресурси та мінімізувати логістичні витрати. Такий підхід забезпечує стабільне постачання енергії на значні відстані, що є особливо важливим для задоволення потреб урбанізованих і промислово розвинених регіонів. Доставка електроенергії до кінцевого споживача потребує розгалуженої інфраструктури, зокрема будівництва та обслуговування ліній електропередач, що неминуче спричиняє додаткові витрати та впливає на кінцеву вартість електроенергії. У відповідь на ці виклики останніми роками спостерігається зростання інтересу до децентралізованих систем генерації, зокрема завдяки здешевленню відновлюваних джерел енергії – передусім сонячних і вітрових установок – та широкому впровадженню накопичувальних систем з великою ємністю. Це сприяє зміні традиційної моделі енергопостачання та розвитку локальної генерації, орієнтованої на мінімізацію втрат при передачі енергії та зменшення залежності від централізованих джерел. За інформацією Міжнародної енергетичної агенції (IEA) [1], світове виробництво сонячної електроенергії продемонструвало суттєве зростання: з 99 ТВт·год у 2012 році до понад 1596 ТВт·год у 2023 році. Прогноз IEA передбачає подальше нарощування обсягів генерації сонячної енергії до понад 6000 ТВт·год до 2030 року, що підтверджує стійку тенденцію до декарбонізації та переходу до стійких джерел енергії. (рис. 1).

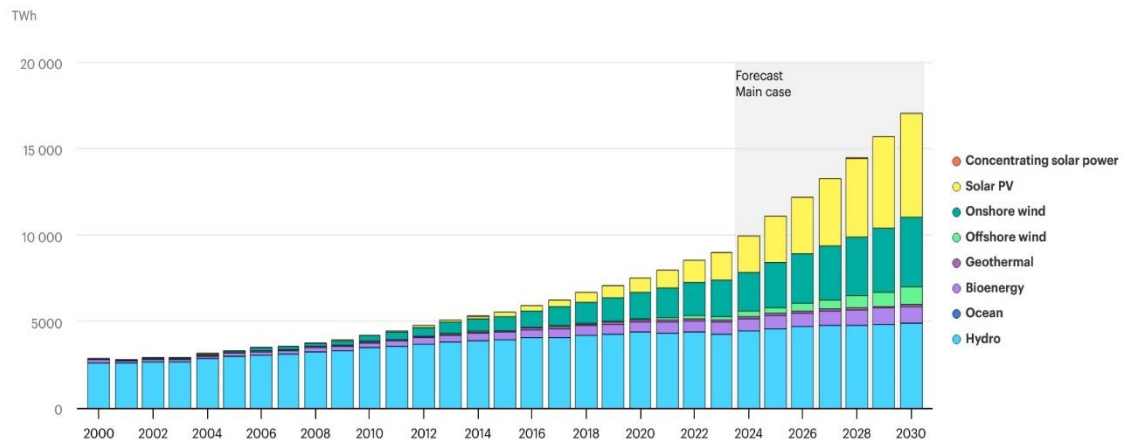


Рисунок - 1. Історичні дані та прогнози ІЕА для всіх секторів і технологій відновлюваної енергетики

Концепція розподіленої енергетики передбачає встановлення альтернативних джерел енергії компактних розмірів чи мобільної конструкції безпосередньо на території споживачів або поруч з нею. Потужність генерації таких джерел обирається з огляду на енергетичні потреби споживача та зазвичай становить від одиниць до сотень кВт, при цьому споживач залишається приєднаним до загальної мережі електропостачання, що дозволяє компенсувати брак енергії за несприятливих умов її генерації або навпаки, спрямовувати надлишкову енергію до мережі, якщо генерація перевищує власні потреби споживача. У розподілених системах дисбаланс між генерацією та споживанням енергії має систематичний характер, зважаючи на погодинну залежність добового споживання енергії (зумовлену виробничими процесами, побутовим споживанням, зарядкою електромобілів та ін.) та природні фактори, які впливають на її генерацію (хмарність, сила вітру). Зазвичай максимуми генерації та споживання не збігаються у часі – так, протягом світлового дня є сприятливі умови генерації сонячної енергії, але споживання для побутових потреб та зарядки електромобілів зростає саме у вечірні та нічні години. Ефективна комутація наявних джерел та систем накопичення енергії дозволяє не тільки знизити навантаження на енергосистему та мінімізувати кінцеву вартість електроенергії для споживача, але й забезпечити безперервне енергопостачання за умов, коли деякі з джерел стають недоступними з тих чи інших причин (пошкодження ліній електропередач, вихід з ладу обладнання, заходи з ремонту та технічного обслуговування, тощо).

У попередніх дослідженнях розглядалися різні методи комутації та управління системами, що містять кілька джерел енергії. Пропонувалися стратегії, що здійснюють вибір джерела на основі заданих пріоритетів, адаптивний вибір джерела, різні алгоритми розподілу навантаження між кількома джерелами. Так, у дослідженні [2] було розглянуто модель динамічного балансування навантаження між доступними джерелами живлення (звичайна загальна мережа, сонячні панелі та вітрові генератори) та споживачами енергії (зарядка електромобілів та майнінг криптовалют) на основі аналізу погодинного споживання, та проведено симуляцію цієї моделі. Основним висновком роботи є те, що застосовуючи проактивні стратегії управління електромережами, оператори енергосистем можуть забезпечити повну інтеграцію відновлюваних джерел енергії, зарядки електромобілів і операцій з видобутку криптовалют, зберігаючи при цьому стабільність і ефективність мережі. У роботі [3] запропоновано задачу оптимального керування системою управління енергією з урахуванням динаміки в генераторах і системах накопичення енергії. Компоненти електроенергії, включені в систему електроенергії, такі як генератор, шина, випрямляч і акумуляторна система, моделюються в цій задачі оптимального керування. На основі цього формулювання представлена триетапна архітектура оптимізації для отримання оптимальних політик керування. У [4] наведено детальний огляд літератури станом на 2024 рік щодо стратегій керування автоматичним керуванням генерацією (Automatic Generation Control, AGC) для енергетичних систем, що містять нові джерела енергії. Включення нових джерел в енергосистему значно впливає на її стабільність, надійність, економічність і безпеку. Щоб пом'якшити ці ефекти, важливо вибрати відповідну стратегію керування для AGC. Дослідження [4] зосереджено на всіх видах різних стратегій керування для нових енергоємних систем, таких як ПІД-регулювання, нечітке керування, керування штучною нейронною мережею тощо, а також порівнює та розглядає ці різні методи керування. Крім того, у цій роботі підсумовано та обговорено застосування інтелектуальних алгоритмів оптимізації та систем накопичення енергії для стратегій керування. Також обговорюються проблеми

та перспективні напрямки сучасних досліджень енергосистем з новими джерелами енергії.

В усіх наявних дослідженнях підключення альтернативних джерел здійснюються через єдину точку комутації. Тобто, є єдина комутаційна система, яка має $N > 1$ входів від джерел електропостачання та вихід, до якого підключається споживач енергії. Ця система приймає рішення щодо використання того чи іншого джерела та безпосередньо здійснює комутацію. Безумовна перевага такого підходу – це низька складність такої системи. Але вона має кілька суттєвих недоліків. Перш за все, така система являє собою єдину точку відмови. Самі джерела енергопостачання та лінії електропередач від них до споживача можуть бути продубльовані, що дозволяє здійснювати безперервне живлення у разі їхнього пошкодження. Але у разі відмови самої комутаційної системи внаслідок виникнення технічної несправності, пожежі, повені або інших форс-мажорних обставин можливо переривання електропостачання. Єдина точка комутації потребує фізичного під'єднання всіх наявних джерел до комутаційної системи. Таке підключення передбачається під час проектування об'єкта споживача, але будівництво та підключення нових джерел зазвичай не передбачено цим проектом. Зважаючи на можливі великі розміри як об'єкта споживача так само й альтернативних джерел генерації (так, потужність генерації сонячних панелей у середньому сягає 150 Вт/м^2 , що для забезпечення потужності живлення промислового підприємства 150 кВт потребує встановлення панелей загальною площею 1000 м^2), не завжди наявна технічна можливість розташування таких джерел поряд з точкою комутації. Окрім того, розглянуті у літературі методи комутації джерел та балансування навантаження не запроваджують моніторинг якості електричної енергії та відповідність її параметрів (напруга, частота, відхилення форми змінної напруги від синусоїдальної, стабільність у часі, тощо) вимогам стандартів. Такий безперервний моніторинг та накопичення статистичної інформації, як і саму фізичну комутацію кожного джерела до загальної мережі доречно здійснювати за допомогою автоматизованих систем на базі мікропроцесорних контролерів, які постійно обмінюються одна з одною

інформацією щодо параметрів відповідних джерел. Спираючись на цю інформацію, кожний контролер формує свій власний екземпляр єдиної розподіленої бази даних, яка використовується для прийняття рішень щодо комутації.

Висновки. Проведено аналіз існуючих методів інтеграції альтернативних джерел живлення у децентралізовані системи енергопостачання з урахуванням різноманітних критеріїв комутації (якість генерації, баланс наявного бюджету потужності генерації та потреб споживання, вартість виробництва енергії).

ЛІТЕРАТУРА/REFERENCE

1. The International Energy Agency. URL: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/renewable-energy-progress-tracker> (дата звернення: 11.04.2025)
2. Gül, O. Dynamic Load Flow in Modern Power Systems: Renewables, Crypto Mining, and Electric Vehicles. Sustainability 2025, 17, 2515.
3. DOI: 10.3390/su17062515
4. Y. Zhang, Y. Yu, R. Su and J. Chen, "Power Scheduling in More Electric Aircraft Based on an Optimal Adaptive Control Strategy," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 67, no. 12, pp. 10911-10921, Dec. 2020.
5. DOI: 10.1109/TIE.2019.2960718.
6. Ming Kuang, Youwen Tian, Qingyu Liu, et al. A Review of Control Strategies for Automatic Generation Control of Power Systems Containing New Energy Sources. Authorea. August 24, 2023. DOI: 10.22541/au.169285387.70260947/v1

METHODS FOR MANAGING THE CONNECTION OF ALTERNATIVE POWER

SOURCE TO EXISTING GRID

Marko Nalbandian, Valerij Mazurenko

Abstract. *Decentralization of electricity production is one of the most effective strategies to improve the reliability of energy supply systems. Nowadays, the most common energy model is one where the end user combines both consumption and production of energy using alternative sources. This raises a number of technical issues related to automatic generation control, assessment of the quality of energy from various sources, and robust switching of these sources. Existing methods of switching are designed for a single point of connection of all sources to the switching system, which significantly complicates the connection of new sources and the creation of a distributed power generation system. In order to improve the existing schemes, we propose a model that allows distributed connection of power sources to the grid at many switching points, ensures their synchronization and monitoring of the energy quality from each source.*

Keywords: *distributed system, alternative power sources, managing, method, automated system, switching, integration, quality, model.*

АДАПТИВНА СИСТЕМА ОЦІНЮВАННЯ РИЗИКІВ ОНЛАЙН ТРАНЗАКЦІЙ НА ОСНОВІ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО АНАЛІЗУ

Носов В.О.¹, Островська К.Ю.²

¹Український державний університет науки і технологій, аспірант, Україна

²Український державний університет науки і технологій, к.т.н., доцент, Україна

Анотація. З кожним роком кількість фінансових операцій неспинно зростає, а з нею і відповідні кіберзагрози, зокрема шахрайство, тому виявлення ризикових транзакцій в електронній комерції набуває все більшої актуальності. У дослідженні розглянуто адаптивний підхід до оцінювання ризиків онлайн транзакцій на основі інтелектуального аналізу даних, зокрема машинного навчання. Запропонована система передбачає багаторівневу структуру в яку входять поведінковий аналіз, семантична оцінка транзакцій та інтеграція результатів для формування фінального індикатора ризику. Увагу приділено виявленню відхилень від типових шаблонів, зіставленню історичних даних з поточними діями користувача, а також гнучкому реагуванню на підозрілі активності та аномалії у режимі реального часу. Зазначений підхід дозволить підвищити точність виявлення шахрайських операцій, зменшити кількість хибнопозитивних спрацювань, і забезпечити здатність моделі до адаптації в умовах постійно зростаючих загроз у динамічному середовищі.

Ключові слова: оцінка ризиків, транзакція, машинне навчання, поведінковий аналіз, інтелектуальна система.

Вступ. Збільшення кількості онлайн-операцій у фінансовому секторі супроводжується зростанням кількості злочинних ризиків, пов'язаних із шахрайством. Статистика Європейського центрального банку [1] та Національного банку України [2] свідчить про стрімке зростання кількості та складності шахрайських транзакцій. Класичні підходи виявлення шахрайства, засновані на фіксованих правилах (так звані rule-based), все складніше підтримувати через адаптивність зловмисників, тому виникає потреба в системах, які будуть доповнювати їх роботу.

Метою цієї роботи є розробка інтелектуальної системи виявлення ризикових транзакцій, яка поєднує різні методи аналізу для підвищення точності виявлення та зниження кількості транзакцій, які помилково класифікуються як шахрайські. Основний акцент зроблено на побудові

багаторівневої моделі, здатної працювати в умовах обмеженого часу та великої кількості запитів.

Виклад основного матеріалу

За допомогою інтелектуальних систем виявлення аномалій можна здійснювати комплексний аналіз поведінкових характеристик користувача, історії його транзакцій та контексту кожної нової операції. Для ефективної реалізації такого підходу доцільно поєднувати різні типи моделей: ті, що виявляють відхилення від звичних шаблонів, і ті, що здійснюють класифікацію подій на основі набору визначених ознак.

Поведінковий рівень системи аналізує усталені шаблони дій користувача, серед яких: часові межі активності, геолокація, тип пристрою, а також послідовність транзакцій. Аномальні відхилення, наприклад, такі як несподівана зміна місця проведення операції, або нестандартна сума платежу, оцінюються окремо як потенційно ризикові події.

Наступний рівень – семантичний. Він передбачає оцінку логічного узгодження транзакцій із типовою фінансовою поведінкою. Зокрема, враховується співвідношення між торговельною точкою (визначається як Merchant Category Code), категорією придбаних товарів або послуг і відповідною сумою платежу. Наприклад, оплата дорогих товарів у нетиповий час або в новій локації може сигналізувати про необхідність поглибленої перевірки. Виявлення таких відхилень здійснюється з використанням методів детекції аномалій та ймовірнісної класифікації.

Застосування методів машинного навчання дозволяє моделювати складні залежності між ознаками транзакцій та поведінковими характеристиками користувача. До таких підходів належать як наглядні методи (логістична регресія, дерева рішень), так і ненаглядні – зокрема, методи кластеризації та автокодувальники, які дають змогу виявляти відхилення без наявності міток. Окрему групу становлять ансамблеві моделі, що поєднують кілька алгоритмів задля підвищення загальної точності, стійкості до шуму та здатності адаптуватися до нових шаблонів.

На інтеграційному рівні результати попередніх етапів поєднуються для формування зваженого індикатора ризику. При цьому враховується значущість кожного виявленого фактору відхилення в контексті звичної поведінки конкретного користувача.

У наукових дослідження приведено цілий спектр алгоритмів, що застосовуються для вирішення задач виявлення фінансового шахрайства. Найпоширенішими є ансамблеві методи – випадковий ліс (Random Forest) [3] та градієнтний бустинг (Gradient Boosting), які демонструють високу точність класифікації. Такий алгоритм як логістична регресія часто використовується [4] як базова модель завдяки своїй інтерпретованості, тоді як нейронні мережі, зокрема автокодувальники [5], забезпечують виявлення прихованих відхилень у великих масивах даних без потреби в ручному маркуванні. Крім того, опорні вектори (Support Vector Machines), деревоподібні моделі та методи балансування вибірок, серед яких синтетична техніка надмірної вибірки меншості (SMOTE) [6], ефективно застосовуються для обробки даних із нерівномірним розподілом класів. Комбіновані підходи, які інтегрують декілька алгоритмів у межах єдиної системи, забезпечують оптимальний компроміс між точністю та обчислювальною ефективністю.

Ключовим компонентом ефективної системи є механізм адаптації моделі до змінного середовища. Це включає в себе динамічне коригування порогів чутливості залежно від загального фону активності, а також можливість зворотного навчання на підставі нових, підтверджених випадків шахрайства. Такий підхід сприятиме підтриманню актуальності системи та її здатності оперативно реагувати на нові ризики.

Висновки. Запропонований підхід до виявлення ризикових транзакцій у фінансових системах має потенціал стати основою ефективного інструменту моніторингу та оцінювання операцій. Багаторівнева структура, що поєднує поведінковий аналіз, семантичну оцінку та методи машинного навчання, дозволяє враховувати широкий спектр факторів ризику. Очікується, що впровадження такої системи сприятиме підвищенню точності виявлення шахрайських транзакцій та зменшенню хибнопозитивних результатів.

Перспективними напрямками подальших досліджень є підготовка джерел вхідних даних, розробка механізмів навчання та впровадження систем динамічного оновлення моделей у реальному часі.

ЛІТЕРАТУРА

1. European Central Bank. Report on payment fraud, 2024. [Online]. Available: <https://www.ecb.europa.eu/press/intro/publications/pdf/ecb.ebaecb202408.en.pdf>.
2. Причиною більшості шахрайських випадків з платіжними картками стало розголошення даних їхніми користувачами, 2024. [Online]. Available: <https://bank.gov.ua/ua/news/all/prichinoyu-bilshosti-shahrayskih-vipadkiv-z-platijnimi-kartkami-stalo-rozgoloshennya-danih-yihnimi-koristuvachami>.
3. L. Guo, R. Song, J. Wu, Z. Xu, F. Zhao, Integrating a machine learning-driven fraud detection system based on a risk management framework, *Applied and Computational Engineering* 87.1 (2024) P. 80–86. DOI:10.54254/2755-2721/87/20241541.
4. J. K. Afriyie, K. Tawiah, W. A. Pels, S. Addai-Henne, H. A. Dwamena, E. O. Owiredo, S. A. Ayeh, J. Eshun, A supervised machine learning algorithm for detecting and predicting fraud in credit card transactions, *Decision Analytics Journal* 6 (2023) 100163. DOI:10.1016/j.dajour.2023.100163.
5. M. Srokosz, A. Bobyk, B. Ksiezopolski, M. Wydra, Machine-Learning-Based Scoring System for Antifraud CISIRTs in Banking Environment, *Electronics* 12.1 (2023) P. 251. DOI:10.3390/electronics12010251.
6. B. Borketey, Real-Time Fraud Detection Using Machine, *Learning Journal of Data Analysis and Information Processing* 12 (2024) P. 189-209. DOI:10.4236/jdaip.2024.122011.

ADAPTIVE SYSTEM FOR ONLINE TRANSACTION RISK ASSESSMENT BASED ON INTELLIGENT ANALYSIS

Valerii Nosov, Kateryna Ostrovska

Abstract. *Each year, the volume of financial transactions continues to grow steadily, accompanied by a corresponding rise in cyber threats, particularly fraud. As a result, identifying high-risk transactions in electronic commerce has become increasingly relevant. This study presents an adaptive approach to assessing the risks of online transactions based on intelligent data analysis, including machine learning methods. The proposed system employs a multi-level structure that incorporates behavioral profiling, semantic transaction evaluation, and integration of results to generate a final risk indicator. The approach focuses on identifying deviations from typical user patterns, correlating historical data with current activity, and responding flexibly to suspicious behavior and anomalies in real-time. This methodology aims to improve the accuracy of fraud detection, reduce the number of false positives, and ensure that the model remains adaptive in the face of growing threats in a dynamic environment.*

Keywords: *risk assessment, transaction, machine learning, behavioral analysis, intelligent system.*

REFERENCE

1. European Central Bank. Report on payment fraud, 2024. [Online]. Available: <https://www.ecb.europa.eu/press/intro/publications/pdf/ecb.ebaecb202408.en.pdf>.
2. Prychynoiu bil'shosti shakhraiskiykh vypadkiv z platizhnymy kartkamy stalo rozgholoshennia danykh yikhnimy korystuvachamy, 2024. [Online]. Available: <https://bank.gov.ua/ua/news/all/prichinoyu-bilshosti-shahrayskih-vipadkiv-z-platijnimi-kartkami-stalo-rozgoloshennya-danih-yihnimi-koristuvachami> [in Ukrainian].
3. L. Guo, R. Song, J. Wu, Z. Xu, F. Zhao, Integrating a machine learning-driven fraud detection system based on a risk management framework, *Applied and Computational Engineering* 87.1 (2024) P. 80–86. DOI:10.54254/2755-2721/87/20241541.
4. J. K. Afriyie, K. Tawiah, W. A. Pels, S. Addai-Henne, H. A. Dwamena, E. O. Owiredu, S. A. Ayeh, J. Eshun, A supervised machine learning algorithm for detecting and predicting fraud in credit card transactions, *Decision Analytics Journal* 6 (2023) 100163. DOI:10.1016/j.dajour.2023.100163.
5. M. Srokosz, A. Bobyk, B. Ksiezopolski, M. Wydra, Machine-Learning-Based Scoring System for Antifraud CISIRTs in Banking Environment, *Electronics* 12.1 (2023) P. 251. DOI:10.3390/electronics12010251.
6. B. Borketey, Real-Time Fraud Detection Using Machine, *Learning Journal of Data Analysis and Information Processing* 12 (2024) P. 189-209. DOI:10.4236/jdaip.2024.122011.

ГЛИБОКЕ НАВЧАННЯ У ФІНАНСОВОМУ АНАЛІЗІ: ЗАСТОСУВАННЯ LSTM ТА GAN ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ ЦІН АКЦІЙ

Перцев Ю. О.¹, Коротка Л. І.²

¹УДУНТ ННІ УДХТУ, аспірант, Україна

²УДУНТ ННІ УДХТУ, канд. техн. наук, доцент, Україна

Анотація. Прогнозування цін на акції є важливим аспектом фінансової аналітики, що допомагає інвесторам приймати зважені рішення. У роботі розглядаються традиційні методи прогнозування, такі як технічний аналіз (ковзні середні SMA, EMA) та статистичні моделі (ARIMA, експоненційне згладжування). Аналізуються їхні переваги та обмеження, зокрема труднощі у відображенні складних ринкових закономірностей. Для підвищення точності прогнозування пропонується використання сучасних підходів машинного навчання, зокрема нейронних мереж LSTM та генеративно-змагальних нейромереж (GANs). Описано архітектуру GAN та її здатність моделювати ринкову динаміку навіть за обмеженості історичних даних. Проведене дослідження базується на реальних біржових даних (ціни акцій AAPL), а результати порівнюються з методами ARIMA та LSTM, що підтверджує ефективність запропонованого підходу.

Ключові слова: Прогнозування часових рядів, SMA, EMA, ARIMA, LSTM, GANs

Прогнозування цін на акції відіграє важливу роль у фінансовій сфері, оскільки дає змогу інвесторам та фінансовим аналітикам приймати обґрунтовані рішення щодо купівлі, продажу та утримання активів. Існує багато методів, що застосовуються для прогнозування цін акцій. Зокрема, статистичні підходи мають довгу історію та використовуються ще з ранніх етапів функціонування фондового ринку. Наприклад, технічний аналіз на основі ковзного середнього (MA) є популярним та простим методом прогнозування. Він розраховує середню ціну акції за певний період, згладжуючи короткострокові коливання. Існують два основні типи MA: просте ковзне середнє (SMA), яке обчислює середнє значення ціни за певний проміжок часу, та експоненційне ковзне середнє (EMA), яке надає більшу вагу останнім змінам ціни. Окрім цього, технічний аналіз дозволяє вивчати залежність між ціною акцій (залежною змінною) та іншими факторами (незалежними змінними), визначаючи їх вплив на динаміку ринку. При прогнозуванні

часових рядів також широко застосовується стандартні моделі які використовують історичні дані для передбачення майбутніх змін, наприклад моделі авторегресійного інтегрованого ковзного середнього (ARIMA) та методи експоненційного згладжування (зокрема, просте експоненційне згладжування (SES)) допомагають визначати тренди та сезонні коливання на ринку [1]. Проте традиційні методи прогнозування цін на акції мають низку обмежень. Вони не завжди здатні точно відображати складні закономірності ринку, адаптуватися до змінних умов, працювати з великими та неоднорідними масивами даних, а також ефективно обробляти шум та аномалії. Крім того, такі підходи часто базуються на спрощених припущеннях та лінійних залежностях між змінними, що ускладнює моделювання нелінійної природи фондового ринку. Хоча традиційні статистичні моделі добре справляються із задачами, пов'язаними з часовими рядами, сучасні технології пропонують більш просунуті підходи для прогнозування майбутніх значень. Одним із таких є використання нейронних мереж, зокрема, моделі Long Short-Term Memory. Як відомо, LSTM є спеціалізованою рекурентною нейронною мережею типу (RNN – Recurrent Neural Networks), яка розроблена для аналізу послідовних даних, таких як часові ряди. Завдяки здатності зберігати довготривалі залежності, LSTM демонструє високу продуктивність у прогнозуванні [2].

Останнім часом, машинне навчання (ML) та глибоке навчання (DL) суттєво розширили можливості прогнозування фінансових показників. Моделі на основі трансформерів, такі як BERT та GPT, продемонстрували значний прорив у сфері обробки природної мови. Крім того, генеративні моделі, зокрема генеративно-змагальні нейромережі (GANs) та варіаційні автоенкодера (VAEs), активно використовуються для синтезу реалістичних зображень, відео та аудіо. У фінансах моделі машинного навчання застосовуються для виявлення шахрайських операцій, управління ризиками та прогнозування руху цін на акції [3].

Зростає зацікавленість у використанні генеративно-змагальних нейромереж (GANs) та механізмів уваги для прогнозування цін акцій. GANs складаються з двох нейромереж – генератора та дискримінатора, які

взаємодіють між собою, навчаючись створювати реалістичні синтетичні дані, що імітують динаміку фондового ринку. В роботі в якості генератора використовується модель Long Short-Term Memory (LSTM), яка призначена для обробки послідовних даних, зокрема часових рядів. Такий тип моделей може покращити точність прогнозів, особливо в умовах браку історичних даних (рис. 1).

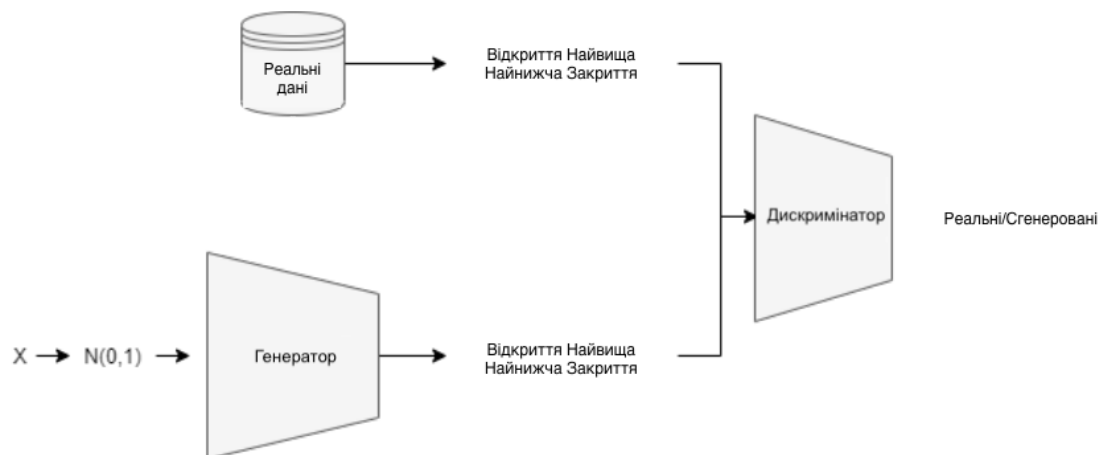


Рисунок 1 - Архітектура моделі GAN

Технологія GANs поєднує в собі, як відомо, міждисциплінарні підходи, а саме: двоосібну гру з нульовою сумою, оптимізацію при навчанні НМ, принцип максимізації правдоподібності та інші. В даному випадку, генератор $G(z, P_G)$ використовується для створення синтетичних даних. Тут z – латентний простір, на основі якого формуються нові фейкові дані подібні до реальних, P_G – параметри (ваги та зміщення), які використовуються для опису архітектури та функціонування генератора $G(z, P_G)$. У контексті нейронних мереж вказані параметри визначають зв'язки між нейронами, які навчаються під час тренування. Завдання дискримінатора $D(x, P_D)$ полягає в тому, щоб відрізнити/розпізнати генеровані дані z від x реальних P_D . Відповідно P_D – є параметрами $D(x, P_D)$, оскільки дискримінатор представляє собою теж нейронну мережу. Функція виграшу з нульовою сумою формулюється як:

$$U(D, G) = \min_G \max_D V(D, G) = \mathbb{E}_{x \sim P_{data}} [\ln D(x)] + \mathbb{E}_{z \sim P_Z(z)} [\ln (1 - D(G(z)))], \quad (1)$$

тут $G(z)$ – дані, що створені генератором G , який бере випадковий вектор z із латентного простору й перетворює його у згенеровані дані, які схожі на реальні; $D(G(z))$ – це ймовірність, яку дискримінатор D присвоює синтетичним даним, вважаючи їх реальними (результат знаходиться в діапазоні $[0, 1]$, де одиниця – дані схожі на реальні та нуль – дані виглядають підробленими) [4].

Однак у застосуванні GANs та механізмів уваги для прогнозування цін на акції є певні обмеження. Наприклад, генеративні моделі можуть створювати нереалістичні дані та стикатися з проблемою «колапсу моди», що знижує точність прогнозування. Механізми уваги, своєю чергою, потребують великих обсягів даних і можуть страждати від перенавчання, що обмежує їхню здатність узагальнювати інформацію та робити точні прогнози в реальних ринкових умовах.

Ефективність прогнозування запропонованої моделі була оцінена на основі реальних даних фондового ринку, а саме ціни закриття цінного паперу AAPL за період з 01.01.2023 року по 01.03.2025 року, а результати порівняно з найпоширенішими методами прогнозування авторегресійною інтегрованою моделлю ковзного середнього (ARIMA) та нейронною мережею довготривалої короткочасної пам'яті (LSTM). Результати наведені в таблиці 1.

Таблиця 1

Обчислені метрики точності

Модель	MAE	RMAE	MAPE
TGAN	3.0401	4.1026	0.0137
LSTM	4.1228	5.4131	2.8784
ARIMA	5.2353	6.2403	3,4803

Після аналізу отриманих метрик точності кожної з моделей, можна зробити висновок, що модель GAN забезпечує найнижчі похибки за всіма показниками. LSTM показує що добре справляється з прогнозуванням але поступається точністю моделям GANs. ARIMA має найнижчу точність, що робить її менш придатною для точного прогнозування в цьому випадку.

ЛІТЕРАТУРА

1. Перцев Ю.О., Коротка Л.І. Порівняльний аналіз традиційних статистичних методів та нейромережевої моделі. Системні технології. 2025. №1(156). С. 65-77.

(DOI 10.34185/1562-9945-1-156-2025-08)

2. Перцев Ю. О., Коротка Л. І. Порівняння нейронних мереж RNN та LSTM типу при прогнозуванні цін на фондовому ринку. Матеріали VIII Міжнародної науково-технічної конференції комп'ютерне моделювання та оптимізація складних систем (1-3 листопада 2023 року м. Дніпро, Україна). С. 124-127.

3. Korotka L., Klevzhyts D., Shvydko D. Use of generative-adversarial networks when creating content. Artificial intelligence. National Academy of Sciences of Ukraine Institute of Artificial Intelligence Problems MES of Ukraine and NAS of Ukraine. 2024 № 2 (99). P. 32-47. <https://doi.org/10.15407/jai2024.02.032>

4. K. Zhang, G. Zhong, J. Dong, S. Wang, and Y. Wang, "Stock Market Prediction Based on Generative Adversarial Network," *Procedia Computer Science*, vol. 147, pp. 400–406, 2019.

DEEP LEARNING IN FINANCIAL ANALYSIS: APPLICATION OF LSTM AND GANs FOR STOCK PRICE PREDICTION

Pertsev Y. O.¹, Korotka L. I.¹

Abstract. *Stock price prediction is a crucial aspect of financial analytics, helping investors make informed decisions. This study examines traditional forecasting methods, such as technical analysis (moving averages SMA, EMA) and statistical models (ARIMA, exponential smoothing). Their advantages and limitations are analyzed, particularly the challenges in capturing complex market patterns. To improve prediction accuracy, the use of modern machine learning approaches is proposed, specifically Long Short-Term Memory (LSTM) networks and Generative Adversarial Networks (GANs). The GAN architecture and its ability to model market dynamics even with limited historical data are described. The research is based on real stock market data (AAPL stock prices), and the results are compared with ARIMA and LSTM methods, confirming the effectiveness of the proposed approach.*

Keywords: *Time series forecasting, SMA, EMA, ARIMA, LSTM, GANs*

REFERENCE

1. Pertsev Y. O., Korotka L.I. Comparative analysis of traditional statistical methods and the LSTM neural network model. *System technologies*. 2025. №1(156). P. 65-77.

2. Pertsev Y. O., Korotka L. I. Porivniannia neuronnykh merezh RNN ta LSTM typu pry prohozuvanni tsin na fondovomu rynku. *Materialy VIII Mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii kompiuterne modeliuvannia ta optymizatsiia skladnykh system* (1-3 lystopada 2023 roku m. Dnipro, Ukraina). S. 124-127.

3. Korotka L., Klevzhyts D., Shvydko D. Use of generative-adversarial networks when creating content. *Artificial intelligence. National Academy of Sciences of Ukraine Institute of Artificial Intelligence Problems MES of Ukraine and NAS of Ukraine*. 2024 № 2 (99). P. 32-47. <https://doi.org/10.15407/jai2024.02.032>

4. K. Zhang, G. Zhong, J. Dong, S. Wang, and Y. Wang, "Stock Market Prediction Based on Generative Adversarial Network," *Procedia Computer Science*, vol. 147, pp. 400–406, 2019.

DOI: 10.34185/1991-7848.itmm.2025.01.107

ШТУЧНИЙ ІНТЕЛЕКТ У НАВІГАЦІЇ ДРОНІВ: СУЧАСНІ ПІДХОДИ, ВИКЛИКИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ

Підкоритов В.О.,¹Купін А.І.²

¹ТОВ “Сімкорп”,¹магістр, Україна

²Криворізький національний університет, д.т.н., професор, Україна

Анотація. У даній доповіді розглядаються сучасні підходи до використання алгоритмів штучного інтелекту (ШІ) у навігації безпілотних літальних апаратів (БПЛА). Додаткову увагу приділено огляду основних елементів створення інтелектуальної системи автономної навігації дрону: сучасним технологіям, що застосовуються в цій галузі, оптимізації маршрутів, видаленню шумів з даних, ухваленню рішень у реальному часі та покращенню сприйняття навколишнього середовища інтелектуальною системою. Зокрема, розглядається застосування методів машинного навчання, нейронних мереж, комп'ютерного зору, пропорційно-інтегрально-диференціальних регуляторів та фільтра Калмана. Також окреслено ключові виклики, що постають перед БПЛА під час польотів, таких як втрату зв'язку з оператором, змінні умови навколишнього середовища, перешкоди та складність виявлення і супроводу малопомітних або рухомих цілей.

Ключові слова: автоматизація, дрон, нейронна мережа, комп'ютерний зір, машинне навчання, ПІД - регулятор, фільтр Калмана, штучний інтелект.

У наш час безпілотні літальні апарати набули широкого застосування у різних сферах, включаючи логістику, рятувальні операції, сільське господарство та військову справу. Одним із ключових викликів їх використання є забезпечення автономної навігації та можливість ухвалення рішень у змінних умовах. Використання штучного інтелекту дозволяє значно покращити ефективність і точність управління дронами, що є критично важливим для їхнього функціонування.

Штучний інтелект (ШІ) включає в себе різні методи машинного навчання, які дозволяють обробляти велику кількість даних та адаптувати поведінку дронів відповідно до змін навколишнього середовища. Крім того, розвиток сенсорних технологій та комп'ютерного зору дозволяє покращити здатність безпілотних апаратів до ухвалення автономних рішень. З огляду на це, питання

інтеграції штучного інтелекту в навігаційні системи дронів є актуальним і потребує детального розгляду.

FPV дрон — це безпілотний літальний апарат (БПЛА) з камерою, яка бездротовим способом передає відео на окуляри, гарнітуру, мобільний пристрій або інший дисплей [1]. Користувач має змогу бачити від першої особи навколишнє середовище, де літає дрон, а також може знімати відео або фотографії.

Основними викликами використання FPV дронів є:

- втрата зв'язку між дроном та оператором, що може призвести до неможливості керування або аварійної посадки;
- змінні умови навколишнього середовища (освітлення, погодні умови, перешкоди), які ускладнюють орієнтацію та навігацію;
- складність виявлення і супроводу малопомітних або динамічно рухомих цілей, що вимагає високої точності сенсорів та адаптивних алгоритмів обробки даних.

Проблему втрати зв'язку можна виправити за допомогою використання дронів на оптоволоконні. Дві інші вищезазначені проблеми можна вирішити за допомогою створення інтелектуальної системи навігації.

Інтелектуальна система автономної навігації — це складна система, яка дозволяє об'єктам (наприклад, БПЛА, роботам, автомобілям або іншим автономним транспортним засобам) виконувати навігацію без безпосереднього втручання людини. Вона включає в себе набір технологій і алгоритмів, що дозволяють цьому об'єкту ефективно орієнтуватися в просторі, взаємодіяти з навколишнім середовищем та ухвалювати рішення на основі аналізу даних. Нижче наведений перелік компонентів, які можуть бути використані для створення такої системи:

- програмуємий дрон або мікрокомп'ютер, який може бути інтегрований в БПЛА;
- машинне навчання;
- система комп'ютерного зору;
- фільтр Калмана;
- нейронні мережі;
- програмуємий логічний контролер (типу нейро/ПІД – або інший регулятор).

Методи машинного навчання дозволяють дронам аналізувати навколишнє середовище та ухвалювати рішення на основі отриманих даних.

Зокрема, алгоритми підкріпленого навчання використовуються для оптимізації маршрутів польоту, а глибоке навчання — для обробки відеопотоків із камер БПЛА.

Застосування нейронних мереж у навігації дозволяє дронам розпізнавати об'єкти, визначати перешкоди та ухвалювати оптимальні рішення для їхнього уникнення. Наприклад, згорткові нейронні мережі (CNN) можуть аналізувати зображення з камер та розпізнавати інфраструктурні об'єкти або природні перешкоди.

Використання глибокого навчання у навігації дронів дозволяє підвищити точність ухвалення рішень навіть у складних умовах. Наприклад, нейромережі можуть навчатися на великій кількості даних, що дозволяє їм адаптуватися до різних сценаріїв польоту. Це особливо корисно при виконанні складних місій, таких як рятувальні операції, дослідження важкодоступних територій або військові завдання.

Комп'ютерний зір є однією з ключових технологій автономної навігації. Дрони можуть використовувати камери та сенсори для аналізу навколишнього середовища, розпізнавання перешкод та ухвалення рішень щодо траєкторії польоту. Сучасні нейронні мережі дозволяють здійснювати точну ідентифікацію об'єктів і визначати безпечні маршрути у складних умовах.

Алгоритм фільтра Калмана [2] є потужним інструментом для оцінки та прогнозування станів системи за наявності невизначеності. Цей засіб досить широко використовується як фундаментальний компонент у таких програмах, як відстеження цілей, навігація та керування, фільтрація тощо. Головна мета підхід — об'єднати інформацію з різних джерел (наприклад, датчиків), щоб отримати більш точну оцінку положення, швидкості або інших параметрів.

ПІД-регулятори являють собою складний механізм зворотного зв'язку, важливий для керування динамічними системами [3]. За своєю суттю такі регулятори працюють за допомогою трьох основних елементів: пропорційний (П), інтегральний (І) і диференціальний (Д). Кожна складова унікальним способом модулює вихідний сигнал на основі різниці між бажаним заданим значенням і фактичним виміряним значенням, відомим як похибка.

ПІД-регулятор безперервно обчислює сигнал помилки як різницю між бажаним цільовим значенням і поточною змінною процесу (вимірним значенням). На основі цього сигналу помилки контролер регулює вхідний сигнал керування системою так, щоб мінімізувати помилку та підтримувати змінну процесу близько до заданого значення.

Нейронні мережі, можуть бути використані для передбачення майбутніх значень помилки або відхилень, що дозволяє ПІД-регулятору не лише реагувати на поточну помилку, але й враховувати майбутні зміни. Наприклад, замість того, щоб просто коригувати помилку в реальному часі, система може передбачити, як ця помилка буде змінюватися на основі минулих даних. Отже, підготувати регулятор до коригування параметрів заздалегідь.

Нейронні мережі можуть використовуватися для автоматичного налаштування параметрів ПІД-регулятора в реальному часі, що дозволяє покращити його ефективність при змінних умовах:

- під час зміни зовнішніх факторів, таких як швидкість вітру або зміни температури, ПІД-регулятор може недостатньо ефективно автоматизувати процес без допомоги адаптації;

- нейронні мережі можуть навчатися на історичних даних та коригувати параметри K_p , K_i , K_d таким чином, щоб забезпечити оптимальну продуктивність;

- покращення стійкості системи: Нейронні мережі можуть бути навчені на даних про стрибки або зміни в зовнішніх умовах, що дозволяє більш точно передбачити та регулювати реакцію системи.

Існують різні методи створення ПІД регулятора з нейронною мережею (ПІДНМ). Наприклад:

- нейронна мережа з П-, І-, Д- нейронами;
- підсилення ПІД - регулятора нейронною мережею.

Перший варіант є більш складним для реалізації, так як вимагає створення пропорційного, інтегрального, диференціального типу нейронів. Далі на їх базі відбувається створення тришарової нейронної мережі [4]. Схема такої штучної нейронної мережі представлена на рис. 1.

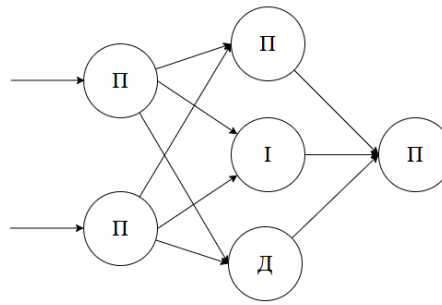


Рисунок 1 - Схема ШНМ з ПІД нейронами [4]

Другий варіант більш простий в реалізації, так як являє собою класичний ПІД – регулятор. Його вихід є входом в нейронну мережу, яка в свою чергу прогнозує майбутнє значенні ПІД - регулятора. Схема представлена на рис. 2.

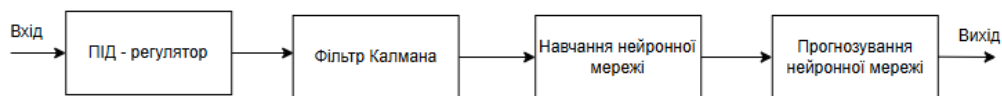


Рисунок 2 - Схема ПІД регулятора з підсиленням ШНМ

Алгоритм реалізації системи розпізнавання та захвату цілі, а також керування рухом дрону за ціллю показано на рис. 3.

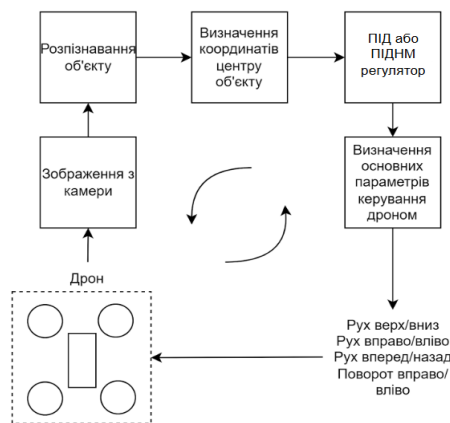


Рисунок 3 - Алгоритм реалізації машинного зору системи

За допомогою вбудованої камери робиться захват відео, кожен кадр якого необхідно обробити алгоритмом розпізнавання образів відповідно до задачі, що вирішується. Одним із потужних сучасних інструментів розпізнавання є бібліотека MediaPipe Solutions від Google. За допомогою неї можна розпізнати об'єкт і визначити його координати на зображенні. Шкала координат визначається кількістю пікселів зображення по горизонталі і вертикалі.

Наступним етапом є робота ПІД- або ПІДНМ - регулятора. Початкові коефіцієнти регулятора можна визначити за допомогою, наприклад, методу Циглера-Нікольса. Для визначення помилки обчислюються різниці між центром зображення і поточними координатами цілі. Далі отримані величини передаються дрону як команди повороту дрону вправо або вліво і його рух вгору - вниз.

Висновки. Отже, застосування систем інтелектуального управління та нейрокерування в дронах є важливим кроком у вирішенні актуальних проблем їх використання. Ці технології дозволяють значно покращити ефективність керування дронами у специфічних сферах застосування, забезпечуючи більш точну та стабільну роботу в умовах активних завад, протидії, нечіткої та/або неповної інформації. Отримані результати можуть використовуватися для реалізації систем автоматичної навігації БПЛА для яких є важливим швидкість прийняття рішень та висока ймовірність виконання завдання в автоматичному режимі в складних умовах. Подібна система може допомогти виключити оператора з процесу управління і налаштування і дрона.

ЛІТЕРАТУРА

1. FPV. techtarget.com. URL: <https://www.techtargеt.com/whatis/definition/FPV-drone-first-person-view-drone> (дата звернення: 05.04.2025).
2. Фільтр Калмана. URL: <https://www.kalmanfilter.net/default.aspx> (дата звернення: 05.04.2025).
3. ПІД-регулятор. URL: <https://dewesoft.com/blog/what-is-pid-controller> (дата звернення: 05.04.2025).
4. PIDNN. URL: <https://molefrog.com/etc/pid-neural-network/#d-neuron> (дата звернення: 05.04.2025).

ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN DRONE NAVIGATION: APPROACHES, CHALLENGES AND PROSPECTS

Pidkorytov Volodymyr, Kupin Andrew

Abstract. *The article reviews modern approaches to the use of artificial intelligence (AI) in the navigation of unmanned aerial vehicles (UAVs), such as machine learning and computer vision, neural networks, PID controllers, Kalman filter and other technologies used for autonomous control of drones. Additional attention is paid to an overview of the main elements of creating an intelligent autonomous drone navigation system, modern technologies used in this area, route optimization, data denoising, real-time decision-*

making and improving the perception of the environment by an intelligent system. Key challenges are also outlined, including loss of communication with the operator, changing environmental conditions and the complexity of tracking low-visibility moving targets.

Keywords: *artificial intelligence, automation, computer vision, drone, Kalman filter, machine learning, neural network, PID controller.*

REFERENCE

1. FPV. techtarget.com. URL: <https://www.techtarget.com/whatis/definition/FPV-drone-first-person-view-drone>
2. Kalman filter. URL: <https://www.kalmanfilter.net/default.aspx>
3. PID controller. URL: <https://dewesoft.com/blog/what-is-pid-controller>
4. PIDNN. URL: <https://molefrog.com/etc/pid-neural-network/#d-neuron>

UNIVERSAL CLASSIFICATION FOR MAINTENANCE APPROACHES

Romanenko O. O ¹., Kupin A. I ²

¹ Kryvyi Rih National University, ¹ PhD student, Ukraine

² Kryvyi Rih National University, Doctor of technical sciences, professor, ² Ukraine

Abstract. *This study tackles the issue of inconsistencies in maintenance classifications across various institutions, industries, and regions, highlighting the absence of a generally accepted classification of maintenance approaches despite extensive research in the field. The primary goal of this research is to propose a comprehensive and universally applicable classification of maintenance approaches. Through an in-depth review of existing literature, diverse maintenance methodologies were identified, evaluated, and synthesized to form the basis of a new classification framework. This paper introduces a general classification that integrates key maintenance types, aiming to provide clarity and consistency.*

Keywords: *maintenance, classification, maintenance approach*

As industrial automation continues to evolve, the machinery used in manufacturing has become more complex and abundant. This makes proper maintenance not just important, but essential for keeping operations safe, reliable, and efficient. Over time, equipment naturally wears down due to usage, age, and environmental conditions, which increases the risk of breakdowns and can negatively affect both product quality and overall costs. Although maintenance is widely accepted as a key part of any industrial strategy, how it's defined and categorized can vary significantly between different organizations, standards, and studies—leading to confusion and inconsistent practices. This paper aims to clear up that confusion by offering a unified framework for classifying maintenance strategies, grounded in an extensive review of existing literature, to support more effective and streamlined maintenance efforts in today's manufacturing environments.

There has been done a literature review that revealed how much existing classifications of maintenance approaches distinct from each other.

The ISO standard [1] divides maintenance into corrective and preventive categories, with preventive further split into condition-based and predetermined types, and corrective into immediate and deferred subcategories. The U.S.

Department of Energy [2] proposes four approaches: reactive, preventive, predictive, and RCM. Similarly, the European Standard EN 13306:2017 [3] classifies maintenance into corrective and preventive types, incorporating condition-based and improvement-oriented subcategories. Academic sources add further variety: [4] outlines a hierarchy including corrective, preventive, and proactive approaches; [5] describes reactive, proactive, and aggressive strategies, with the latter focusing on system enhancement; [6] emphasizes corrective, preventive, and improvement maintenance. [7] focuses on corrective, preventive, and predictive types. In [8] authors introduce Design-Out Maintenance (DOM), which, they say, in an approach aimed to eliminate a root causes of maintenance. [9] proposes a reactive-preventive taxonomy, uniquely including opportunistic maintenance as preventive work performed during unplanned downtime.

Table 1 consolidates these classifications, highlighting the absence of a universal framework and underscoring the need for a standardized approach to unify maintenance terminology and practices.

Table 1

Maintenance Types from Literature Review										
Source	Maintenance type									
	Corrective	Preventive	Condition-based	Predetermined	Reactive	Predictive	Reliability centered	Improvement	Proactive	Opportunistic
[1]	+	+	+	+						
[2]		+			+	+	+			
[3]	+	+	+	+		+		+		
[4]	+	+	+		+	+			+	
[5]	+	+	+		+			+	+	+
[6]	+	+				+		+		
[7]	+	+				+				
[8]	+	+	+					+		
[9]	+	+		+	+	+			+	+

Building on the insights from the literature review, this study proposes a comprehensive classification of maintenance approaches to address the inconsistencies observed across existing frameworks. The proposed structure (Fig. 1) integrates widely recognized maintenance types into a unified hierarchy,

emphasizing clarity and adaptability. At its core, it retains the two foundational categories — reactive (or corrective) and proactive. Reactive maintenance defined as a maintenance approach that involves corrective actions triggered by the actual equipment failure. Proactive maintenance is aimed at averting failures. It is subdivided into predetermined, condition-based (driven by real-time equipment health assessments), and improvement-oriented (focused on asset's design modifications to enhance its reliability) approaches. Predictive maintenance is classified as a subset of condition-based maintenance, leveraging data-driven forecasts to optimize interventions. Opportunistic maintenance is included under preventive maintenance, reflecting preventive tasks performed during unscheduled opportunities, such as downtime.

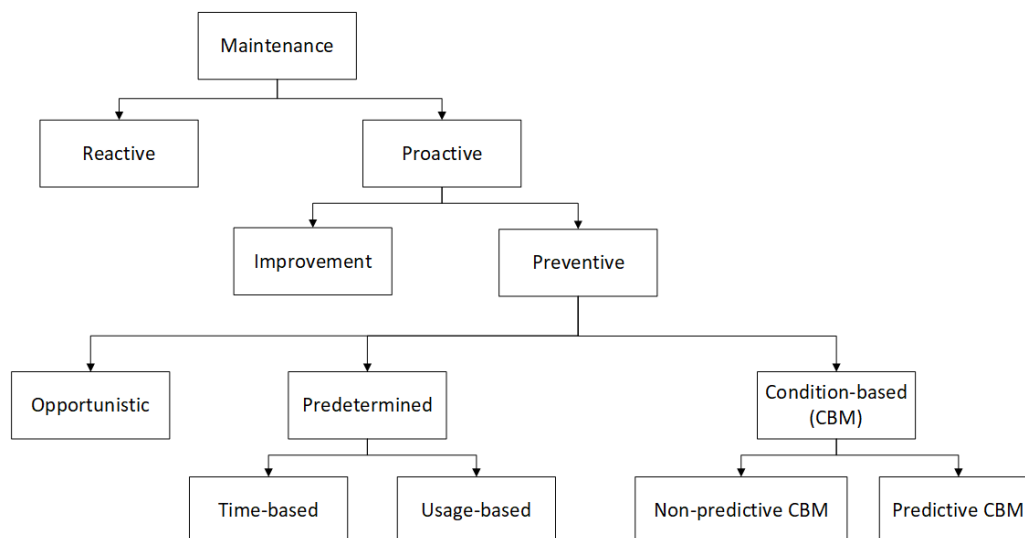


Figure 1 -- Proposed maintenance classification structure

In the proposed classification we tried to balance between simplicity and comprehensiveness. By organizing maintenance approaches in such hierarchical way, the framework provides a clear universal reference point for maintenance practitioners and researchers.

Conclusion. The general classification framework proposed in this paper seeks to harmonize the diverse approaches to maintenance found in both academic and industrial contexts. It provides a foundation for further research and standardization efforts in maintenance engineering and management.

REFERENCES

1. ISO 14224:2016. Petroleum, petrochemical and natural gas industries – Collection and exchange of reliability and maintenance data for equipment. Replaces ISO 14224:2006 ; effective from 2016-10-01. Official edition. 2016.
2. Operations & Maintenance Best Practices, A Guide to Achieving Operational Efficiency / G. P. Sullivan et al. 2010.
3. BS EN 13306:2017. Maintenance. Maintenance terminology. Replaces BS EN 13306:2010. Official edition. 2018.
4. INFOTRONIC TECHNOLOGIES FOR E-MAINTENANCE REGARDING THE COST ASPECTS/ H. Erbe et al. IFAC Proceedings Volumes. 2005. Vol. 38, no. 1. P. 1–12. URL: <https://doi.org/10.3182/20050703-6-cz-1902.01384>.
5. Feng M., Li Y. Predictive Maintenance Decision Making Based on Reinforcement Learning in Multistage Production Systems. IEEE Access. 2022. Vol. 10. P. 18910–18921. URL: <https://doi.org/10.1109/access.2022.3151170>.
6. Mobley R. K. Maintenance Fundamentals. 2nd ed. Burlington : Elsevier, 2004. 425 p.
7. Gackowiec P. General overview of maintenance strategies – concepts and approaches. Multidisciplinary Aspects of Production Engineering. 2019. Vol. 2, no. 1. P. 126–139. URL: <https://doi.org/10.2478/mape-2019-0013>
8. Strategical selection of maintenance type under different conditions / M. M. Hamasha et al. Scientific Reports. 2023. Vol. 13, no. 1. URL: <https://doi.org/10.1038/s41598-023-42751-5>
9. The role of maintenance regarding improving product quality and company's profitability: A case study / D. Maletič et al. IFAC Proceedings Volumes. 2012. Vol. 45, no. 31. P. 7–12. URL: <https://doi.org/10.3182/20121122-2-es-4026.00040>

УНІВЕРСАЛЬНА КЛАСИФІКАЦІЯ МЕТОДІВ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ

Романенко О. О., Купін А. І

Анотація. *Це дослідження розглядає проблему непослідовності в класифікаціях методів технічного обслуговування серед різних установ, організацій та дослідників. Визначається відсутність загальноприйнятої класифікації підходів до технічного обслуговування, незважаючи на широкі дослідження в цій галузі. Основною метою цього дослідження є розробка універсальної класифікаційної схеми для підходів до технічного обслуговування. Проведений огляд існуючих джерел, дозволив ідентифікувати та проаналізувати різноманітні класифікаційні схеми та методи технічного обслуговування, на основі чого було сформовано основу нової класифікаційної структури. У цій роботі представлено універсальну класифікацію, яка інтегрує ключові типи технічного обслуговування.*

Ключові слова: *технічне обслуговування, класифікація, підхід до технічного обслуговування*

ЖИТЕПАТҮПА

1. ISO 14224:2016. Petroleum, petrochemical and natural gas industries – Collection and exchange of reliability and maintenance data for equipment. Replaces ISO 14224:2006 ; effective from 2016-10-01. Official edition. 2016.
2. Operations & Maintenance Best Practices, A Guide to Achieving Operational Efficiency / G. P. Sullivan et al. 2010.
3. BS EN 13306:2017. Maintenance. Maintenance terminology. Replaces BS EN 13306:2010. Official edition. 2018.
4. INFOTRONIC TECHNOLOGIES FOR E-MAINTENANCE REGARDING THE COST ASPECTS/ H. Erbe et al. IFAC Proceedings Volumes. 2005. Vol. 38, no. 1. P. 1–12. URL: <https://doi.org/10.3182/20050703-6-cz-1902.01384>.
5. Feng M., Li Y. Predictive Maintenance Decision Making Based on Reinforcement Learning in Multistage Production Systems. IEEE Access. 2022. Vol. 10. P. 18910–18921. URL: <https://doi.org/10.1109/access.2022.3151170>.
6. Mobley R. K. Maintenance Fundamentals. 2nd ed. Burlington : Elsevier, 2004. 425 p.
7. Gackowiec P. General overview of maintenance strategies – concepts and approaches. Multidisciplinary Aspects of Production Engineering. 2019. Vol. 2, no. 1. P. 126–139. URL: <https://doi.org/10.2478/mape-2019-0013>
8. Strategical selection of maintenance type under different conditions / M. M. Hamasha et al. Scientific Reports. 2023. Vol. 13, no. 1. URL: <https://doi.org/10.1038/s41598-023-42751-5>
9. The role of maintenance regarding improving product quality and company's profitability: A case study / D. Maletič et al. IFAC Proceedings Volumes. 2012. Vol. 45, no. 31. P. 7–12. URL: <https://doi.org/10.3182/20121122-2-es-4026.00040>

ІНФОРМАЦІЙНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ ПОКРАЩЕННЯ РЕСУРСОЕФЕКТИВНОСТІ ВИРОБНИЦТВА

Русакова Т.І.

Дніпровський національний університет імені О. Гончара, д,т,н, професор, Україна

Анотація. У сучасному промисловому середовищі інформаційні системи відіграють ключову роль у забезпеченні раціонального використання ресурсів. Вони сприяють автоматизації управлінських процесів, здійсненню моніторингу в реальному часі та глибокому аналізу даних, що дозволяє підприємствам ефективніше розпоряджатися енергетичними, водними та сировинними ресурсами. Завдяки цьому знижується рівень витрат, удосконалюються виробничі процеси, зменшується кількість відходів, а також підвищується якість продукції й загальна продуктивність. Окрім економічних переваг, такі системи сприяють зменшенню шкоди для довкілля, підтримуючи принципи сталого розвитку. Водночас упровадження інформаційних рішень вимагає значних фінансових ресурсів, грамотної інтеграції з наявними технологічними платформами та належного рівня підготовки персоналу. Для досягнення результативності необхідне комплексне стратегічне планування, активна участь керівництва та поступова трансформація корпоративної культури.

Ключові слова: інформаційне забезпечення, ресурсоефективне виробництво, ресурсозбереження, прогнозування, проєктування

У теперішній час, коли екологічні проблеми набувають усе більшого загострення, а ринкова конкуренція зростає, перед промисловими підприємствами постають нові виклики. Ці виклики вимагають не просто модернізації, а кардинального переосмислення підходів до управління ресурсами. Ефективність виробництва більше не зводиться лише до економії, вона повинна стратегічно змінити підходи щодо викликів сталого розвитку з урахуванням суворих норм екологічного законодавства.

Одним із головних чинників, що впливає на рівень ресурсоефективності стає впровадження інноваційних інформаційних систем управління. Завдяки цим системам підприємства отримують можливість точно та своєчасно контролювати всі етапи виробничого процесу. Такі рішення забезпечують збір великого обсягу даних із великої кількості джерел, починаючи від сенсорів на обладнанні до показників споживання енергії, води та сировини.

Після збору даних вони проходять глибоку обробку за допомогою сучасних аналітичних інструментів, що дозволяє виявляти приховані закономірності, впроваджувати більш оптимальні технологічні складові, скорочувати втрати та запобігати технічним збоям.

Крім того, інформаційні технології дозволяють зробити прийняття управлінських рішень більш прозорими. Керівники мають змогу оперувати достовірною інформацією в режимі реального часу, що значно підвищує ефективність стратегічного планування та дає змогу швидко адаптуватися до змін, дотримуючись екологічних вимог.

Таким чином, інформаційні технології стають потужним інструментом переходу до ресурсоефективного виробництва, що поєднує економічну вигоду, технологічну досконалість і відповідальне ставлення до довкілля.

Зокрема, використання інформаційних систем дозволяє підприємствам розв'язувати три ключові завдання [1–4]:

1. Забезпечення постійного моніторингу ресурсів – контроль витрат енергії, води та сировини в реальному часі;
2. Глибокий аналіз ефективності виробничих процесів – виявлення слабких місць і технічних недосконалостей;
3. Оптимізація планування – формування стратегій для зменшення витрат і підвищення загальної продуктивності

Опитування та експрес-анкетування головних інженерів, технологів та енергетиків підприємств різних галузей виробництва дозволило виділити п'ять основних, найбільш важливих процесів, що реально забезпечують моніторинг споживання ресурсів.

По-перше, на всіх ключових точках споживання ресурсів, наприклад, на виробничому обладнанні, у водопроводах, на лініях подачі сировини, встановлюються датчики, які фіксують обсяги використаних ресурсів. Для енергії – лічильники електроенергії, тепла, газу; для вода – витратоміри, датчики тиску, рівня; для сировини – вагові системи, датчики обсягу, рівня у бункерах та складах.

По-друге, передача даних в інформаційну систему проводиться так, що дані з усіх сенсорів передаються в централізовану систему моніторингу, наприклад, через протоколи OPC, Modbus, MQTT або Wi-Fi у випадку бездротових мереж. Найчастіше для цього використовуються: SCADA – системи Supervisory Control and Data Acquisition, що відображають стан ресурсоспоживання у реальному часі; MES-системи, що інтегрують ці дані у виробничий процес.

По-третє, візуалізація та аналітика даних дає кращий результат, коли зібрані дані відображаються на інтерактивних панелях, діаграмах, графіках або в таблицях. Вони показують, скільки кВт год спожито кожною виробничою лінією за зміну, де відбулося перевищення допустимих норм споживання води, скільки сировини витрачено на виробництво однієї одиниці продукції. Це дозволяє оперативно виявляти аномалії, витоки, перевитрати або збої.

По-четверте, автоматизоване управління та попередження відбувається так, що система може бути запрограмована на автоматичну реакцію. При перевищенні ліміту споживання енергії система може знизити потужність окремих установок, а також надіслати повідомлення відповідальному із обслуговуючого персоналу (SMS, email, сповіщення в системі).

По-п'яте, зберігання та аналіз даних, їх архівація дозволяє вести звіти про споживання ресурсів по періодах (день, місяць, рік). А також можна здійснювати енергетичний аудит, будувати прогнози за допомогою аналітично-статистичної обробки даних.

Це дає змогу підприємствам зменшувати втрати, оптимізувати споживання, а також відповідати сучасним вимогам енергоефективності та екологічного менеджменту.

Аналіз ефективності виробничих процесів – один із ключових етапів у впровадженні ресурсоефективного виробництва. Він повинен проводитися з метою виявлення вузьких місць та неефективностей виробництва. Респонденти виділяють шість найважливіших етапів такого аналізу:

1. Аналіз даних, які надходять з виробничих ділянок, повинен визначати час виконання кожного етапу процесу, обсяги використаних ресурсів, таких як

енергії, сировини, води. Аналіз повинен включати оцінку продуктивності обладнання, кількості бракованої продукції, простоїв та зупинок обладнання. Дані можуть надходити у MES- або SCADA-системи, де автоматично фіксуються та зберігаються.

2. Інформація може бути проаналізована за допомогою VSM цифрової моделі, що показує рух матеріалів і інформації від початку до кінця процесу та моделі Digital Twin, що віртуально створює копію фізичного процесу для моделювання запропонованих змін.

3. Одночасно потрібно виявляти «вузькі місця», ділянки, які уповільнюють весь процес. Такі місця визначаються за допомогою часових графіків, які відображають надмірну тривалість виконання або черги, а також OEE-аналізу, що фіксує втрати по трьох складових, таких, як доступність, продуктивність і якість.

4. Важливим є процес ідентифікації неефективностей, які можуть бути різного типу. Перевитрати енергії виникають внаслідок експлуатації старого обладнання, яке споживає більше ніж потрібно енергії. Велика кількість простоїв, що виникають через неузгоджену логістику або поломки. А також брак і перевиробництво, високі втрати сировини або матеріалу. Це все виявляється за допомогою аналітики даних, а також інструментів типу Pareto-аналізу, що визначає головні джерела втрат.

5. Для більшої наочності та зрозумілості, результати проведеного вище вказаного аналізу потребують візуалізації, що забезпечується зображенням графіків навантаження обладнання, а також діаграмами відхилень у витратах ресурсів, індикаторами, що включають ключові показники ефективності.

6. На основі отриманої інформації розробляються рішення для оптимізації, що включають, як заміну обладнання та перебудову логістики, так і зміну технологічного процесу та автоматизацію повторюваних операцій.

Інформаційні системи допомагають *оптимізувати* планування для підвищення ресурсоефективності на підприємствах. Респонденти виділяють п'ять основних складових даного процесу.

1. Централізоване планування на основі отриманих даних включають інформаційні системи (ERP, MES, APS), що збирають дані з усіх підрозділів підприємства – виробництва, складу, закупівель, енергетики. Це дозволяє бачити реальні обсяги ресурсів, їх наявність і споживання, а також формувати збалансовані виробничі графіки та уникати перевиробництва і простоїв.

2. Моделювання сценаріїв і їх симуляція проводиться за допомогою системи підтримки прийняття рішень (DSS), що дозволяє змоделювати різні сценарії планування. А саме, що буде, якщо зменшити споживання енергії на 12%? Як вплине на витрати зміна постачальника сировини? Який графік мінімізує простої? Це допомагає вибрати найефективнішу стратегію.

3. Динамічне планування у реальному часі можливе за участі сучасних інформаційних систем, що дозволяють швидко коригувати план у разі відсутності сировини, поломки, зміни замовлення, а також застосовувати алгоритми оптимізації для зниження енерговитрат у нічні години.

4. Аналіз витрат та прогнозування також виконують інформаційні системи. Вони здійснюють фінансовий аналіз витрат ресурсів та прогнозування споживання ресурсів. Вони також виявляють неефективності у розподілі часу, енергії, праці.

Це допомагає сформувати стратегії економії, тобто відтворити перехід на енергоефективне обладнання, закупівлю більш якісної сировини.

5. Контроль досягнень стратегічних цілей можна провести за допомогою ключових показників ефективності KPI. За даними показниками оцінюється ефективність стратегії, а саме, обсяги споживання ресурсів на одиницю продукції, загальні енергетичні витрати, а також продуктивність обладнання, її собівартість, якість і затримка процесу. Це дозволяє коригувати стратегії в динаміці.

Із аналізу проведених досліджень [1-4] можна виділити основні *переваги* впровадження інформаційних систем на підприємстві у контексті ресурсоефективного виробництва. До найбільш суттєвих переваг відноситься зниження витрат, підвищення продуктивності і покращення якості продукції.

Зниження витрат відбувається за рахунок виконання наступних дій:

- оптимізації використання ресурсів, так як інформаційні системи допомагають точно планувати обсяги енергії, сировини та води, що мінімізує перевитрати;

- зменшення відходів, оскільки завдяки аналітиці та контролю виробничих процесів зменшуються втрати матеріалів, що також сприяє екологічності;

- раціоналізації логістики, планування транспортування, зберігання та постачання матеріалів відбувається ефективніше завдяки інформаційним системам, що скорочує витрати на логістику.

Підвищення продуктивності є наслідком:

- автоматизації рутинних процесів, так як роботизація та автоматичне керування знижують навантаження на персонал і підвищують швидкість виконання операцій;

- зменшення простоїв, так як системи моніторингу дозволяють швидко виявляти поломки або відхилення, що забезпечує безперервність виробництва;

- оптимізації графіків виробництва, оскільки завдяки системам планування ресурси використовуються рівномірно, без перевантажень.

Покращення якості продукції досягається завдяки:

- постійному моніторингу параметрів, так як системи відстежують температуру, тиск, вологість, склад сировини тощо, що допомагає підтримувати стабільну якість;

- своєчасному виявленню дефектів, оскільки алгоритми контролю якості одразу реагують на відхилення та запобігають випуску бракованої продукції;

- трасуванню продукції, так як ІТ-системи дозволяють відстежити шлях кожного виробу, а саме від сировини до готового продукту, що підвищує довіру клієнтів.

Підприємства під час впровадження інформаційних систем у виробничій сфері стикаються і з *різними викликами та обмеженнями*: високі інвестиції; необхідність навчання персоналу; інтеграція з існуючими системами.

Високі початкові інвестиції включають:

- фінансові витрати на обладнання та програмне забезпечення, оскільки придбання серверів, ліцензійного ПЗ, датчиків, контролерів та іншого обладнання, що може становити значну суму, особливо для середніх і малих підприємств;

- витрати на налаштування, так як інформаційні системи потребують адаптації до специфіки підприємства, що вимагає додаткових витрат на програмування та технічну підтримку;

- тривалий термін окупності, тому що ефект від впровадження може бути відчутним лише через кілька місяців або навіть років.

Необхідність навчання персоналу включає:

- недостатній рівень цифрової грамотності, так як співробітники, особливо з технічних або виробничих підрозділів, можуть мати обмежений досвід роботи з IT-розробками.

- потребу в безперервному навчанні, тому що IT-системи оновлюються, тому потрібно регулярно оновлювати знання персоналу, проводити тренінги та сертифікацію.

- неприйняття змін, оскільки дуже часто співробітники бояться автоматизації, сприймаючи її як загрозу своїм робочим місцям;

Не менш важливою є поєднання, включення, тобто інтеграція в існуючі системи. Інтеграція торкається наступного:

- технічної несумісності, коли старе обладнання або програмне забезпечення може не підтримувати сучасні протоколи обміну даними, що ускладнює інтеграцію;

- подвійного ведення обліку, так як на початкових етапах можуть виникати ситуації, коли інформацію доводиться дублювати в старій та новій системах;

- проблем з безпекою даних, оскільки при об'єднанні кількох систем зростають ризики втрати або витоку важливої інформації.

Також виділяють інші можливі виклики впровадження інформаційних систем в ресурсоефективне виробництво. а саме: **залежність від постачальника; масштабування; неоднозначні результати впровадження.**

Висновки. Інформаційні системи відіграють важливу роль у підвищенні ресурсоефективності виробництва, сприяючи оптимізації процесів, зниженню витрат та мінімізації впливу на довкілля. Проте успішне їх впровадження вимагає ретельного планування, значних інвестицій та підготовки персоналу. З огляду на глобальні тенденції до цифровізації та зростаючу потребу в екологічно відповідальному виробництві, використання інформаційних технологій стає невід’ємною складовою конкурентоспроможного підприємства.

ЛІТЕРАТУРА

1. Kolawole, O.M., Otiko, A.O., Akpotuzor, S.A. & Abdulsalam, N. (2025). IoT-Enabled Energy Management Monitoring System for Sustainable Resource Optimization. *British Journal of Computer, Networking and Information Technology*, 8(1), 1–14. <https://doi.org/10.52589/bjcnit-kj95augm>
2. Abbas, S., Khan, M.A., Falcon-Morales, L.I., Rehman, A., Saeed, Y. & Zareei, M. (2020). Modeling, Simulation and Optimization of Power Plant Energy Sustainability for IoT Enabled Smart Cities Empowered With Deep Extreme Learning Machine, *IEEE Access*, 8, 39982–39997. doi: 10.1109/ACCESS.2020.2976452
3. Khan, M.I., Yasmeen, T., Khan, M., Hadi, N., Ul, Asif, M., Farooq, M. & Al-Ghamdi, S. G. (2025). Integrating industry 4.0 for enhanced sustainability: Pathways and prospects, *Sustainable Production and Consumption*, 54, 149–189. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2024.12.012>
4. Aljohani, A.(2024). Deep learning-based optimization of energy utilization in IoT-enabled smart cities: A pathway to sustainable development, *Energy Reports*, 12, 2946–2957, <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2024.08.075>

INFORMATION SUPPORT IN ENVIRONMENTAL PROTECTION TECHNOLOGIES

Tetiana Rusakova

Abstract. *In the modern industrial environment, information systems play a key role in ensuring the rational use of resources. They contribute to the automation of management processes, real-time monitoring and deep data analysis, which allows enterprises to manage energy, water and raw materials more efficiently. This reduces costs, improves production processes, reduces waste, and increases product quality and overall productivity. In addition to economic benefits, such systems help reduce environmental damage, supporting the principles of sustainable development. At the same time, the implementation of information solutions requires significant financial resources, competent integration with existing technological platforms and an appropriate level of staff training. To achieve effectiveness, comprehensive strategic planning, active*

participation of management and a gradual transformation of corporate culture are necessary.

Keywords: *information support, resource-efficient production, resource conservation, forecasting, design*

REFERENCE

1. Kolawole, O.M., Otiko, A.O., Akpotuzor, S.A. & Abdulsalam, N. (2025). IoT-Enabled Energy Management Monitoring System for Sustainable Resource Optimization. British Journal of Computer, Networking and Information Technology, 8(1), 1–14. <https://doi.org/10.52589/bjcnit-kj95augm>
2. Abbas, S., Khan, M.A., Falcon-Morales, L.I., Rehman, A., Saeed, Y. & Zareei, M. (2020). Modeling, Simulation and Optimization of Power Plant Energy Sustainability for IoT Enabled Smart Cities Empowered With Deep Extreme Learning Machine, IEEE Access, 8, 39982–39997. doi: 10.1109/ACCESS.2020.2976452
3. Khan, M.I., Yasmeen, T., Khan, M., Hadi, N., Ul, Asif, M., Farooq, M. & Al-Ghamdi, S. G. (2025). Integrating industry 4.0 for enhanced sustainability: Pathways and prospects, Sustainable Production and Consumption, 54, 149–189. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2024.12.012>
4. Aljohani, A.(2024). Deep learning-based optimization of energy utilization in IoT-enabled smart cities: A pathway to sustainable development, Energy Reports, 12, 2946–2957, <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2024.08.075>

МЕТОДИ ПОКРАЩЕННЯ ВЕЛИКИХ МОВНИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ПОКРАЩЕННЯ ЯКОСТІ РЕФАКТОРИНГУ КОДУ

Сирота О.А.¹, Горячкін В.М.²

¹Український державний університет науки і технологій, аспірант Україна

²Український державний університет науки і технологій, ²к.т.н., доц., Україна

Анотація. У даному дослідженні розглядаються методи покращення великих мовних моделей (LLM) для рефакторингу програмного забезпечення. Використовуючи методи точного налаштування та індексації файлів вихідного коду, розкривається питання покращення результатів використання LLM для задачі рефакторингу кодових баз та покращеного використання контексту мовних моделей. Запропоновані підходи націлені на підвищення якості вихідного коду після рефакторингу, а також покращення різних великих мовних моделей шляхом змін в самій моделі чи інтеграції її з додатковим програмним забезпеченням. Оцінка результатів реалізації методів буде здійснюватися за допомогою показників Code Health та F1-метрики. Це дає змогу визначити ефективність запропонованих рішень. Результати досліджень відкривають нові перспективи для академічних досліджень та ефективного впровадження у проекти різного масштабу.

Ключові слова: рефакторинг, розробка, код, LLM, штучний інтелект, машинне навчання, велика мовна модель.

Сучасний технологічний ландшафт характеризується стрімким розвитком програмного забезпечення, що призводить до зростання обсягів коду та складності проектів. Реалізація якісного програмного забезпечення (ПЗ) вимагає врахування багатьох факторів, таких як компетентність розробників, ефективність проектного менеджменту, доступність ресурсів та зміни вимог до системи. У цьому контексті рефакторинг коду виступає ключовим інструментом покращення внутрішньої структури ПЗ без зміни бізнес-логіки, сприяючи підвищенню читабельності, підтримуваності та зменшенню технічних заборгованостей. Водночас зростання складності проекту та використання застарілого коду підвищують ризики появи помилок та зниження якості продукту.

Одним із сучасних підходів до автоматизації процесу рефакторингу є застосування технологій штучного інтелекту (ШІ) та великих мовних моделей

(LLM), таких як GPT, Gemini, Llama та інших. Проте, наявні дослідження свідчать про те, що застосування стандартних LLM супроводжується низькою ймовірністю успіху, що обумовлено низкою обмежень, зокрема недостатнім розумінням повного контексту проекту та порушенням функціональної відповідності після рефакторингу [1]. Таким чином, важливим завданням є розробка та вдосконалення методів, що підвищують ефективність застосування LLM в контексті рефакторингу програмного коду.

Дослідження базується на комплексному аналізі можливостей застосування LLM у процесі рефакторингу, що включає розгляд як технічних аспектів, так і впливу на загальну архітектуру програмних систем. Основними завданнями які вирішуються є розробка методів, які можуть бути застосовані при тонкому налаштуванні великої мовної моделі та індексації файлів вихідного коду.

Тонке налаштування являє собою використання попередньо навченої моделі та її адаптацію до специфічних завдань рефакторингу шляхом додаткового навчання на спеціалізованих наборах даних. Окрім цього цей процес включає в себе підготовку даних, кероване навчання, навчання з підкріпленням, а також налаштування параметрів моделі, що дозволяє підвищити її ефективність при обробці конкретних кодових баз [2].

Підхід індексації контексту в свою чергу це впровадження механізму індексації файлів з вихідним кодом для збереження інформації про залежності між модулями без необхідності завантаження всього вмісту в контекст [3]. Таким чином це дає змогу LLM краще «розуміти» структуру проекту та забезпечувати ефективне використання доступного контексту, що є критичним для запобігання помилкам, пов'язаним із ізоляцією окремих функцій коду.

Обидва підходи спрямовані на вирішення основних проблем застосування ШІ для рефакторингу, зокрема на забезпечення збереження функціональної відповідності та підвищення якості коду після змін. Ретельна оцінка результатів реалізації методів може здійснюватися за допомогою показників Code Health та F1-метрики, що дозволяють кількісно визначити ефективність запропонованих рішень [4, 5].

Проведений аналіз дозволив виділити кілька ключових аспектів застосування LLM у процесі рефакторингу:

- проблематика контексту - LLM мають обмежений розмір контексту, що ускладнює розуміння повної архітектури проекту. Це призводить до ситуацій, коли ізольована рефакторинг-функція може порушувати роботу суміжних модулів, що критично впливає на функціональність ПЗ [1];
- функціональна відповідність – штучний інтелект часто не здатен гарантувати повну відповідність між початковим кодом та кодом після змін. Навіть незначні помилки, такі як використання неправильного оператора, можуть мати серйозні наслідки для роботи системи [1];
- методи покращення - тонке налаштування LLM дозволяє адаптувати модель до конкретних особливостей проекту, що сприяє підвищенню точності та зниженню ризиків порушення функціональної відповідності. Одночасно індексація контексту забезпечує ефективну обробку великих обсягів коду шляхом збереження важливих залежностей між модулями;
- обчислювальні витрати - основним викликом застосування додаткового навчання є високі обчислювальні вимоги, а також потреба у високоякісних даних для навчання, що визначає успішність адаптації моделі до специфічних завдань.

Висновки. Запропоновані методи вдосконалення LLM для рефакторингу програмного коду мають потенціал до розвитку з кількох причин. По-перше, адаптивність до специфічних проектів – розробка методів тонкого налаштування дозволяє створити вузькоспеціалізовані моделі, здатні ефективно працювати з конкретними кодовими базами, що значно підвищує якість коду та знижує ризик виникнення помилок, що є критичним для сучасних розробницьких процесів. По-друге, оптимізація використання контексту – впровадження механізму індексації контексту сприяє більш ефективному використанню пам'яті та дозволяє моделі враховувати складні залежності між модулями програмного продукту, що забезпечує створення більш стабільних та підтримуваних систем. Нарешті, практична реалізація – результати дослідження мають практичне значення для розробників програмного забезпечення, оскільки пропонують конкретні рекомендації щодо інтеграції ШІ-інструментів у процес розробки та підтримки ПЗ, що дозволяє зменшити технічний борг та підвищити продуктивність розробницьких команд. Таким чином, запропоновані підходи не лише сприяють підвищенню

ефективності процесу рефакторингу, але й розширюють можливості автоматизації складних етапів розробки програмного забезпечення, відкриваючи нові перспективи як для академічних досліджень у сфері застосування ІІІ, так і для практичної імплементації у великих ІТ-проектах.

ЛІТЕРАТУРА

1. Codescene. Refactoring-vs-Refactoring-Advancing-the-state-of-AI-automated-code-improvements. URL: <https://codescene.com/hubfs/whitepapers/Refactoring-vs-Refactoring-Advancing-the-state-of-AI-automated-code-improvements.pdf>
2. Rishab Ramesh, Akarsh Thejasvi Raju M, Harsha Vardhan Reddy, Sandeep Varma N. Fine-Tuning Large Language Models for Task Specific Data. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10730913> DOI: 10.1109/ICNEWS60873.2024.10730913
3. Fu Q., Cho M., Merth T., Mehta S., Rastegari M., Najibi M. LazyLLM: DYNAMIC TOKEN PRUNING FOR EFFICIENT LONG CONTEXT LLM INFERENCE. arXiv preprint arXiv:2407.14057, 2024. URL: <https://arxiv.org/pdf/2407.14057>
4. Codescene. Code Health – How easy is your code to maintain and evolve? URL: <https://codescene.io/docs/guides/technical/code-health.html>
5. ENCORD. F1 Score in Machine Learning. URL: <https://encord.com/blog/f1-score-in-machine-learning/>

METHODS FOR IMPROVING LARGE LANGUAGE MODELS TO IMPROVE THE QUALITY OF CODE REFACTORING

Oleksandr Syrota, Horiachkin Vadym,

Abstract. *This study discusses methods for improving large language models (LLMs) for software refactoring. Using the methods of fine-tuning and indexing source code files, the paper addresses the issue of improving the results of using LLM for the task of refactoring code bases and improving the use of the context of language models. The proposed approaches are aimed at improving the quality of the source code after refactoring, as well as improving various large language models by changing the model itself or integrating it with additional software. The results of the methods implementation will be evaluated using Code Health and F1 metrics. This allows us to determine the effectiveness of the proposed solutions. The research results open up new perspectives for academic research and effective implementation in projects of various sizes.*

Keywords: *refactoring, development, code, LLM, artificial intelligence, machine learning, large language model.*

REFERENCE

1. Codescene. Refactoring-vs-Refactoring-Advancing-the-state-of-AI-automated-code-improvements. URL: <https://codescene.com/hubfs/whitepapers/Refactoring-vs-Refactoring-Advancing-the-state-of-AI-automated-code-improvements.pdf>
2. Rishab Ramesh, Akarsh Thejasvi Raju M, Harsha Vardhan Reddy, Sandeep Varma N. Fine-Tuning Large Language Models for Task Specific Data. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10730913> DOI: 10.1109/ICNEWS60873.2024.10730913
3. Fu Q., Cho M., Merth T., Mehta S., Rastegari M., Najibi M. LazyLLM: DYNAMIC TOKEN PRUNING FOR EFFICIENT LONG CONTEXT LLM INFERENCE. arXiv preprint arXiv:2407.14057, 2024. URL: <https://arxiv.org/pdf/2407.14057>
4. Codescene. Code Health – How easy is your code to maintain and evolve? URL: <https://codescene.io/docs/guides/technical/code-health.html>
5. ENCORD. F1 Score in Machine Learning. URL: <https://encord.com/blog/f1-score-in-machine-learning/>

СИСТЕМА БАГАТОРІВНЕВОЇ ВЕРИФІКАЦІЇ ПЕРСОНАЛЬНИХ ДАНИХ У БЛОКЧЕЙН-СЕРЕДОВИЩІ

Ситник Р.С.¹, Гнатушенко Вік.В.^{1,2}

¹Український державний університет науки і технологій, Україна

²Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Україна

Анотація. У роботі запропоновано інноваційний підхід до вирішення проблеми верифікації та захисту персональних даних у системах на основі технології блокчейн. Розроблено метод забезпечення достовірності та цілісності даних, що базується на математичній моделі з використанням комплексної функції валідації та ієрархічної структури вузлів верифікації. Запропонована модель представляє кожен елемент даних як кортеж компонентів, що включає версію даних, цифровий підпис джерела, часову мітку, геш попередньої версії та метадані верифікації. Достовірність оцінюється через інтегральний показник, що враховує різні аспекти валідації. Впроваджено систему "довірих джерел" з динамічним оновленням рівня довіри на основі історії операцій та алгоритму консенсусу Proof-of-Authority. Архітектурно система реалізується через створення ієрархічної структури вузлів верифікації, де кожен рівень відповідає за певний аспект перевірки даних. Запропоноване рішення забезпечує баланс між захистом даних та зручністю їх використання.

Ключові слова: блокчейн, персональні дані, цілісність даних, криптографічний захист, смарт-контракти, цифрова безпека.

В епоху цифровізації та експоненційного зростання об'ємів даних проблема захисту персональної інформації набуває критичного значення для суспільства. Технологія блокчейн, завдяки своїм фундаментальним властивостям незмінності та розподіленості, представляє значний потенціал для вирішення цієї проблеми. Проте, застосування блокчейну для обробки персональних даних створює низку специфічних викликів, пов'язаних із забезпеченням їх достовірності та цілісності в умовах розподіленої архітектури, а також із необхідністю дотримання вимог законодавства щодо захисту персональних даних [1]. Традиційні методи захисту інформації виявляються недостатньо ефективними через особливості блокчейн-систем та специфіку роботи з персональними даними, що вимагає розробки спеціалізованих підходів.

Аналіз останніх досліджень у сфері безпеки блокчейн-систем, виявляє значний прогрес у розвитку загальних механізмів криптографічного захисту та методів верифікації даних у розподілених системах [2]. Водночас, питання інтеграції цих механізмів із вимогами законодавства про захист персональних даних, зокрема забезпечення права на забуття та можливості модифікації даних без порушення цілісності блокчейну, залишаються недостатньо вирішеними [3]. Саме на подолання цих обмежень спрямоване ця робота.

В основу запропонованого підходу покладено математичну модель оцінки достовірності персональних даних у розподіленій блокчейн-системі. Ключовою інновацією є представлення кожного елементу даних D як кортежу (V, S, T, H, M) , де V - версія даних, S - цифровий підпис джерела, T - часова мітка, H - хеш попередньої версії, M - метадані верифікації.

Достовірність даних оцінюється через комплексну функцію валідації:

$$F(D) = \alpha_1 V(S) + \alpha_2 T(H) + \alpha_3 C(M), \quad (1)$$

де $V(S)$ – функція верифікації цифрового підпису, $T(H)$ – функція перевірки цілісності ланцюжка версій, $C(M)$ – функція валідації метаданих, а $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ – вагові коефіцієнти.

Інтегральний показник достовірності розраховується як:

$$R = F(D) \times \prod (1 - P_i), \quad (2)$$

де P_i – ймовірність компрометації i -го рівня верифікації. Цей показник знаходиться в діапазоні $[0,1]$, де $R = 1$ означає максимальну достовірність даних, а $R = 0$ – повну недостовірність. Такий підхід дозволяє комплексно оцінювати надійність персональних даних з урахуванням різних аспектів їх верифікації.

Архітектурно система реалізується через створення ієрархічної структури вузлів верифікації, де кожен рівень відповідає за певний аспект перевірки даних. Перший рівень забезпечує базову валідацію форматів та перевірку відповідності схемам, другий – криптографічну верифікацію цифрових підписів та повноважень джерела, а третій – складні механізми перехресної перевірки та узгодження з існуючими записами. Така структура забезпечує надійність системи та її стійкість до різних типів атак.

Важливим концептуальним елементом є система "довіrenих джерел" – спеціально авторизованих вузлів мережі з правом внесення та модифікації

персональних даних, робота за алгоритмом консенсусу Proof-of-Authority [4]. Кожен такий вузол характеризується власним рівнем довіри, який динамічно оновлюється на основі історії операцій, що забезпечує додатковий рівень захисту від несанкціонованого доступу.

Система включає механізм версіонування даних на основі деревовидної структури, що дозволяє зберігати повну історію змін та підтримувати паралельні гілки модифікацій. Важливим елементом є система керування доступом на основі розширеної рольової моделі, яка враховує не лише ролі користувачів, але й додаткові атрибути та контекст операцій, що забезпечує гнучкі політики доступу до персональних даних.

Висновки: Запропонований метод забезпечення достовірності та цілісності персональних даних у блокчейн-системі є комплексним рішенням, що враховує як технічні аспекти захисту інформації, так і нормативні вимоги до обробки персональних даних. Ключовими перевагами методу є модель оцінки достовірності даних, ієрархічна система верифікації, механізми диференційованого доступу та контролю за використанням даних.

Практична цінність дослідження полягає у можливості застосування розробленого методу для створення захищених інформаційних систем обробки персональних даних у різних сферах, включаючи державні реєстри, медичні інформаційні системи, фінансові установи та комерційні організації. Особливо актуальною є можливість забезпечення балансу між захистом даних та зручністю їх використання, що досягається через впровадження гнучких механізмів управління доступом та автоматизованих процесів верифікації.

Подальший розвиток методу передбачає вдосконалення механізмів автоматизації процесів верифікації, розширення можливостей інтеграції з різними інформаційними системами та розробку додаткових інструментів аналізу й моніторингу для підвищення ефективності виявлення потенційних загроз. Також планується дослідження можливостей застосування запропонованого підходу в контексті нових технологічних трендів, таких як Інтернет речей та граничні обчислення, що створює перспективи для

подальшого підвищення рівня захисту персональних даних в умовах цифрової трансформації суспільства.

ЛІТЕРАТУРА

1. Sim, W. L., Chua, H. N., & Tahir, M. (2019, November). Blockchain for identity management: The implications to personal data protection. In 2019 IEEE Conference on Application, Information and Network Security (AINS) (pp. 30-35). IEEE. DOI: 10.1109/AINS47559.2019.8968708
2. Singh, S., Hosen, A.S. and Yoon, B., 2021. Blockchain security attacks, challenges, and solutions for the future distributed iot network. Ieee Access, 9, pp.13938-13959. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3051602
3. Tatar, U., Gokce, Y. and Nussbaum, B., 2020. Law versus technology: Blockchain, GDPR, and tough tradeoffs. Computer Law & Security Review, 38, p.105454. DOI: 10.1016/j.clsr.2020.105454
4. Joshi, S., 2021. Feasibility of proof of authority as a consensus protocol model. arXiv preprint arXiv:2109.02480. DOI: 10.48550/arXiv.2109.0248

Multi-level Personal Data Verification System in Blockchain Environment

Roman Sytnyk, Viktoriia Hnatushenko

Abstract. *This paper proposes an innovative approach to solving the problem of verification and protection of personal data in blockchain-based systems. A method for ensuring data reliability and integrity has been developed, based on a mathematical model using a complex validation function and a hierarchical structure of verification nodes. The proposed model represents each data element as a tuple of components including data version, digital source signature, timestamp, hash of the previous version, and verification metadata. Reliability is evaluated through an integral indicator that takes into account various aspects of validation. A system of "trusted sources" has been implemented with updating of the trust level and the Proof-of-Authority consensus algorithm. Architecturally, the system is implemented through the creation of a hierarchical structure of verification nodes, where each level is responsible for a specific aspect of data verification. The proposed solution provides a balance between data protection and ease of use.*

Keywords: *blockchain, personal data, data integrity, smart contracts, digital security.*

REFERENCE

1. Sim, W. L., Chua, H. N., & Tahir, M. (2019, November). Blockchain for identity management: The implications to personal data protection. In 2019 IEEE Conference on Application, Information and Network Security (AINS) (pp. 30-35). IEEE. DOI: 10.1109/AINS47559.2019.8968708
2. Singh, S., Hosen, A.S. and Yoon, B., 2021. Blockchain security attacks, challenges, and solutions for the future distributed iot network. Ieee Access, 9, pp.13938-13959. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3051602
3. Tatar, U., Gokce, Y. and Nussbaum, B., 2020. Law versus technology: Blockchain, GDPR, and tough tradeoffs. Computer Law & Security Review, 38, p.105454. DOI: 10.1016/j.clsr.2020.105454
4. Joshi, S., 2021. Feasibility of proof of authority as a consensus protocol model. arXiv preprint arXiv:2109.02480. DOI: 10.48550/arXiv.2109.0248

СПЕКТРАЛЬНИЙ АНАЛІЗ У КЕРУВАННІ ГТЕС: ШЛЯХ ДО ПІДВИЩЕННЯ ДИНАМІЧНОЇ СТІЙКОСТІ ТА ЕФЕКТИВНОСТІ.

Сліпченко В.О.¹, Поляков М.О.²

¹НУ «Запорізька Політехніка», аспірант, Україна

²НУ «Запорізька Політехніка», доктор технічних наук, професор Україна

Анотація. *Запровадження спектрального аналізу миттєвої потужності навантаження у системах керування газотурбінними електростанціями відкриває нові можливості для підвищення динамічної стійкості, надійності та економічності. На основі розглянутих підходів (FFT, вейвлет-перетворення [5]) демонструється, що швидке виявлення й аналіз частотних компонент сигналу сприяє ефективному придушенню перехідних коливань і резонансних явищ. У результаті знижується час реакції на збурення, зменшується зношування вузлів турбіни, оптимізується процес спалювання палива і знижуються викиди шкідливих речовин. Крім того, спектральні методи легко інтегруються з сучасними технологіями (штучний інтелект, цифрові двійники) та підсилюють гнучкість ГТЕС у мережах із високою часткою відновлюваної енергетики. Описані прикладні результати й перспективи вказують на перспективність подальшого поширення цього підходу для вдосконалення глобальної енергетичної інфраструктури.*

Ключові слова: *спектральний аналіз, газотурбінна електростанція, динамічна стійкість, адаптивне керування, вейвлет-перетворення, оптимізація.*

Газотурбінні електростанції (ГТЕС) відіграють ключову роль у сучасній енергетиці завдяки своїй гнучкості, високій питомій потужності та здатності швидко реагувати на зміну навантаження. В умовах зростання частки відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) у загальній енергомережі на перший план виходить питання забезпечення динамічної стійкості та адаптивності генераторів, зокрема газотурбінних. Традиційні системи керування на основі PID-регуляторів забезпечують прийнятну якість [2] регулювання у стаціонарних режимах, проте в умовах різких і непередбачуваних збурень часто виявляються недостатньо ефективними. В таких умовах все більш актуальними стають підходи, що дозволяють глибше аналізувати сигнали в реальному часі та адаптувати стратегію керування до реальної динаміки навантаження.

Одним із таких інструментів є спектральний аналіз — метод, який дозволяє досліджувати сигнали в частотній області. На відміну від аналізу в часовій області, спектральний підхід дає змогу виявити [3], [4] домінуючі частотні компоненти, оцінити їх амплітуду, фазу і динаміку змін. Це особливо важливо для систем з високим рівнем коливань, вібрацій та короткочасних імпульсних процесів. Із практичної точки зору, такий аналіз дозволяє точно визначити характер збурення, його джерело, а отже — обрати найбільш ефективну реакцію на рівні регуляторів.

Серед основних методів спектрального аналізу найпоширенішим є швидке перетворення Фур'є [4] (FFT), що забезпечує високу швидкість обробки даних та є придатним для реалізації в реальному часі. Метод STFT (короткочасне перетворення Фур'є) дозволяє відстежувати зміну спектра з плином часу, а вейвлет-перетворення [5] забезпечує ще більшу гнучкість, дозволяючи зосередитись на імпульсних чи короткочасних компонентах сигналу. Усі ці методи вже застосовуються у сфері енергетики та, зокрема, в управлінні ГТЕС. Порівняння методів спектрального аналізу наведено у табл. 1.

Таблиця 1.

Порівняння методів спектрального аналізу.

Параметр	FFT (Швидке перетворення Фур'є)	STFT (Короткочасне перетворення Фур'є)	Вейвлет-перетворення
Область застосування	Стаціонарні сигнали	Слабко нестационарні сигнали	Нестационарні та імпульсні сигнали
Часова локалізація	Низька	Середня	Висока
Частотна роздільна здатність	Висока	Середня	Висока (масштабована)
Обчислювальні витрати	Низькі	Середні	Високі
Придатність для реального часу	Так	Так	Залежить від реалізації
Гнучкість у виборі масштабу	Немає	Фіксоване вікно	Так
Основні переваги	Висока швидкість, простота реалізації	Дозволяє аналізувати зміну спектра в часі	Добра локалізація в часі та частоті, підходить для складних сигналів
Основні недоліки	Не підходить для нестационарних сигналів	Компроміс між часом і частотою	Складність реалізації та вибору функції

Для реалізації спектрального аналізу в системах керування необхідно забезпечити якісний збір і обробку даних. Це включає використання високошвидкісних датчиків, які здатні фіксувати змінні параметри (тиск, температура, вібрації) із частотою дискретизації до десятків кілогерц [6]. Важливою умовою є також точна синхронізація сигналів, оскільки навіть незначні часові зсуви між каналами можуть викривити результати аналізу. Перед передачею сигналів на обчислювальні модулі вони проходять фільтрацію та нормалізацію, що дозволяє знизити рівень шумів та спростити подальше опрацювання.

На практиці спектральний аналіз інтегрується у систему керування у вигляді додаткового блоку, що працює паралельно з основним регулятором. Він аналізує сигнал навантаження, виділяє частотні компоненти, які перевищують допустимі пороги, і, за потреби, коригує параметри паливоподачі, положення направляючих лопаток чи інші налаштування.

Завдяки цьому система отримує можливість швидше реагувати на перехідні процеси, ефективніше пригнічувати коливання та уникати режимів, які можуть призвести до перегріву або резонансу [1]. В експериментальних умовах та у пілотних промислових упровадженнях вдалося досягти скорочення часу перехідних процесів на 10–15%, а також зменшення амплітуди коливань тиску.

Впровадження спектрального аналізу дає низку переваг. По-перше, це підвищення динамічної стійкості — система швидше реагує на зміну режиму, не допускаючи накопичення енергії коливань. По-друге, знижується рівень механічного зношування: зменшення вібрацій і екстремальних температурних навантажень продовжує ресурс [6] лопаток турбіни, підшипників, камери згоряння. По-третє, покращується якість електроенергії, оскільки знижується відхилення частоти генерації та напруги. Це критично для чутливого обладнання та стабільності всієї мережі.

Крім технічних, існують і суттєві економічні переваги. Оптимізоване регулювання паливоподачі дозволяє знизити питомі витрати палива, уникати перевитрат і неповного згоряння. Стабільні режими роботи зменшують частоту аварійних зупинок, що своєю чергою знижує витрати на ремонт і простої. Деякі пілотні впровадження показали скорочення витрат палива на 2–3% і зменшення аварійності на 20–30% за рік [2].

Особливу увагу варто приділити екологічним аспектам. Завдяки стабілізації температурного режиму вдається зменшити рівень утворення оксидів азоту [6], вуглецю та вуглекислого газу. Це дозволяє ГТЕС не лише відповідати чинним екологічним нормам, а й претендувати на “зелені” сертифікати, отримувати податкові пільги чи інші преференції.

Інтеграція спектрального аналізу з інтелектуальними системами відкриває нові перспективи. Сигнали можуть використовуватись як елементи для машинного навчання, що дозволяє створювати системи прогнозного обслуговування, виявляти тренди деградації обладнання, реалізовувати самонавчальні регулятори [3]. У поєднанні з концепцією “цифрового двійника” це формує основу для повноцінної цифрової трансформації ГТЕС.

Узагальнюючи, можна стверджувати, що спектральний аналіз стає одним із ключових інструментів модернізації систем керування газотурбінних електростанцій. Його впровадження забезпечує підвищення стабільності, надійності, економічної доцільності та екологічності, що є критично важливим у сучасному енергетичному середовищі. Гнучкість, яку він надає, дозволяє ГТЕС ефективно виконувати роль балансуючої генерації в умовах зростаючої частки ВДЕ, сприяючи стабільності всієї енергетичної системи.

Висновки

Спектральний аналіз дозволяє істотно покращити динамічну стійкість, надійність та екологічну ефективність роботи газотурбінних електростанцій. Завдяки застосуванню FFT, STFT та вейвлет-перетворень можливе своєчасне виявлення критичних частотних компонентів, адаптивне регулювання процесів та оптимізація режимів згоряння. Це, у свою чергу, сприяє зниженню зношування вузлів, економії палива і дотриманню сучасних екологічних вимог. Спектральний підхід є важливою складовою цифрової трансформації ГТЕС, особливо у контексті їхньої інтеграції в енергосистеми з високою часткою ВДЕ.

ЛІТЕРАТУРА

1. Boyce, M. P. Gas Turbine Engineering Handbook, 4th ed. Gulf Professional Publishing, 2012.
2. Basu, R. "Load Frequency Control of Gas Turbine Generators." Energy, 183, 2019, 813–825.
3. Li, G., Qiu, Z., & He, Y. "Spectral Analysis in Power Systems: A Review." IEEE Transactions on Power Delivery, 31(4), 2016, 1783–1793.
4. Oppenheim, A. V., & Schaffer, R. W. Discrete-Time Signal Processing, 3rd ed. Prentice Hall, 2009.
5. Mallat, S. A Wavelet Tour of Signal Processing, 3rd ed. Academic Press, 2008.
6. Rahman, M. M., Thong, N. D., & Kadir, M. Z. A. A. "An Overview of Gas Turbine Research and Developments." Renewable and Sustainable Energy Reviews, 75, 2017, 183–197.

SPECTRAL ANALYSIS IN GTPP CONTROL: A PATH TO ENHANCED DYNAMIC STABILITY AND EFFICIENCY.

Vitalii Slipchenko, Mykhailo Poliakov.

Abstract. *The implementation of spectral analysis of instantaneous load power in gas turbine power plant (GTPP) control systems opens up new opportunities for enhancing dynamic stability, reliability, and efficiency. Based on the considered approaches (FFT, wavelet transform [5]), it is demonstrated that rapid detection and analysis of the signal's frequency components contribute to effective suppression of transient oscillations and resonance phenomena. As a result, the response time to disturbances is reduced, turbine component wear is minimized, fuel combustion processes are optimized, and harmful emissions are decreased. Furthermore, spectral methods can be easily integrated with modern technologies (artificial intelligence, digital twins), enhancing the flexibility of GTPPs in grids with a high share of renewable energy sources. The described practical results and prospects indicate the feasibility of further extending this approach to improve the global energy infrastructure.*

Keywords: *spectral analysis, gas turbine power plant, dynamic stability, adaptive control, wavelet transform, optimization.*

REFERENCE

1. Boyce, M. P. Gas Turbine Engineering Handbook, 4th ed. Gulf Professional Publishing, 2012.
2. Basu, R. "Load Frequency Control of Gas Turbine Generators." Energy, 183, 2019, 813–825.
3. Li, G., Qiu, Z., & He, Y. "Spectral Analysis in Power Systems: A Review." IEEE Transactions on Power Delivery, 31(4), 2016, 1783–1793.
4. Oppenheim, A. V., & Schaffer, R. W. Discrete-Time Signal Processing, 3rd ed. Prentice Hall, 2009.
5. Mallat, S. A Wavelet Tour of Signal Processing, 3rd ed. Academic Press, 2008.
6. Rahman, M. M., Thong, N. D., & Kadir, M. Z. A. A. "An Overview of Gas Turbine Research and Developments." Renewable and Sustainable Energy Reviews, 75, 2017, 183–197.

СУЧАСНІ ПІДХОДИ ДО ОПТИМІЗАЦІЇ ІНТЕРФЕЙСІВ ВЕБ-ЗАСТОСУНКІВ: ІНТЕРАКТИВНІСТЬ, ФУНКЦІОНАЛЬНІСТЬ ТА ДОСТУПНІСТЬ

Царик В.Ю.¹, Гнатушенко Вікт.В.², Селівьорстова Т.В.³

¹УДУНТ, ст. викл., Україна

²УДУНТ, д.т.н., проф., Україна

³УДУНТ, к.т.н., доц., Україна

Анотація. В роботі розглянуто сучасні підходи до оптимізації інтерфейсів веб-застосунків, спрямовані на підвищення їхньої інтерактивності, функціональності та доступності. Аналізуються ключові аспекти проектування користувацьких інтерфейсів, включаючи юзабіліті-тестування, технічну оптимізацію, інтерактивні елементи та принципи доступності. У результаті запропоновано рекомендації для розробників, що сприяють створенню адаптивних і зручних веб-ресурсів, які відповідають сучасним вимогам конкурентного цифрового середовища.

Ключові слова: веб-застосунки, користувацький інтерфейс, інтерактивність, адаптивний дизайн, юзабіліті, доступність, тестування.

Вступ. Інтерфейси веб-застосунків є основою для ефективної взаємодії користувачів із цифровими продуктами. У сучасних умовах зростаючої конкуренції на ринку важливо забезпечити не лише естетичність, але й функціональність, доступність та інтерактивність веб-ресурсів. Виклики, пов'язані з розробкою інтерфейсів, включають необхідність врахування різноманітних потреб користувачів, таких як адаптація до мобільних пристроїв, швидкість завантаження та інтуїтивність навігації [1]. Дослідження свідчать, що зручність користування (юзабіліті) та адаптивний дизайн є ключовими чинниками, які впливають на задоволення користувачів і рівень їхньої залученості. Крім того, зростає потреба у впровадженні принципів доступності, які дозволяють охопити ширшу аудиторію, включаючи користувачів з обмеженими можливостями. Метою даної роботи є аналіз сучасних методів оптимізації інтерфейсів веб-застосунків та розробка рекомендацій для покращення користувацького досвіду, підвищення залученості користувачів і створення конкурентних переваг для бізнесу.

Методи аналізу інтерфейсів. Одним із основних методів аналізу є юзабіліті-тестування, яке дозволяє виявити проблемні зони у дизайні та функціоналі. Наприклад, використання теплових карт (heatmaps) допомагає зрозуміти, які елементи інтерфейсу привертають найбільше уваги. Це дає змогу розробникам перерозподілити ключові функції або візуальні акценти для поліпшення взаємодії користувачів із сайтом.

Крім того, А/В тестування сприяє вибору оптимальних варіантів дизайну, дозволяючи порівняти різні інтерфейсні рішення за допомогою реальних даних про поведінку користувачів. Наприклад, зміна кольору кнопки заклику до дії або розташування меню може вплинути на конверсії до 20%.

Функціональне тестування включає перевірку роботи інтерактивних елементів, таких як форми, кнопки, випадаючі списки. Це дозволяє забезпечити коректну роботу сайту на різних пристроях та у різних браузерах, мінімізуючи ризики втрати користувачів через технічні помилки.

Технічна оптимізація. Технічна оптимізація є важливим аспектом, що впливає на стабільність роботи веб-застосунків. До основних заходів належать:

Підвищення швидкості завантаження сторінок. Використання кешування, оптимізація розміру зображень, мінімізація файлів CSS і JavaScript сприяють значному скороченню часу завантаження. Дослідження свідчать, що навіть затримка у 2 секунди може знизити конверсії на 10-15%.

Адаптивний дизайн. Забезпечення коректного відображення інтерфейсу на екранах різного розміру (мобільних пристроях, планшетах, десктопах) є обов'язковим стандартом сучасного веб-дизайну. Це сприяє підвищенню залученості мобільних користувачів, частка яких постійно зростає.

Оптимізація мета-тегів і Alt-атрибутів. Вони сприяють покращенню видимості сайту в пошукових системах, а також забезпечують доступність для користувачів із вадами зору.

Інтерактивні елементи. Інтерактивні елементи позитивно впливають на рівень взаємодії користувачів із сайтом. Зокрема:

- Чат-боти. Інтеграція чат-ботів дозволяє автоматизувати відповіді на часті запитання, збільшити швидкість обробки запитів і підвищити рівень задоволеності користувачів.

- Форми зворотного зв'язку. Використання динамічних форм, які реагують на дії користувачів, забезпечує швидке збирання даних і зворотний зв'язок.
- Анімації. Якщо використовуються помірно, вони додають динамічності інтерфейсу, що сприяє формуванню позитивного емоційного враження.

Доступність. Дотримання стандартів WCAG (Web Content Accessibility Guidelines) забезпечує рівний доступ до інформації для всіх користувачів, включаючи людей із обмеженими можливостями [2]. Основні аспекти доступності включають:

Текстові описи. Забезпечення альтернативного тексту для зображень та відео дозволяє користувачам із вадами зору отримувати доступ до контенту.

Зручна навігація. Логічна структура меню, чіткі заголовки та підтримка клавіатурної навігації значно полегшують взаємодію із сайтом.

Сумісність із допоміжними технологіями. Наприклад, використання ARIA-атрибутів забезпечує підтримку екранних зчитувачів. [3]

Тестування доступності може проводитись за допомогою автоматизованих інструментів (WAVE, Lighthouse) або залученням реальних користувачів із фізичними обмеженнями[4].

Висновки. Оптимізація інтерфейсів веб-застосунків є важливим етапом у створенні сучасних цифрових продуктів [5]. Інтеграція методів юзабіліті-тестування, технічної оптимізації та принципів доступності дозволяє підвищити ефективність взаємодії користувачів із веб-ресурсами. Використання сучасних інструментів, таких як теплові карти, автоматизовані системи тестування та інтерактивні елементи, сприяє створенню конкурентоспроможних веб-ресурсів. Застосування запропонованих рекомендацій сприяє створенню адаптивних, зручних і інтуїтивно зрозумілих інтерфейсів, що відповідають потребам сучасних користувачів. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на інтеграцію штучного інтелекту для вдосконалення персоналізації та покращення доступності.

ЛІТЕРАТУРА

1. Ярош, . В., Лагута, . В., Смоляков, . М., Тарасяк, . І., Футиляк, С., & Рутар, Р. (2024). Вплив інноваційного дизайну веб-сайту на конверсію та користувацький досвід в е-торгівлі. Академічні візії, (27).
2. Hostetler T. W. et al. Web accessibility trends and implementation in dynamic web applications //arXiv preprint arXiv:2202.00777. – 2022.
3. Agbozo E. A hybrid data-driven web-based UI-UX assessment model //arXiv preprint arXiv:2301.08992. – 2023.
4. Mazinianian D., Bajammal M., Mesbah A. Style-Guided Web Application Exploration //arXiv preprint arXiv:2111.12184. – 2021.\
5. В.Ю. Царик, Вік.В.Гнатушенко. Дослідження методів виділення графічних об'єктів на вебсайтах для оцінки якості інтерфейсу / Вік.В.Гнатушенко, В.Ю. Царик // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Випуск 3(140). – Дніпро, 2022. – С.143-154 DOI 10.34185/1562-9945-3-140-2022-12

MODERN APPROACHES TO OPTIMIZING WEB APPLICATION INTERFACES: INTERACTIVITY, FUNCTIONALITY, AND ACCESSIBILITY

V.Tsaryk, Vikt.Hnatushenko, T.Selivorstova

Abstract. *This paper discusses modern approaches to optimizing web application interfaces aimed at enhancing their interactivity, functionality, and accessibility. Key aspects of user interface design, including usability testing, technical optimization, interactive elements, and accessibility principles, are analyzed. Recommendations for developers are proposed to create adaptive and user-friendly web resources that meet the requirements of the competitive digital environment.*

Keywords: *web applications, user interface, interactivity, adaptive design, usability, accessibility, testing.*

REFERENCE

1. Yarosh, V., Lahuta, V., Smolyakov, M., Tarasyak, I., Futoryak, S., & Rutar, R. (2024). The impact of innovative website design on conversion and user experience in e-commerce. Academic Visions, (27).
2. Hostetler T. W. et al. Web accessibility trends and implementation in dynamic web applications //arXiv preprint arXiv:2202.00777. – 2022.
3. Agbozo E. A hybrid data-driven web-based UI-UX assessment model //arXiv preprint arXiv:2301.08992. – 2023.
4. Mazinianian D., Bajammal M., Mesbah A. Style-Guided Web Application Exploration //arXiv preprint arXiv:2111.12184. – 2021.
5. V.Yu. Tsaryk, Vik. V. Hnatushenko. Study of methods of selection of graphic objects on websites to assess the quality of the interface / Vik.V.Hnatushenko, V.Yu. Tsaryk // System technologies. Regional interuniversity collection of scientific works. – Issue 3(140). – Dnipro, 2022. – P.143-154 DOI 10.34185/1562-9945-3-140-2022-12

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ МОДЕЛЕЙ ГЛИБОКОГО НАВЧАННЯ ДЛЯ КЛАСИФІКАЦІЇ ХВОРОБ РОСЛИН У РІЗНИХ КОЛЬОРОВИХ ПРОСТОРАХ

Чешенко Д.Р.¹, Мацуга О.М.²

¹ Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, Україна

² Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, к. т. н, доцент,
Україна

Анотація. У даній роботі проведено порівняльний аналіз впливу кольорових просторів на точність класифікації хвороб рослин за допомогою згорткових нейронних мереж. Було навчено три архітектури моделей у чотирьох різних кольорових просторах: RGB, HSV, LUV та LAB, що в сумі дало 12 моделей. Для дослідження використано датасет, який містить понад 79 тисяч оригінальних зображень, що належать 88 класам. Точність класифікації хвороб рослин було оцінено на навчальному та тестовому наборах даних. Результати показали, що ефективність класифікації залежить не лише від архітектури моделі, а й від обраного кольорового простору. Зокрема, LAB продемонстрував незначні переваги в моделях із меншою кількістю параметрів, тоді як RGB виявився стабільно ефективним у складніших моделях. HSV та LUV показали нижчу точність у більшості випадків. Отримані результати можуть сприяти покращенню систем діагностики хвороб рослин та знайти застосування в інших галузях, таких як металургія, для підвищення точності виявлення дефектів на зображеннях металевих поверхонь.

Ключові слова: нейронні мережі; згорткові нейронні мережі; глибоке навчання; комп'ютерний зір; класифікація; кольорові простори; хвороби рослин.

Вступ. Сучасний розвиток методів глибокого навчання та їх широке застосування в задачах комп'ютерного зору створюють нові можливості для автоматизації аналізу зображень у різних сферах діяльності. Одним із перспективних напрямів є використання таких методів для розпізнавання хвороб рослин за зображеннями їхніх листків. Традиційні методи, засновані на візуальному огляді рослин експертами, залишаються суб'єктивними, трудомісткими і малоефективними у випадках, що потребують оперативного реагування. Використання моделей глибокого навчання дозволяє автоматизувати процес розпізнавання хвороб рослин та підвищити його точність завдяки аналізу великого масиву зображень.

Останні дослідження демонструють, що ефективність моделей глибокого навчання, зокрема згорткових нейронних мереж, може залежати від кольорової інформації при розпізнаванні об'єктів, причому ступінь цієї залежності може змінюватися залежно від набору даних та методів навчання [1]. Відповідно можна припустити, що застосування різних кольорових просторів може вплинути на ефективність алгоритмів розпізнавання. В одному з останніх досліджень показано, що вибір кольорового простору може суттєво впливати на точність класифікації згортковою нейронною мережею, та виявлено, що окремі простори демонструють переваги у розпізнаванні окремих класів завдяки їх здатності ефективно виділяти як яскравість, так і кольорову інформацію [2].

Основною метою даної роботи є порівняльний аналіз трьох архітектур згорткових нейронних мереж для класифікації хвороб рослин із використанням різних кольорових просторів, зокрема, HSL, LUV та LAB. Аналіз націлений на порівняння точності класифікації в цих кольорових просторах.

Результати роботи можуть знайти застосування й в інших галузях, зокрема в металургії – наприклад, для підвищення точності розпізнавання дефектів та аномалій на зображеннях металевих поверхонь.

Основний матеріал

Для оцінки впливу різних кольорових просторів на точність класифікації хвороб рослин розглянуто три архітектури згорткових нейронних мереж.

В усіх трьох архітектурах для виявлення ознак використовується зв'язок блоків. Кожен блок представляє собою послідовність основних компонентів: двох згорткових шарів (Conv2D), шарів нормалізації пакетів (BatchNormalization) після кожного згорткового шару, операції пулінгу (MaxPooling2D або AveragePooling2D) та шару виключення (SpatialDropout2D) в кінці кожного блоку, за винятком останнього. Після цих блоків, використовується глобальний середній пулінг (GlobalAveragePooling2D) для переходу від просторових ознак до одновимірного вектору, який далі обробляється повнозв'язними шарами (Dense) для остаточної класифікації. Всі архітектури працюють із зображеннями розміром 256×256 з трьома каналами,

в якості функції активації у Conv2D та Dense шарах використовується функція ReLU, а у фінальному шарі функція softmax для класифікації 88 класів. Також усі архітектури використовують категоріальну крос-ентропію як функцію втрат і навчаються за допомогою стохастичного градієнтного спуску з моментумом (SGD, momentum=0.9).

У першій архітектурі використовується 6 блоків, які починаються з 8 фільтрів із поступовим збільшенням до 256, використовується чергування AveragePooling2D і MaxPooling2D, після GlobalAveragePooling2D слідує три послідовних Dense-шари з 1024, 512, 256 параметрами та Dropout з коефіцієнтом 0.3 між ними, що призводить до загальної кількості параметрів близько 2,13 мільйона.

У другій архітектурі використовується 5 блоків, які починаються з 8 фільтрів зі збільшенням до 128, але перед фінальним шаром використовується лише один Dense шар з 2048 нейронами, в якому застосовується L2-регуляризація з параметром 0.0001. Також використовується CosineDecay (початковий lr становить $7e-3$; мінімальний – $1e-5$) для зменшення швидкості навчання. Такий підхід дозволив досягнути значно меншої кількості параметрів, близько 742 тисяч.

У третій архітектурі використовується також 5 блоків, але вона відрізняється тим, що початковий блок містить 16 фільтрів з подальшим збільшенням їх кількості до 256 у наступних блоках. Крім того, з кожним блоком збільшується коефіцієнт SpatialDropout2D (від 0.05 у початкових блоках до 0.20 у фінальних). Як і в попередній архітектурі, застосовується один Dense шар з 2048 нейронами та L2-регуляризацією з параметром 0.0005, а також використовується CosineDecay для зміни швидкості навчання (початковий lr становить $1e-2$, мінімальний – $1e-8$). У результаті, загальна кількість параметрів моделі складає близько 1,89 мільйона, і для її навчання необхідно більше епох (50 епох порівняно з 30 для попередніх архітектур).

Для навчання і тестування моделей був використаний набір зображень “Plant Disease Classification Merged Dataset”, що охоплює 88 класів та містить понад 79 тис. зображень із загальним розміром 17,6 ГБ [3]. Зображення було

отримано з різних джерел, що включають як лабораторні, так і польові умови, що створює неоднорідність інформації. Саме ця неоднорідність, разом зі схожістю симптомів різних патологічних станів, становить одну з основних проблем при розпізнаванні хвороб рослин. Для навчання використовувалося 80% від загальної кількості зображень в наборі, для тестування – відповідно 20%.

Однією з проблем даного набору зображень є дисбаланс даних. У роботі було вирішено вирівняти розподіл зображень у навчальному наборі за допомогою технік аугментації. Процес аугментації полягав у застосуванні ряду геометричних та кольорових перетворень, що дозволило збільшити кількість зразків до 2000 зображень для кожного класу. Після балансування навчальний набір містив 176 тис. зображень. Тестовий набір містив 16 тис. зображень без аугментації, щоб відобразити реальний стан у природних умовах. Результати навчання всіх моделей наведені у табл. 1.

Таблиця 1

Результати навчання моделей

Модель	Кольоровий простір	Точність на навчальних даних	Точність на тестових даних
Модель 1	RGB	0.8980	0.9099
	HSV	0.8964	0.8941
	LUV	0.9036	0.8974
	LAB	0.8992	0.8972
Модель 2	RGB	0.9188	0.9256
	HSV	0.9312	0.9168
	LUV	0.9411	0.9245
	LAB	0.9394	0.9277
Модель 3	RGB	0.9168	0.9337
	HSV	0.9228	0.9287
	LUV	0.9290	0.9288
	LAB	0.9290	0.9321

Виходячи з наведених у табл. 1 результатів, вибір кольорового простору може впливати на показники точності моделей для класифікації хвороб рослин, причому переваги того чи іншого простору залежать від конкретної архітектури та методів обробки ознак під час їх проходження через шари

мережі. У моделях з більшою кількістю параметрів (моделі 1 та 3) використання RGB-простору дало трохи кращі результати, у той час, як модель з меншою кількістю параметрів (модель 2) продемонструвала незначну перевагу для LAB. HSV та LUV простори продемонстрували менш ефективні результати порівняно з RGB і LAB.

Висновки. Порівняльна оцінка точності моделей згорткових нейронних мереж у різних кольорових просторах показала, що традиційний RGB простір залишається надійним вибором для класифікації хвороб рослин, забезпечуючи високу точність розпізнавання. При цьому LAB може мати перевагу для більш простих архітектур. Подальші дослідження можуть бути зосереджені на розробці моделей, оптимізованих для LAB, а також на вивченні інших кольорових просторів для вдосконалення систем діагностики хвороб рослин.

ЛІТЕРАТУРА

1. Singh A., Bay A., Mirabile A. Assessing the importance of colours for CNNs in object recognition. ArXiv. 2020. URL: <https://arxiv.org/abs/2012.06917>
2. Xian Z., Huang R., Towey D., Yue D. Convolutional Neural Network Image Classification Based on Different Color Spaces. Tsinghua Science and Technology. 2025, Vol. 30, Issue 1. P. 402-417. DOI: <https://doi.org/10.26599/tst.2024.9010001>
3. Dobrovsky A. Plant Disease Classification Merged Dataset. URL: <https://www.kaggle.com/datasets/alinedobrovsky/plant-disease-classification-merged-dataset>

COMPARATIVE ANALYSIS OF DEEP LEARNING MODELS FOR PLANT DISEASE CLASSIFICATION IN DIFFERENT COLOR SPACES

Cheshenko Dmytro, Matsuga Olga

Abstract. *This study presents a comparative analysis of the impact of different color spaces on the accuracy of plant disease classification using convolutional neural networks. Three model architectures were trained in four color spaces – RGB, HSV, LUV, and LAB – resulting in a total of 12 models. The experiments were conducted on a dataset containing over 79,000 original images across 88 classes. Classification accuracy was evaluated on both training and test sets. The results indicate that classification performance depends not only on the model architecture but also on the chosen color space. In particular, LAB showed slight advantages in models with fewer parameters, while RGB consistently performed well in more complex models. HSV and LUV generally resulted in lower accuracy. These findings can contribute to improving plant disease*

diagnosis systems and may also be applicable in other fields such as metallurgy for enhancing the accuracy of defect detection on metal surface images.

Keywords: *neural networks; convolutional neural networks; deep learning; computer vision; classification; color spaces; plant diseases.*

REFERENCE

1. Singh A., Bay A., Mirabile A. Assessing the importance of colours for CNNs in object recognition. ArXiv. 2020. URL: <https://arxiv.org/abs/2012.06917>
2. Xian Z., Huang R., Towey D., Yue D. Convolutional Neural Network Image Classification Based on Different Color Spaces. Tsinghua Science and Technology. 2025, Vol. 30, Issue 1. P. 402-417. DOI: <https://doi.org/10.26599/tst.2024.9010001>
3. Dobrovsky A. Plant Disease Classification Merged Dataset. URL: <https://www.kaggle.com/datasets/alinedobrovsky/plant-disease-classification-merged-dataset>

CONTROLLING OF THE HIERARCHICAL OBJECT BASED ON THE PRODUCTION MODEL

Shapovalova S. I. ¹, Baranichenko O. M. ²

¹ National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic
Institute”, PhD, Associate Professor, Ukraine

² National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”,
Post-graduate student, Ukraine

Abstract. *Due to the increasing complexity of the architecture and algorithms of industrial dispatching control systems (IDCS), generally accepted control methods don't allow to guarantee absolute correctness and sufficient speed automation object's functioning. Therefore, development of methods to improve these indicators is an urgent task and has practical significance. The purpose of the work is to present a method of automated control of dynamic IDCS based on a production model. Conclusions: 1) four-level IDCS's architecture is defined, which allows to implement the functioning of complex hierarchical automation objects; 2) three-level production system architecture is presented for the system level of automation, and two-level production system architecture for automated control at the main server level; 3) proposed method is tested and its advantages over the generally accepted finite state machine method are determined: an increase in correctness by 16% and an increase in the share of fully automated actions by 15%.*

Keywords: *production system, industrial dispatching control systems, inference system, CLIPS.*

Problem statement and its relevance. The rapid development of hardware for industrial dispatching control systems (IDCS) has led to a complication of the architecture and algorithms of their operation. At the same time, generally accepted methods of controlling such systems, such as the finite state machine method or mathematical algorithms, are losing their effectiveness. To solve this problem, control methods based on artificial intelligence are beginning to be used. Already today, neural networks and fuzzy logic methods are used as parts of many industrial systems. However, in the case of complex control of strictly algorithmized objects, their use can lead to a large number of errors due to insufficiently high accuracy of work. The use of production systems on such objects gives better results, but implementation according to basic models does not provide sufficient speed of

determining the control action. That is why further research for the implementation of a distributed component-oriented production control system for dynamic IDCS is relevant and has practical significance.

Analysis of recent research. Today, dynamic IDCSs are the most common in industrial automation. In [1], such systems were considered and a method of controlling them based on mathematical algorithms was presented. However, such an approach cannot always be implemented for controlling complex hierarchical complexes, since it requires solving higher-order differential equations, which leads to a significant slowdown in the operation of these systems. The use of artificial intelligence methods is more appropriate for this problem. In [2], a complex hierarchical groundwater resource management system under climate change conditions was presented based on the CNN-Bi LTM network. The authors achieved a high level of accuracy and speed on the task, however, the use of neural networks for strict control systems can lead to emergency situations due to their excessive flexibility and insufficient accuracy. The use of production systems for control allows to solve this problem. In [3], a method of controlling traffic lights based on a production model was presented. The results obtained showed high accuracy, speed and reliability of the proposed method. In [4], the use of CLIPS was proposed for modeling the operation of complex hierarchical IDCSs and the use of production models for controlling such systems was identified as a priority area of research.

Existing methods do not reflect the specifics of a control object with a complex distributed hierarchical structure. Therefore, the implementation of IDCSs and production control systems for them, taking into account the conditions of distribution and hierarchy of control objects, is a necessary condition for ensuring the correctness of their operation.

The purpose of the work is to present a method for automated control of dynamic IDCS based on a production model.

1. IDCS architecture. To implement a distributed component-oriented production system, the IDCS architecture is used, which consists of four levels:

1. The level of logical controllers, which implements direct control of the equipment and receives data from sensors. This level consists of programmable

logical controllers, the communication of which with the higher level occurs according to standardized protocols.

2. The system level, which implements PLC control as a single system. This level consists of server equipment, which is responsible for processing and storing information. In this case, the implementation of hardware servers can be both local and remote.

3. The main server, which combines system-level servers and ensures their operation as a single automated complex.

4. Automated workstations, which provide system operators with access to permitted functions.

2. Production system architecture. Production systems are divided into two types, which implements their vertical distribution:

1. Production systems of the system level, which implement a three-level architecture. The lower level implements direct control of field-level equipment, the component level combines equipment into logical components, the system level performs equipment interaction and implements system operation algorithms. Production systems of this level are installed on computing servers of individual systems, which implements their horizontal distribution.

2. Production systems of the main server level, which implement a two-level architecture. The component level performs direct control of each individual system of the complex, and the system level combines all systems of the control object into a single automated complex.

Each production system consists of distributed working memory and knowledge base, as well as a logical inference mechanism, which implements work from the lower to the upper level of the hierarchy.

3. Computational experiments. The presented approach to the implementation of a hierarchical object was tested on a complex system consisting of emergency lighting system, emergency power supply and access control and management system of a data center. CLIPS [5] was chosen as a production model.

6 sets of emergency scenarios were defined for testing the software and hardware complex:

1. Failure of a non-critical component of one of the systems.
2. Failure of 10% of the components of one of the systems.
3. Failure of a critical component of one of the systems.
4. Failure of 10% of the critical components of one of the systems.
5. Conflict in the operation of components of one system.
6. Intersystem conflicts.

The main parameters considered during the testing process were the correctness of decision-making by the distributed production system, information processing time, and the proportion of fully automated control actions. The presented method was compared with the traditional control method implemented on a finite state machine. The results showed that the proposed method is 10% slower, but has 16% higher correctness and increases the share of fully automated actions by 15%.

Conclusions: 1. A four-level architecture of the IDCS is defined, which allows to implement the functioning of complex hierarchical automation objects.

2. The architecture of a three-level production system for the system level of automation is presented, and a two-level architecture of a production system for automated control at the main server level is presented.

3. The presented models are tested on the IDCS test problem with three systems. The advantages of the proposed method over the finite state machine method are determined: an increase in correctness by 16% and an increase in the share of fully automated actions by 15%.

REFERENCE

1. Lievi, L., Zyma, O. (2021). Suchasni intelektualni metody modeliuvannia skladnykh tekhnologichnykh ob'ektiv [Modern intellectual methods of modeling complex technological objects]. *Systemy upravlinnia, navihatsii ta zviazku – Control, navigation and communication systems*, 1, 63, 49–53 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2021.1.049>.
2. Shakir Ali Ali, A., Ebrahimi, S., Ashiq, M. et al. (2022). CNN-Bi LSTM neural network for simulating groundwater level. *Computational research progress in applied science & engineering (CRPASE)*, 8, 1-7. <https://doi.org/10.52547/crpase.8.1.2748>.
3. Albatish, I., Abu-Naser, S. (2019). Modeling and Controlling Smart Traffic Light System Using a Rule Based System. *International Conference on Promising Electronic Technologies (ICPET)*, 55-60. <https://doi.org/10.1109/ICPET.2019.00018>.

4. Shapovalova, S., Baranichenko, O. (2025). Modeling of functional processes between components of a hierarchical control object. Control, Navigation and Communication Systems, 1, 79, 67-71. <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2025.1.67-71>.
5. Riley, G. (2022). Adventures in Rule-Based Programming: A CLIPS Tutorial. Kindle Edition, 200.

КЕРУВАННЯ ІЄРАРХІЧНИМ ОБ'ЄКТОМ НА ОСНОВІ ПРОДУКЦІЙНОЇ МОДЕЛІ

Світлана Шаповалова, Олексій Бараніченко

Анотація. Через ускладнення архітектури та алгоритмів роботи автоматизованих систем диспетчерського управління (АСДУ) загальноприйняті методи керування не дозволяють гарантувати абсолютну коректність та достатню швидкість функціонування об'єкту автоматизації. Тому розробка методів з покращення цих показників є актуальною задачею та має практичне значення. Метою роботи є представлення методу автоматизованого керування динамічною АСДУ на основі продукційної моделі. Висновки: 1) визначено чотирирівневу архітектуру АСДУ, яка дозволяє реалізовувати функціонування складних ієрархічних об'єктів автоматизації; 2) представлено архітектуру трирівневої продукційної системи для системного рівня автоматизації, та дворівневу архітектуру продукційної системи для автоматизованого керування на рівні головного серверу; 3) виконано апробацію запропонованого методу та визначено його переваги над загальноприйнятим методом скінченного автомату: підвищення коректності на 16% і збільшення частки повністю автоматизованих дій на 15%.

Ключові слова: продукційна модель представлення знань, автоматизована система диспетчерського управління, логічне виведення, CLIPS.

ЛІТЕРАТУРА

1. Леві Л., Зима О. Сучасні інтелектуальні методи моделювання складних технологічних об'єктів. Системи управління, навігації та зв'язку. 2021. Вип. 1. Ч. 63. С. 49-53. <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2021.1.049>.
2. Shakir Ali Ali A., Ebrahimi S., Ashiq M. et al. CNN-Bi LSTM neural network for simulating groundwater level. Computational research progress in applied science & engineering (CRPASE). 2022. Vol. 8. P. 1-7. <https://doi.org/10.52547/crpase.8.1.2748>.
3. Albatish I., Abu-Naser S. Modeling and Controlling Smart Traffic Light System Using a Rule Based System. International Conference on Promising Electronic Technologies (ICPET). 2019. P. 55-60. <https://doi.org/10.1109/ICPET.2019.00018>.
4. Shapovalova S., Baranichenko O. Modeling of functional processes between components of a hierarchical control object. Control, Navigation and Communication Systems. 2025. Vol. 1 No. 79. P. 67-71. <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2025.1.67-71>.
5. Riley, G. (2022). Adventures in Rule-Based Programming: A CLIPS Tutorial. Kindle Edition, 200.

ЕКСПЕРТНА СИСТЕМА ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ ПОРІВНЯЛЬНОГО АНАЛІЗУ ОСВІТНІХ МЕТАОБ'ЄКТІВ

Шаров С.В.

Таврійський державний агротехнологічний університет

імені Дмитра Моторного, кандидат педагогічних наук, доцент, Україна

Анотація. У статті повідомляється про розробку експертної системи для порівняння освітніх метаоб'єктів. Наголошується на важливості систем штучного інтелекту, зокрема експертних систем, для розвитку виробництва, науки, освіти. Аналізуються особливості експертних систем, переваги їх використання в освітній діяльності. З'ясовано, що використання рамок кваліфікацій сприяє глобалізації освітніх процесів, академічної мобільності та взаємного визнання кваліфікацій. Зазначається, що ідея представлення національних рамок кваліфікацій у вигляді метаоб'єктів (абстрактних структур, що описують сутність і характеристики кваліфікацій) відкриває значні можливості для їх порівняння. Для автоматизації цього процесу була розроблена експертна система з простим графічним інтерфейсом. Перечислюються графічні елементи інтерфейсу та висвітлюється алгоритм роботи з експертною системою.

Ключові слова: національна рамка кваліфікацій, експертні системи, штучний інтелект, вища освіта, освітній метаоб'єкт.

Вступ. Наразі однією з перспективних галузей інформатики є розробка та впровадження систем штучного інтелекту, зокрема експертних систем (ЕС). Зазначені програмні продукти широко використовуються у більшості сфер людської діяльності та сприяють розвитку технологічних, технічних та наукових напрямів тощо. Важливе значення інтелектуальні системи мають для провадження освітньої діяльності, де вони сприяють впровадженню персоналізованого навчання, інтелектуального супроводу здобувачів вищої освіти, формуванню адаптивних освітніх траєкторій. В умовах реалізації євроінтеграційних процесів та долучення України до європейського простору вищої освіти актуальності набувають питання співставлення національних рамок кваліфікацій різних країн з метою узагальнення та уніфікації різних систем навчання в стислому, стандартизованому вигляді. Такий підхід є важливим у контексті глобалізації освітніх процесів, академічної мобільності

та взаємного визнання кваліфікацій. Ідея представлення національних рамок кваліфікацій у вигляді метаоб'єктів (абстрактних структур, що описують сутність і характеристики кваліфікацій) відкриває нові можливості для такого порівняння. Завдяки можливостям, що надає штучний інтелект для аналізу та зіставлення метаоб'єктів однакової структури, з'являється потенціал для створення ефективного інструментарію автоматизованого порівняння освітніх систем різних країн.

Попри існування окремих електронних ресурсів для інтелектуального порівняння рамок кваліфікацій [4], ми констатуємо відсутність універсального програмного засобу, який би ефективно виконував порівняння національних кваліфікаційних рамок між собою. Саме потужність та сучасність систем штучного інтелекту, зокрема експертних систем, та важливість порівняння рамок кваліфікацій різних країн в контексті європейської вищої освіти стали підґрунтям для формулювання тематики наукового дослідження, що спрямоване на розробку підходів до інтелектуального порівняння кваліфікаційних рамок за допомогою сучасних інформаційних технологій.

Мета дослідження полягає у повідомленні про розробку експертної системи для порівняння освітніх метаоб'єктів

Основний матеріал. Експертні системи почали використовуватися декілька десятків років тому, починаючи з медичної ЕС MYSIN для діагностики інфекційних захворювань в умовах стаціонарного лікування [1, с. 16]. За своєю суттю вони використовують експертні знання фахівців у певній наочній області, за рахунок чого знайшли широке застосування у вирішенні завдань, що потребують роботи з нечітко структурованими або слабоформалізованими знаннями. У подібних завданнях важливу роль відіграє не стільки числова обробка даних, скільки смислова інтерпретація інформації, аналіз зв'язків і прийняття рішень на основі логічних міркувань. Таким чином, ЕС виступають потужним інструментом для підтримки прийняття рішень, автоматизації складних інтелектуальних процесів та створення міжсистемної сумісності.

Як будь-який складний програмний продукт, експертні системи мають свої особливості та відмінності від інших комп'ютерних програм та систем. Одна із особливостей ЕС полягає у тому, що вони призначені для користувачів, які можуть працювати у сферах діяльності, що далекі від області штучного інтелекту, логіки, математики, програмування. Такі користувачі розглядають експертну систему як

певний програмний засіб або електронний ресурс, що допомагає їм у повсякденній роботі. Саме тому робота з експертними системами у діалоговому режимі повинна бути достатньо простою і не вимагати значної підготовки в ІТ-сфері. Зазначена функціональність досягається за рахунок використання блоку пояснень, який дозволяє пояснити хід своїх дій при вирішенні певної проблеми, яка була поставлена користувачем.

Експертні системи використовуються у різних сферах діяльності людини, зокрема в освіті. Вони дозволяють враховувати індивідуальні особливості здобувачів вищої освіти їх професійні нахили, що дозволяє підвищити результативність їх підготовки, сприяє підвищенню навчальної мотивації, усвідомленого вибору професії [3, с. 129] тощо. З іншого боку, використання інтелектуальних систем можливо для більш глобальних освітніх завдань, зокрема порівняння рамок кваліфікації. Як зазначає Ю. Рашкевич, Національну рамку кваліфікацій (НРК) можна вважати досить потужним та найбільш системним інструментом, який забезпечує зрозумілість та прозорість національних освітніх систем окремих країн. Такі рамки повинні були створені до 2010 року у кожній країні, яка з 2005 року приймає участь у Болонському процесі та підтримує рішення Бергенської конференції. Крім того, країни-учасники повинні були провести самоаналіз національних рамок для визначення можливості співставлення з базовими рамками кваліфікацій (мета-рамками) – Європейською рамкою кваліфікацій для навчання впродовж життя (EQF LLL) та рамкою кваліфікацій для Європейського простору вищої освіти (QF ENEA) [2, с. 8].

На нашу думку, система рівнів і ступенів вищої освіти, що використовуються у рамках кваліфікацій, може бути представлена у вигляді певного метаоб'єкту, який описує рівні, компетентності, уміння, знання, результати навчання, інші структурні елементи. Для автоматизації цього процесу ми розробили експертної системи для порівняльного аналізу освітніх метаоб'єктів, що є структурними елементами рамок кваліфікацій (рис. 1).

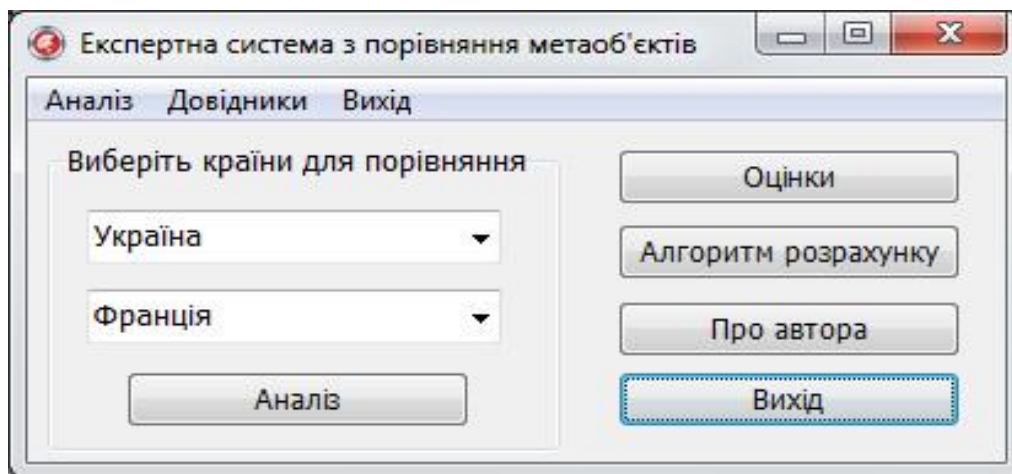


Рисунок 1 – Головне вікно експертної системи

Для того, щоб здійснити порівняння рамок кваліфікацій у вигляді освітніх метаоб'єктів (сукупності знань, умінь, компетентностей), необхідно обрати країни для порівняння та натиснути кнопку «Аналіз». Звісно, інформація про структурні елементи освітніх метаоб'єктів цих країн повинні бути попередньо внесені в експертну систему. Після того, як буде здійснено порівняльний аналіз всіх елементів метаоб'єктів в автоматичному режимі, на екрані буде виведено вікно з обробленими даними, яке складається з чотирьох вкладок: компетентності національної рамки кваліфікацій першої країни; компетентності національної рамки кваліфікацій другої країни; таблиця порівняння кількості та сум мір елементів на конкретному рівні; результати роботи алгоритму порівняння, що передбачає обчислення головної діагоналі матриці, тобто порівняння суми мір одиничних елементів на однакових рівнях рамки кваліфікацій конкретної країни [5, с. 549].

Висновки. Отже, експертні системи як різновид інтелектуальних систем знаходять широке застосування в різних сферах діяльності людини, зокрема в освітній сфері. Їх основна функція полягає в аналізі вхідних, часто слабоформалізованих параметрів та формування на їх основі обґрунтованих рішень високої якості. Розроблена експертна система для порівняльного аналізу метаоб'єктів дозволяє виконувати необхідні обчислення та представляти результати порівняння структурних елементів рамок кваліфікацій у форматі матриці.

ЛІТЕРАТУРА

1. Биков М. М., Ковтун В. В., Гаврилюк В. О. Основи інтелектуальних технологій. Частина 1. Технології розпізнавання : електронний навчальний посібник комбінованого (локального та мережного) використання. Вінниця : ВНТУ, 2023. 229 с.
2. Захарченко В.М., Луговий В.І., Рашкевич Ю.М., Таланова Ж.В. Розроблення освітніх програм. Методичні рекомендації. К. : ДП «НВЦ «Пріоритети», 2014. 120 с.
3. Кучаковська Г. А. Моделі створення бази знань експертної системи з вибору спеціальності для абітурієнтів вищого навчального закладу. Освітологічний дискурс. 2014. №1. С. 129 – 138.
4. Осадчий В.В. та ін. Порівняння національних рамок кваліфікацій засобами веб-орієнтованої інтелектуальної інформаційної системи. Інформаційні технології і засоби навчання. 2016. №6(56). С. 121 – 136.
5. Шаров С. В., Єремєєв В. С., Печерський Р. В. Розробка експертної системи для проведення порівняльного аналізу освітніх метаоб'єктів. Науковий вісник Миколаївського національного університету імені В.О. Сухомлинського. Педагогічні науки. 2017. №4. С. 547 – 551.

EXPERT SYSTEM FOR COMPARATIVE ANALYSIS OF EDUCATIONAL METAOBJECTS

Sharov S.

Abstract. *The article reports on the development of an expert system for comparing educational metaobjects. The importance of artificial intelligence systems, in particular expert systems, for the development of production, science, and education is emphasized. The features of expert systems and the advantages of their use in educational activities are analyzed. It is found that the use of qualification frameworks contributes to the globalization of educational processes, academic mobility, and mutual recognition of qualifications. It is noted that the idea of representing national qualification frameworks in the form of metaobjects (abstract structures that describe the essence and characteristics of qualifications) opens up significant opportunities for their comparison. To automate this process, an expert system with a simple graphical interface was developed. The graphical elements of the interface are listed and the algorithm for working with the expert system is highlighted.*

Keywords: *national qualifications framework, expert systems, artificial intelligence, higher education, educational meta-object.*

REFERENCE

1. Bykov M. M., Kovtun V. V., Havryliuk V. O. Osnovy intelektualnykh tekhnolohii. Chastyna 1. Tekhnolohii rozpoznavannia : elektronnyi navchalnyi posibnyk kombinovanoho (lokalnoho ta merezhnoho) vykorystannia. Vinnytsia : VNTU, 2023. 229 s. [in Ukrainian].

2. Zakharchenko V.M., Luhovyi V.I., Rashkevych Yu.M., Talanova Zh.V. Rozroblennia osvitynikh prohram. Metodychni rekomendatsii. K. : DP «NVTs «Priorytety», 2014. 120 s. [in Ukrainian].
3. Kuchakovska H. A. Modeli stvorennia bazy znan ekspertnoi systemy z vyboru spetsialnosti dlia abiturientiv vyshchoho navchalnoho zakladu. Osvitohichnyi diskurs. 2014. №1. S. 129 – 138. [in Ukrainian].
4. Osadchij V.V. et al. Porivnjannja nacionalnykh ramok kvalifikacij zasobamy veb-orijentovanoji intelektualjnoji informacijnoji systemy. Informatsiini tekhnolohii i zasoby navchannia. 2016. №6(56). S. 121 – 136. [in Ukrainian].
5. Sharov S. V., Yermieiev V. S., Pecherskyi R. V. Rozrobka ekspertnoi systemy dlia provedennia porivnialnoho analizu osvitynikh metaob'iektiv. Naukovyi visnyk Mykolaivskoho natsionalnoho universytetu imeni V.O. Sukhomlynskoho. Pedagogichni nauky. 2017. №4. S. 547 – 551. [in Ukrainian].

ІНФОРМАЦІЙНА БЕЗПЕКА В ЕПОХУ ЦИФРОВОЇ ТРАНСФОРМАЦІЇ

Шарова Т.М.

Таврійський державний агротехнологічний університет

імені Дмитра Моторного, доктор філологічних наук, професор, Україна

Анотація. У статті досліджено актуальні виклики інформаційної безпеки в умовах цифрової трансформації, що охоплює всі сфери суспільного життя – від державного управління до освіти та бізнесу. Проаналізовано основні типи загроз, які виникають у процесі впровадження цифрових технологій, зокрема атаки на критичну інфраструктуру, витоки даних, шкідливе програмне забезпечення та соціальну інженерію. Розглянуто сучасні підходи до протидії загрозам, зокрема моніторингу інформаційного середовища та підвищення рівня цифрової культури користувачів. Особливу увагу приділено українському контексту, зокрема досвіду реагування на кібератаки в умовах війни та інтеграції європейських стандартів інформаційної безпеки. Зроблено висновки щодо необхідності міждисциплінарного підходу та розвитку кіберстійкості на всіх рівнях цифрової взаємодії.

Ключові слова: цифрова трансформація, інформаційна безпека, кіберзагрози, інтелектуальні системи, штучний інтелект, кіберстійкість.

Вступ. Сучасний етап розвитку суспільства характеризується стрімкою цифровою трансформацією, яка охоплює всі сфери людської діяльності – від державного управління та освіти до промисловості, охорони здоров'я й побуту. Водночас із розширенням цифрового простору зростає і спектр інформаційних загроз, що ставить під сумнів безпеку як окремих користувачів, так і цілих держав. Поширення технологій Інтернету речей, хмарних обчислень, великих даних і штучного інтелекту створює нові можливості, але й відкриває нові вектори атак для кіберзлочинців. Сучасні дослідники Василенко В., Буряк А. переконують, що «...недостатня захищеність даних може призвести до серйозних наслідків, як-от втрата конфіденційності, втрата довіри клієнтів і партнерів, фінансові втрати та репутаційні проблеми» [1, с. 103].

Особливої актуальності ця проблема набуває в умовах воєнного стану в Україні, коли інформаційна безпека є критично важливою складовою національної безпеки. Масовані кібератаки на державні установи, інфраструктуру та громадянський сектор підкреслюють потребу в системному, інтелектуальному та прогнозованому підході до забезпечення кіберзахисту. У

цьому контексті постає необхідність вивчення не лише сучасних кіберзагроз, а й інструментів і стратегій протидії їм. Саме тому дослідження питань інформаційної безпеки в умовах цифрової трансформації є своєчасним, соціально значущим та має практичну цінність для розроблення ефективних рішень на рівні державної політики, бізнесу та освіти [3, с. 479].

У статті досліджено актуальні виклики інформаційної безпеки в умовах цифрової трансформації суспільства.

Основний матеріал. Цифрова трансформація відкриває широкі можливості для модернізації управлінських процесів, покращення якості послуг, автоматизації виробництва, впровадження інновацій у сфері освіти та охорони здоров'я. Однак вона також супроводжується значним зростанням ризиків, пов'язаних з інформаційною безпекою. Зміна традиційної архітектури ІТ-систем, активне використання віддалених підключень, мобільних пристроїв, хмарних сервісів, систем IoT – усе це розширює потенційні точки вразливості.

До основних викликів інформаційній безпеці на сучасному етапі належать:

1. кіберзагрози нового покоління спрямовані на довготривале проникнення до системи, збирання конфіденційних даних та її виведення з ладу;
2. фішинг і соціальна інженерія, що спрямовані на маніпуляцію поведінкою користувачів з метою отримання доступу до інформації;
3. атаки на критичну інфраструктуру, що можуть спричинити значні збитки не лише економічного, а й гуманітарного характеру;
4. витоки персональних і комерційних даних внаслідок недосконалості систем зберігання або недотримання стандартів безпеки.

У процесі цифрової трансформації організації стикаються з широким спектром загроз інформаційній безпеці, які можуть мати різну природу, складність і наслідки. Для формування ефективної стратегії кіберзахисту необхідно чітко ідентифікувати типи загроз, розуміти їхнє походження та характер впливу на інформаційні системи. З метою систематизації основних небезпек у сфері інформаційної безпеки доцільно здійснити їх класифікацію за різними критеріями, що представлено у таблиці нижче (табл. 1).

Таблиця 1

Класифікація основних загроз інформаційній безпеці

Категорія загрози	Опис	Приклади
Технічні загрози	Пов'язані з вразливостями апаратного чи програмного забезпечення	Віруси, трояни, вразливості ОС і мережевого обладнання
Програмні загрози	Зловмисне програмне забезпечення, яке виконує несанкціоновані дії	Ransomware, Spyware, Botnet, Backdoor
Мережеві загрози	Загрози, що виникають під час передачі даних мережею	DoS/DDoS-атаки, перехоплення трафіку (sniffing), підміна IP-адреси
Соціальна інженерія	Вплив на людину з метою отримання доступу до інформаційних ресурсів	Фішинг, вішинг (голосовий фішинг), baiting (приманка), pretexting (легенда)
Організаційні загрози	Недотримання внутрішніх політик безпеки або їх відсутність	Незахищені паролі, слабкі процедури автентифікації, відсутність резервного копіювання
Загрози з боку персоналу	Дії працівників, навмисні або випадкові, що загрожують безпеці	Витік інформації, шахрайство, порушення політик доступу
Фізичні загрози	Руйнування або пошкодження обладнання через зовнішні фактори	Пожежі, повені, крадіжка обладнання
Гібридні/воєнні кіберзагрози	Кіберінструменти як елемент гібридної війни чи терористичних дій	Кібератаки на державні ресурси, дезінформаційні кампанії

Аналіз поданих у таблиці загроз демонструє, що інформаційна безпека потребує комплексного підходу, який поєднує технічні, організаційні, правові та людські аспекти. Особливої уваги заслуговують загрози соціальної інженерії та внутрішні ризики, оскільки вони є найскладнішими для виявлення. На думку Головка О. «на рівень інформаційної культури людини... впливають численні фактори, серед яких окрему увагу варто приділяти питанням забезпечення цифрових прав людини» [2, с. 40]. У сучасних умовах протидія кожній із категорій загроз має включати використання інтелектуальних засобів виявлення, постійне оновлення систем захисту, розробку політик інформаційної безпеки та навчання персоналу з метою формування кіберкультури в організації. На думку Шопіної І. «ключовим впливом кіберзагроз на освіту є порушення процесів навчання» [4, с. 33]. Ефективна

система кіберзахисту має будуватися на поєднанні технічних, організаційних, правових і освітніх заходів, а також бути гнучкою до змін середовища та здатною до самонавчання.

Висновки. Отже, ефективне забезпечення інформаційної безпеки в епоху цифрової трансформації потребує не лише впровадження сучасних технічних рішень, але й формування комплексної стратегії управління ризиками, що включає правові, організаційні та освітні компоненти. Особливу увагу слід приділяти питанням кібергігієни та розвитку цифрової культури серед працівників. У результаті дослідження встановлено, що загрози соціальної інженерії та внутрішні ризики, спричинені людським фактором, залишаються найменш контрольованими, а отже – найнебезпечнішими.

ЛІТЕРАТУРА

1. Василенко В. Ю., Буряк А. М. Безпека даних в епоху цифрової трансформації: проблеми та виклики. Інформація та соціум. 2024. №1. С. 103 – 106.
2. Головка О. М. Цифрова культура та інформаційна культура: права людини в епоху цифрових трансформацій. Інформація і право. 2019. №4 (31). С. 37 – 44.
3. Шарова Т. М., Землянський А. М. Освіта в інформаційному просторі: цифрове суспільство. Наука і техніка сьогодні. 2023. №14(28). С. 479 – 492.
4. Шопіна І. М. Інформаційна безпека цифрової трансформації. Науковий вісник Львівського державного університету внутрішніх справ (серія юридична). 2023. №1. С. 28 – 35.

INFORMATION SECURITY IN THE ERA OF DIGITAL TRANSFORMATION

Sharova T.

Abstract. *The article explores the current challenges of information security in the context of digital transformation, which affects all areas of public life—from government administration to education and business. The main types of threats arising during the implementation of digital technologies are analyzed, including attacks on critical infrastructure, data breaches, malicious software, and social engineering. Modern approaches to countering these threats are considered, in particular monitoring of the information environment, and the promotion of users' digital literacy and culture. Special attention is given to the Ukrainian context, particularly the experience of responding to cyberattacks during wartime and the integration of European information security standards. The study concludes with the assertion that an interdisciplinary approach and the development of cyber resilience at all levels of digital interaction are essential.*

Keywords: *digital transformation, information security, cyber threats, intelligent systems, artificial intelligence, cyber resilience.*

REFERENCE

1. Vasylenko V. Iu., Buriak A. M. Bezpeka danykh v epokhu tsyfrovoy transformatsii: problemy ta vyklyky. Informatsiia ta sotsium. 2024. №1. S. 103 – 106. [in Ukrainian].
2. Holovko O. M. Tsyfrova kultura ta informatsiina kultura: prava liudyny v epokhu tsyfrovoykh transformatsii. Informatsiia i pravo. 2019. №(31). S. 37 – 44. [in Ukrainian].
3. Sharova T. M., Zemlianskiy A. M. Osvita v informatsiinomu prostori: tsyfrove suspilstvo. Nauka i tekhnika sohodni. 2023. №14(28). S. 479 – 492. [in Ukrainian].
4. Shopina I. M. Informatsiina bezpeka tsyfrovoy transformatsii. Naukovyi visnyk Lvivskoho derzhavnoho universytetu vnutrishnikh sprav (seriia yurydychna). 2023. №1. S. 28 – 35. [in Ukrainian].

DIGITAL MAPPING OF THE UKRAINIAN SACRED MONODY

Khrystyna Ryabinets¹, Tetiana Shestakevych², Nataliya Syrotynska³

¹ Ivan Franko National University of Lviv, PhD student, Ukraine

² Lviv Polytechnic National University, PhD, Associate Professor, Ukraine

³ Ivan Franko National University of Lviv, Doctor of Arts, Professor, Ukraine

Abstract. *The LU-BIRD project aims to preserve and promote Ukraine's medieval artistic heritage through the digital mapping of the Lyubachiv Irmologion of 1674, a key manuscript of liturgical monody created by Pavlo Smerechanskyi. This richly decorated collection, housed in the Lviv Historical Museum, reflects both artistic elegance and historical significance. The project will offer free public access to the Irmologion in various digital formats – images, editable texts, and machine-readable music files – supporting research, education, and cultural dissemination. By digitizing, editing, and publishing the chants and texts, LU-BIRD will remove barriers to heritage access and stimulate scholarly and creative exploration across disciplines. The outcomes will strengthen the study of Ukrainian identity, preserve rare manuscripts, and foster linguistic and musicological research, while contributing to the expansion of educational resources and the safeguarding of national cultural memory.*

Keywords: *Ukrainian identity, Lyubachiv Irmologion, digital heritage, medieval music, facsimile edition, musicology, manuscript preservation, chant digitization, cultural memory, digital humanities*

Ukrainian art is vividly represented in the liturgical plane, in particular in the medieval monody – unison liturgical singing. This is an iconic singing repertoire, preserved in handwritten notated collections of the 16th-18th centuries – irmologions, which, in addition to being purely liturgical, also served as a singing textbook for all Ukrainian children. Therefore, the number of irmologions grew rapidly, and the musical motifs and poetic vocabulary of the repertoire were quickly mastered. In the future, this significantly influenced the content and form of numerous literary, artistic and musical genres of Ukrainian culture.

For research, we chose the Lyubachiv irmologion of 1674, created by Pavlo Smerechanskyi. It is kept in Lviv in the Historical Museum (RUK 103), its repertoire is one of the most complete, and the text is written in a small semi-script with elements of cursive, very clear and easy to read (Fig. 1). The collection is decorated with skillful ornamental screens, initials and decorations on the margins. All this,

along with calligraphic writing, distinguishes the Lyubachiv irmologion of 1674 as a particularly elegant and, at the same time, capacious collection.

The goal of LU-BIRD is to preserve and disseminate the Ukrainian medieval artistic heritage by mapping the part of Lyubachiv Irmologion of 1674 with the help of digital tools. The Lyubachiv Irmologion will be accessed freely, in various digital formats:

- Book's pages as the pictures, in image file format.
- Chants as a sequence of pictures, as an image archive.
- Chants in score-edited format.
- Chants in interchangeable, machine readable format (MIDI, MusicXML).
- Chant's texts in text editable format.



Figure - 1. A page of Lyubachiv irmologion

To reach the goal, the **key tasks** are:

- To take high resolution photos of the pages of Lyubachiv Irmologion, which is now preserved in Lviv Historical Museum (RUK.103).
- Combine pictures into sets to map a single chant.
- Create editable version of each chant, and also in other popular file formats, such as PDF, MIDI, MusicXML.
- Create editable version of each chant.
- Develop a LU-BIRD project website with digital mapping of Lyubachiv Irmologion with chants of different formats.
- Disseminate the results of the project via preparing and submitting a research papers to the scientific Journal and present the results at the scientific conference.

To present the **schedule** of the LU-BIRD we used the Gantt chart at Figure 2.

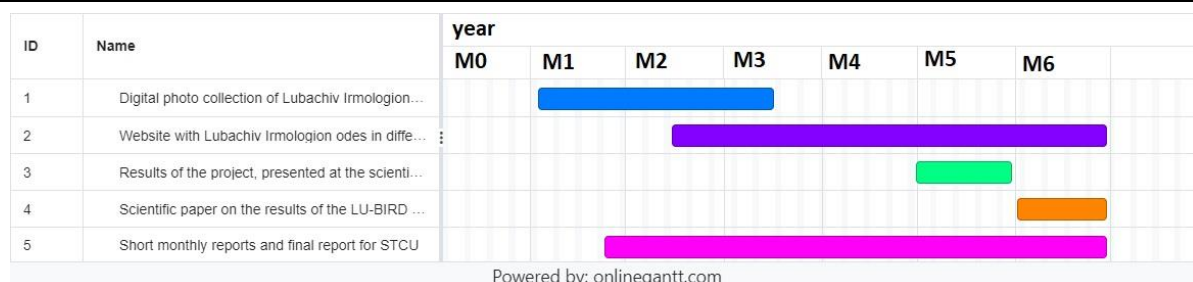


Figure 2 - The Gantt chart of the LU-BIRD project

The project will begin with a kick-off meeting, where the team will review the overall scope, discuss the timeline, and align on key objectives and expectations. Following this, the design phase of the LU-BIRD website will be completed, establishing a strong digital platform for the project's future developments.

Once the website is in place, a digital version of the Lyubachiv Irmologion in pictures will be carefully prepared and uploaded, ensuring easy access through the site. In addition, the chants from the Lyubachiv Irmologion will be digitized in picture form and made available online for a wide audience.

The project will also create a digital, interchangeable version of each chant from the Lyubachiv Irmologion, which will be uploaded to the website to allow for flexible and user-friendly interaction. Alongside this, an editable text version of every chant will be prepared and published on the platform to support deeper research and creative use. The project's progress and outcomes will be presented to the academic community during a scientific conference, and the final results will be submitted in the form of a research paper to a scientific journal for publication. The preservation of Ukraine's medieval national artistic heritage will be another key achievement, ensuring that these unique cultural artifacts will endure. By digitizing manuscript materials and making them accessible online, the project will remove traditional barriers and offer scholars, students, and interested individuals convenient, unrestricted access to these valuable sources. This will encourage their integration into academic research across a wide range of humanities disciplines.

Educational programs across various fields — including practical and performing arts — will be enriched through the expansion of available resources. The physical preservation of the Lyubachiv Irmologion of 1674 will be secured through its facsimile publication, allowing safe study while protecting the original

manuscript. Additionally, the project will result in the creation of a lexical dictionary based on 17th-century language, paving the way for future linguistic research. It will also lead to the compilation of a musical and intonational dictionary of the 17th century, which will stimulate new musicological research and deepen understanding of national musical thought.

Conclusions. The LU-BIRD project aims to preserve and disseminate this cultural heritage through the digital processing of the Lyubachiv Irmoloi. The result of the project will be free online access to the Irmoloi in various digital formats (page images, collections of chants in the form of images, sheet music, MIDI, MusicXML, text format).

It is expected that the LU-BIRD project will contribute to a deeper understanding of Ukrainian identity, the preservation of cultural heritage, ensuring wide access to valuable sources, enriching educational programs, the physical preservation of the original through a facsimile edition, as well as the creation of a lexical and musical-intonational dictionary of the 17th century.

REFERENCES

1. Shestakevych T., Ryabinets K., Syrotynska N., Paprotsky M.-M. The concept of using information technologies for the study of sacred monody's structure Based on the 1674 Lyubachiv irmologion (2024) CEUR Workshop Proceedings, 3851.
2. Holubets Y., Ryabinets K., Shestakevych T. Construction of a Frequency Dictionary of Ukrainian Monody Texts Based on a Lemma List // Information, Communication, Society 2024: Proceedings of the 13th International Scientific Conference ICS-2024, May 23–25, 2024, Lviv. — Lviv: Lviv Polytechnic Publishing House, 2024. — P. 28–29.

ЦИФРОВЕ ВІДОБРАЖЕННЯ УКРАЇНСЬКОЇ САКРАЛЬНОЇ МОНОДІЇ

Рябінець Х.Я., Шестакевич Т., Сиротинська Н

Анотація. *Проект LU-BIRD має на меті збереження та популяризацію середньовічної мистецької спадщини України шляхом цифрового картографування Любачівського ірмологіона 1674 року, знакового рукопису літургійної монодії, створеного Павлом Смеречанським. Ця вишукано оздоблена збірка, що зберігається у Львівському історичному музеї, поєднує художню довершеність із історичною цінністю. Проект забезпечить вільний доступ до ірмологіона в різних цифрових форматах — зображеннях, редагованих текстах і машинозчитуваних музичних файлах, — підтримуючи наукові дослідження, освіту й культурне поширення. Оцифровуючи, редагуючи й публікуючи наспіви та тексти, LU-BIRD усуватиме бар'єри до спадщини й активізує міждисциплінарні наукові та творчі*

пошуки. Результати проєкту поглиблюють розуміння української ідентичності, збережуть рідкісні рукописи й сприятимуть розвитку лінгвістичних та музикознавчих досліджень, розширюючи освітні ресурси й укріплюючи національну культурну пам'ять.

Ключові слова: українська ідентичність, Любачівський ірмологіон, цифрова спадщина, середньовічна музика, факсимільне видання, музикознавство, збереження рукописів, оцифрування наспівів, культурна пам'ять, цифрові гуманітарні науки.

ЛІТЕРАТУРА

1. Shestakevych T., Ryabinets K., Syrotynska N., Paprotsky M.-M. The concept of using information technologies for the study of sacred monody's structure Based on the 1674 Lyubachiv irmologion (2024) CEUR Workshop Proceedings, 3851.
2. Голубець Ю., Рябінець Х., Шестакевич Т. Побудова частотного словника текстів української монодії на основі списку лем // Інформація, комунікація, суспільство 2024: Матеріали 13-ї Міжнародної наукової конференції ІКС-2024, 23–25 травня 2024 р., Львів. — Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2024. — С. 28-29.

АНАЛІЗ ЕМОЦІЙ З ВИКОРИСТАННЯМ ГОЛОСОВИХ ОЗНАК

Дмитрієва І.С.¹, Бімалов Д.В.²

¹Дніпровський металургійний інститут, Український державний університету науки і технологій, к.т.н., доцент, Україна

²Дніпровський металургійний інститут, Український державний університету науки і технологій, аспірант, Україна

Анотація. У роботі описані методи розпізнавання емоцій людини. Ця сфера штучного інтелекту стрімко розвивається і відіграє ключову роль у підвищенні ефективності взаємодії між людиною та комп'ютером. У процесі дослідження аналізуються наявні підходи щодо розпізнавання емоцій за участю голосових ознак. У цій роботі розглядаються методи аналізу емоцій на основі голосових ознак. Описуються основні параметри, такі як частота, темп, інтонація, тембр і гучність, які дають змогу визначити емоційний стан людини за її мовленням. Розглядаються сучасні підходи, включно з використанням алгоритмів машинного навчання та нейромережових моделей для опрацювання аудіофайлів і класифікації емоцій. Це дослідження сприяє розвитку вивчення емоцій, надаючи глибше розуміння людських емоційних станів.

Ключові слова: розпізнавання емоцій, розпізнавання емоцій через звук, машинне навчання, аналіз емоцій, обробка мовлення.

Мета і завдання досліджень. Дослідити модель розпізнавання емоцій за допомогою голосових даних для підвищення точності та стабільності системи в умовах реальної взаємодії, що дозволить точніше інтерпретувати емоційні стани людини.

Розглянемо технологію розпізнавання емоцій за голосом, відому як паралінгвістика, що досліджує, як люди передають емоційні стани через особливості мови, такі як інтонація, темп, гучність і висота голосу. Цей процес відіграє важливу роль у психолінгвістиці, когнітивних науках і штучному інтелекті. Коли ми слухаємо когось, ми інтуїтивно розпізнаємо не лише зміст слів, а й емоції, які передаються. Наприклад, підвищений темп мовлення і високий тон можуть свідчити про радість або хвилювання. Низький і повільніший голос може вказувати на смуток чи розчарування. Приклади технологій: Emotion Recognition (SER), Neural Networks (CNN)[1]

До основних аспектів паралінгвістики, що дозволяють розпізнати емоції через голос, відносяться такі параметри мовлення:

1. Тональність голосу може передавати емоції навіть точніше, ніж слова. Високий тон зазвичай асоціюється з позитивними емоціями, як-от радість або збудження. Низький тон може натякати на сум, розчарування чи втому. Зміни в тоні (монотонність), можуть свідчити про хвилювання, здивування або інтерес.

2. Гучність голосу є ефективним показником емоційного стану, оскільки люди часто підвищують її у моменти сильних емоцій і знижують у спокійних або сумних ситуаціях.

3. Темп мовлення, тобто швидкість вимови слів, відіграє важливу роль у розпізнаванні емоцій. На емоційному фоні він часто змінюється: швидка мова може свідчити про збудження, тривогу, стрес або хвилювання; повільна — про смуток, втому, депресію або роздуми.

4. Інтонація мови це зміна висоти голосу та інших його характеристик під час мовлення, вона допомагає передати емоційні відтінки. Підйом інтонації може вказувати на здивування, хвилювання або інтерес, а спад — на завершення думки, спокій або смуток. Змінна інтонація, коли вона варіюється протягом фрази, може свідчити про збудження, радість чи інтерес.

Для аналізу та розпізнавання голосових емоцій часто використовують методи машинного навчання. Моделі класифікації, такі як логістична регресія, метод опорних векторів (SVM) та нейронні мережі, можуть бути навчені на датасеті з попередньо розміченими емоціями, наприклад аудіофайли з різними емоціями (гнів, радість, смуток тощо)[2].

Акустичні ознаки та їх ваги визначають наступним чином:

$$E = w_1 \times F0 + w_2 \times V + w_3 \times T + w_4 \times P ,$$

де:

E - емоційний показник,

F0 - основна частота,

V - гучність,

T - темп мовлення,

P - тривалість пауз,

w_1, w_2, w_3, w_4 - ваги, які визначаються в процесі навчання моделі.

Кожен з цих параметрів вносить свій внесок у загальну оцінку емоції, і їхні ваги можуть бути налаштовані відповідно до навчальних даних [3]. Деталі процесу наведено у блок-схемі (див. рис. 1).

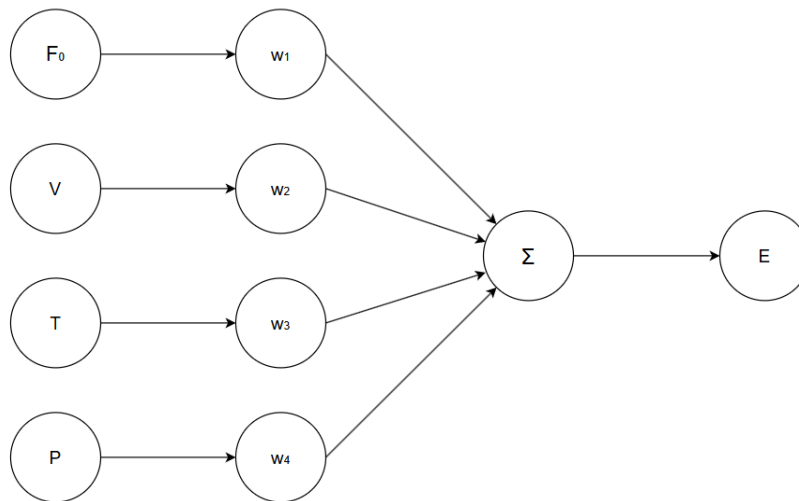


Рисунок 1 - Акустичні ознаки та їх ваги

Висновок. Визначення емоцій по голосу базується на комплексному аналізі багатьох акустичних характеристик, як-от частота, гучність, темп мовлення, інтонація та інші. Ці характеристики можуть бути проаналізовані за допомогою різноманітних математичних і статистичних моделей, включаючи машинне навчання та нейронні мережі, для точного розпізнавання емоцій.

ЛІТЕРАТУРА

1. Z. Huang, M. Dong, Q. Mao, Y. Zhan. Speech emotion recognition using CNN. Proceedings of the 22nd ACM international conference on multimedia, Association for Computing Machinery, New York, NY, USA (2014), pp. 801-804, DOI: 10.1145/2647868.2654984
2. E. Lakomkin, C. Weber, S. Magg, S. Wermter. Reusing neural speech representations for auditory emotion recognition. (2018), DOI: 10.48550/ARXIV.1803.11508.
3. Дмитрієва І.С., Бімалов Д.В. Аналіз емоцій з використанням виразів обличчя та голосових ознак. // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових робіт. - Вип. 3(158). - Дніпро: УДУНТ, 2025. с. 21-27. DOI 10.34185/1562-9945-3-158-2025-03

ANALYSIS OF EMOTIONS USING VOICE FEATURES

Dmytriieva Iryna Serhiivna, Bimalov Dmytro Viktorovych

Abstract. *The paper describes methods for recognizing human emotions. This area of artificial intelligence is developing rapidly and plays a key role in improving the efficiency of human-computer interaction. The study analyzes existing approaches to recognizing emotions using voice features. This paper discusses methods for analyzing emotions based on voice features. The main parameters, such as frequency, tempo, intonation, timbre, and volume, are described, which make it possible to determine the emotional state of a person by his or her speech. Modern approaches are discussed, including the use of machine learning algorithms and neural network models for processing audio files and classifying emotions. This study contributes to the development of emotion research by providing a deeper understanding of human emotional states.*

Keywords: *emotion recognition, emotion recognition through sound, machine learning, emotion analysis, speech processing.*

REFERENCE

1. Z. Huang, M. Dong, Q. Mao, Y. Zhan. Speech emotion recognition using CNN. Proceedings of the 22nd ACM international conference on multimedia, Association for Computing Machinery, New York, NY, USA (2014), pp. 801-804, DOI: 10.1145/2647868.2654984
2. E. Lakomkin, C. Weber, S. Magg, S. Wermter. Reusing neural speech representations for auditory emotion recognition. (2018), DOI: 10.48550/ARXIV.1803.11508.
3. Dmitrieva I.S., Bimalov D.V. Analysis of emotions using facial expressions and voice signs. Regional inter-university collection of scientific works. - Issue 3(158). - Dnipro: USUST, 2025. p. 21-27. DOI 10.34185/1562-9945-3-158-2025-03

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ПЕРСПЕКТИВНИХ МОДЕЛЕЙ РОЙОВОГО ІНТЕЛЕКТУ

Купін А.І.¹, Косей М.П.¹

¹ Криворізький національний університет, Кривий Ріг, Україна

Анотація. Це дослідження спрямоване на аналіз моделей ройового інтелекту та їхньої ролі у вдосконаленні мультиагентних систем. У роботі розглянуто ключові наукові досягнення у цій галузі, а також окреслено тенденції розширення сфери їхнього практичного застосування.

Ключові слова: штучний інтелект, інтелектуальний агент, мультиагентні системи, ройовий інтелект, алгоритми оптимізації ройового інтелекту, моделі машинного навчання ML.

На сучасному етапі розвитку технологій мультиагентні системи стрімко поширюються у різних наукових і технічних галузях, стаючи одним із визначальних чинників технологічного прогресу. Особливої актуальності ці системи набувають у контексті збройних конфліктів, коли підвищується попит на автономні системи з розвиненим інтелектуальним управлінням, що підкреслює важливість розвитку мультиагентних технологій.

Сьогодні подібні технології активно використовуються у безпілотних літальних апаратах (БПЛА). Окрім військової сфери, їх застосовують також у агропромисловості, будівництві, пошуково-рятувальних операціях та екологічному моніторингу.

Згідно з дослідженнями [1], ринок військових безпілотників демонструє стрімке зростання: з 14,14 млрд доларів США у 2023 році до 16,7 млрд у 2024 році, а до 2032 року очікується 47,16 млрд доларів зі щорічним приростом у 13,15%.

Провідними гравцями цієї галузі є компанії Lockheed Martin, Northrop Grumman, General Atomics та Boeing. Зростання попиту на військові дрони зумовлене значними інвестиціями, розвитком ринку та широким використанням цих технологій у військових операціях.

Таке стрімке зростання пояснюється сучасними глобальними військовими конфліктами (наприклад, російська агресія проти України з 24 лютого 2022 року або терористичні дії Хамасу проти Ізраїлю з 7 жовтня 2023 року), а також

швидким прогресом у сфері штучного інтелекту, який спостерігався протягом останніх років.

Формалізовані моделі рою своїм корінням сягають біологічних досліджень 19–20 століть, які аналізували колективну поведінку тварин. У першій половині 20-го століття були створені перші математичні моделі, наприклад, динаміка популяцій Лотки-Вольтерри. Важливий поштовх для розвитку цих моделей відбувся у другій половині століття завдяки появі комп'ютерів, що дали змогу симулювати складні системи. Сучасні моделі рою ґрунтуються на поєднанні спостережень за природними системами, математичного аналізу та новітніх технологій.

Сьогодні у моделюванні рою виділяють два принципово різні підходи [2]:

- просторовий (spatial);
- непросторовий (nonspatial).

У непросторових моделях динаміка рою описується через частотний розподіл груп агентів різного розміру. При цьому допускаються процеси об'єднання чи поділу груп залежно від динаміки взаємодій, умов середовища та внутрішніх характеристик. Основним недоліком такого підходу є потреба у введенні численних припущень для опису трансформацій груп, що може знижувати точність моделювання.

Просторові моделі враховують простір явно або неявно.

Вони поділяються на:

- індивідуально-орієнтовані моделі (лагранжеві, Lagrangian), які базуються на описі руху кожного агента окремо;
- континуальні моделі (ейлерові, Eulerian), в яких рій розглядається як континуум, що описується через густину чи концентрацію популяції. Поведінка рою моделюється через рівняння в частинних похідних, що дозволяють аналізувати його динаміку в одно-, дво- або тривимірному просторі.

Моделювання ройової динаміки в рамках індивідуально-орієнтованої концепції здійснюється через взаємодію двох типів сил:

- притягування на великих відстанях, наприклад у риб воно базується на зоровій інформації,
- відштовхування на коротких відстанях, яке виникає через тиск або коливання води, виявлені органом чуття (бічною лінією риби).

Для моделювання динаміки рою із застосуванням континуального підходу також популярними є стохастичні марковські моделі [3]. Вони дозволяють описати еволюцію системи через ймовірнісний розподіл її станів, що дає змогу враховувати динамічну змінність поведінки рою та адаптацію до умов середовища.

В індивідуально-орієнтованому підході широко використовуються моделі, засновані на теорії графів [4], де агенти моделюються як вузли графа, а їх взаємодії — як ребра. Такий підхід дозволяє описувати структуру рою через топологію графа, забезпечуючи зручний інструмент для аналізу складних взаємодій між агентами.

Одним із ключових понять у теорії графів є кістякове дерево — підграф, який охоплює всі вершини початкового графа та не містить циклів. Кістякове дерево забезпечує мінімальну зв'язність графа, тобто гарантує існування шляху між будь-якими двома вершинами, що є важливим для координації агентів у рої.

Модель рою, заснована на теорії графів, описана в роботі [4], розглядає рій як інформаційну мережу, де кожен агент є вузлом графа, а інформаційні зв'язки між агентами представляються ребрами. Така топологія може бути як статичною, так і динамічною, залежно від умов середовища та завдань, що стоять перед роєм.

У рамках підходу, описаного в [4], розглядаються два основні способи управління багатоагентними системами: на основі вузлів (node-based), де аналізується стан кожного агента окремо, та на основі ребер (edge-based), де оцінюється відносний стан між парами агентів.

Автор роботи [4] надає перевагу підходу, заснованому на ребрах (edge-based), оскільки він ефективніше враховує ключові обмеження: мінімальну відстань між агентами для уникнення зіткнень, максимальну відстань для підтримки зв'язності, а також обмеження поля зору, яке визначає можливість взаємодії тільки між агентами в межах видимості.

Цей підхід також дозволяє спрощено аналізувати стійкість системи та краще підходить для практичного застосування, оскільки використовує

відносні вимірювання між агентами, що спрощує технічну реалізацію алгоритмів управління роєм.

У статті [5] представлена модель управління групою агентів, яка базується на вимірюванні та контролі ентропії системи. Модель передбачає два ключові режими роботи: коли значення ентропії перевищує встановлений поріг, агенти автоматично формують більш компактну групу для зниження загального рівня ентропії; після досягнення прийнятного рівня ентропії (нижче порогового значення) група агентів переходить до виконання основного завдання, спрямовуючись до поставленої мети.

Концепція ентропії, яка застосовується для взаємодіючих груп агентів, сприяє створенню ефективної системи управління їх формацією. У даному дослідженні використовується спеціальний різновид ентропійної міри, а саме ентропія Цалліса, яка дозволяє оцінювати й контролювати рівень впорядкованості рою та забезпечувати масштабованість і надійність у роботі групи агентів.

Ще одним підходом до моделювання рою є концепція холонічних мультиагентних систем (HMAS - Holonic Multi-Agent System) [6].

Холон, згідно з визначенням Артура Кестлера, є структурою, яка одночасно виступає як ціле і як частина більшого цілого. Холони можуть містити в собі інші холони, відповідаючи трьом основним принципам: стабільність, автономність і здатність до співпраці.

Ієрархічна структура холонічних мультиагентних систем дозволяє моделювати системи на різних рівнях деталізації залежно від поставлених цілей або доступних обчислювальних ресурсів. Така ієрархія, яка складається з вкладених один в одного холонів, називається холархією і забезпечує гнучкість та адаптивність моделювання.

Цікаве застосування теорії хаосу описано у статті [7]. Дослідження було проведено в рамках проекту ASIMUT (Aid to Situation Management based on MUltimodal, MUltiUAVs, MUltilevel acquisition Techniques), що підтримується Європейським оборонним агентством (EDA - European Defence Agency).

Проект ASIMUT використовує ієрархічну структуру рою, що складається з двох рівнів координації: рою вищого рівня координації (HLCS - High Level Coordination Swarm), який відповідає за загальне управління роєм, та рою нижчого рівня (LLCS - Low Level Coordination Swarm), що виконує локальні завдання, такі як спостереження і збір інформації.

Автори статті [7] мали на меті зробити рух дронів непередбачуваним для потенційного противника, тому для моделювання були використані хаотичні динамічні моделі, які забезпечують складність прогнозування траєкторій.

У дослідженні було використано три основні моделі:

- MAMM (Ma Mobility Model): базова модель, яка продемонструвала низьку ефективність через повторювані петлі та часті повороти в траєкторіях дронів.
- MAMM2: вдосконалена версія MAMM із модифікованим розподілом поворотів, що дозволило зменшити кількість різких маневрів і поліпшити плавність руху.
- CROMM (Chaotic Rössler Mobility Model): найефективніша модель, заснована на системі Рьосслера, яка була інтегрована з хаотичним алгоритмом мурашиної колонії (CACO — Chaotic Ant Colony Optimization).

Ці моделі забезпечують непередбачуваність руху дронів, що значно ускладнює їх прогнозування потенційним противником. Особливо модель CROMM, завдяки поєднанню хаотичних траєкторій із оптимізаційними алгоритмами, демонструє високу ефективність у контексті військових і розвідувальних операцій.

Висновки. Проведений аналіз показав, що вибір моделі ройового інтелекту для подальших досліджень залежить від специфіки задачі. Індивідуально-орієнтовані моделі підходять для детального моделювання взаємодій між агентами, тоді як континуальні моделі краще описують глобальну динаміку великих роїв. Графові моделі ефективні для врахування зв'язності та взаємодій між агентами, а ентропійні підходи забезпечують адаптацію форми рою до динамічних змін середовища. Хаотичні моделі, наприклад CROMM, демонструють високу ефективність там, де потрібна непередбачуваність руху.

Таким чином, вибір моделі має здійснюватися з урахуванням вимог до системи та її функціональних характеристик. У багатьох випадках оптимальним рішенням є використання гібридних моделей, які інтегрують переваги різних підходів для досягнення високої ефективності, адаптивності та точності.

ЛІТЕРАТУРА

1. Military Drone Market Size, Share & Russia-Ukraine War Impact Analysis. Forecast, 2024-2032 URL: <https://www.fortunebusinessinsights.com/military-drone-market-102181> (дата звернення 23.12.2024)
2. Veysel Gazi, Kevin M. Passino (The Ohio State University, 2002) - Stability analysis of swarms. URL: https://www.researchgate.net/publication/3031441_Stability_analysis_of_swarms (дата звернення: 20.12.2024).
3. Kristina Lerman, Aram Galstyan, Tad Hogg (USC Information Sciences Institute, Hewlett-Packard - 2004 Labs) - Mathematical Analysis of Multi-Agent Systems URL: https://www.researchgate.net/publication/1957056_Mathematical_Analysis_of_Multi-Agent_Systems (дата звернення: 20.12.2024)
4. Esteban Restrepo(Automatic. Université Paris-Saclay, 2021) - Coordination control of autonomous robotic multi-agent systems under constraints. URL: <https://theses.hal.science/tel-03537341v1> (дата звернення: 20.12.2024)
5. Luke Fina, Douglas Shane Smith, Jr., Jason Carnahan and Hakki Erhan Sevil (Mechanical Engineering, Intelligent Systems & Robotics, University of West Florida; I3, Huntsville - 2022) - Entropy-Based Distributed Behavior Modeling for Multi-Agent UAVs. URL: <https://www.mdpi.com/2504-446X/6/7/164> (дата звернення: 25.01.2025)
6. Igor Tchappi, Jean Etienne Ndamlabin Mboula, Amro Najjar, Yazan Mualla, Stephane Galland (University of Luxembourg, Inria Nancy – Grand Est, Luxembourg Institute of Science and Technology, Univ. Bourgogne-Franche-Comté - 2022) URL: https://www.researchgate.net/publication/360670873_A_Decentralized_Multilevel_Agent_Based_Explained_Model_for_Fleet_Management_of_Remote_Drones(дата звернення 26.01.2025)
7. Martin Rosalie, Grégoire Danoy, Serge Chaumette, Pascal Bouvry (University of Luxembourg, University of Bordeaux - 2019) Chaos-enhanced mobility models. URL: <https://hal.science/hal-01699298/file/asimut.pdf> (дата звернення: 28.01.2025)

COMPARATIVE ANALYSIS OF PROMISING MODELS OF SWARM INTELLIGENCE

Kupin Andrey, Kosei Maksym

Abstract. *This study is focused on the analysis of swarm intelligence models and their role in improving multi-agent systems. The paper examines key scientific achievements in this field and outlines trends in expanding the scope of their practical application.*

Keywords: *artificial intelligence, intelligent agent, multi-agent systems, swarm intelligence, swarm intelligence optimization algorithms, machine learning models, ML.*

REFERENCES

1. Military Drone Market Size, Share & Russia-Ukraine War Impact Analysis. Forecast, 2024-2032 URL: <https://www.fortunebusinessinsights.com/military-drone-market-102181> (дата звернення 23.12.2024)
2. Veysel Gazi, Kevin M. Passino (The Ohio State University, 2002) - Stability analysis of swarms. URL: https://www.researchgate.net/publication/3031441_Stability_analysis_of_swarms (дата звернення: 20.12.2024).
3. Kristina Lerman, Aram Galstyan, Tad Hogg (USC Information Sciences Institute, Hewlett-Packard - 2004 Labs) - Mathematical Analysis of Multi-Agent Systems URL: https://www.researchgate.net/publication/1957056_Mathematical_Analysis_of_Multi-Agent_Systems (дата звернення: 20.12.2024)
4. Esteban Restrepo(Automatic. Université Paris-Saclay, 2021) - Coordination control of autonomous robotic multi-agent systems under constraints. URL: <https://theses.hal.science/tel-03537341v1> (дата звернення: 20.12.2024)
5. Luke Fina, Douglas Shane Smith, Jr., Jason Carnahan and Hakki Erhan Sevil (Mechanical Engineering, Intelligent Systems & Robotics, University of West Florida; I3, Huntsville - 2022) - Entropy-Based Distributed Behavior Modeling for Multi-Agent UAVs. URL: <https://www.mdpi.com/2504-446X/6/7/164> (дата звернення: 25.01.2025)
6. Igor Tchappi, Jean Etienne Ndamlabi Mboula, Amro Najjar, Yazan Mualla, Stephane Galland (University of Luxembourg, Inria Nancy – Grand Est, Luxembourg Institute of Science and Technology, Univ. Bourgogne-Franche-Comté - 2022) URL: https://www.researchgate.net/publication/360670873_A_Decentralized_Multilevel_Agent_Based_Explained_Model_for_Fleet_Management_of_Remote_Drones(дата звернення 26.01.2025)
7. Martin Rosalie, Grégoire Danoy, Serge Chaumette, Pascal Bouvry (University of Luxembourg, University of Bordeaux - 2019) Chaos-enhanced mobility models. URL: <https://hal.science/hal-01699298/file/asimut.pdf> (дата звернення: 28.01.2025)

СТВОРЕННЯ БЕЗСЕРВЕРНИХ SERVERLESS ВЕБ-ДОДАТКІВ НА ПЛАТФОРМІ AZURE FUNCTIONS З ВИКОРИСТАННЯМ .NET

Карасношاپка Н.С.¹, Селівьорстова Т.В.²

¹Український державний університет науки і технологій, аспірант, Україна

²Український державний університет науки і технологій, к.т.н., доцент, Україна

Анотація. У дослідженні розглядаються переваги використання безсерверної архітектури на базі Azure Functions у поєднанні з технологіями .NET для створення сучасних веб-додатків. Проаналізовано обмеження традиційних підходів до розробки, зокрема складність масштабування, витрати на інфраструктуру та обмежену гнучкість. Проведено огляд актуальних наукових публікацій щодо застосування безсерверних технологій та особливостей інтеграції Azure Functions з іншими сервісами Azure. Експериментальне дослідження показало, що використання Azure Functions сприяє скороченню часу розробки, підвищенню надійності та гнучкості додатків. У роботі наголошено на важливості безпеки, авторизації та правильного вибору архітектурних рішень. Запропоновано напрями подальших досліджень, пов'язані з інтеграцією безсерверних рішень у сферах IoT, Big Data та Machine Learning.

Ключові слова: безсерверна архітектура, Azure Functions, .NET, веб-додатки, автоматичне масштабування, інтеграція сервісів Azure, хмарні технології.

Вступ. У сучасній розробці програмного забезпечення важливою тенденцією є перехід до безсерверних (Serverless) архітектур, які дозволяють розробникам зосередитися на створенні функціональності застосунків без необхідності керувати інфраструктурою серверів. Використання платформ на зразок Azure Functions із підтримкою .NET відкриває нові можливості для швидкої, гнучкої та економічно ефективної веб-розробки. Завдяки автоматичному масштабуванню ресурсів, високій продуктивності та простоті інтеграції з іншими сервісами Azure, безсерверний підхід стає дедалі популярнішим серед full-stack .NET-розробників.

Постановка проблеми. Традиційні моделі веб-розробки часто супроводжуються складністю керування інфраструктурою, високими витратами на підтримку серверів і складністю масштабування додатків у відповідь на зміну навантаження. Розробники стикаються з проблемами швидкості розгортання, надмірними витратами на невикористані ресурси та

складністю забезпечення високої доступності додатків. Саме тому постає потреба у використанні безсерверних технологій, таких як Azure Functions, для створення гнучких, масштабованих і економічно ефективних веб-додатків.

Основною метою дослідження є аналіз можливостей Azure Functions для створення веб-додатків з використанням технологій .NET, оцінка їх переваг порівняно з традиційними серверами та визначення найкращих практик використання безсерверних архітектур.

Огляд літератури. В роботі проаналізовано сучасні дослідження та публікації щодо використання безсерверних архітектур у веб-розробці. Особливу увагу приділено роботам, що висвітлюють переваги Azure Functions, їх інтеграцію з .NET, а також питання продуктивності, масштабування та безпеки. Дослідження показують, що безсерверні рішення забезпечують значне скорочення часу на розробку, зменшення витрат на підтримку та підвищення надійності веб-додатків.

Дослідження. У ході дослідження було виконано аналіз технології Azure Functions у контексті створення веб-додатків з використанням .NET. Особливу увагу приділено вивченню механізмів автоматичного масштабування, особливостей інтеграції з іншими сервісами Azure (наприклад, Azure Storage, Cosmos DB, Service Bus) та можливостей забезпечення безпеки і авторизації через Azure Active Directory. Було реалізовано експериментальний додаток для практичної перевірки переваг і обмежень цієї технології.

Аналіз та результати. Результати дослідження продемонстрували, що використання Azure Functions та платформи .NET дозволяє значно скоротити час на розробку і розгортання веб-додатків, а також підвищити їх доступність завдяки автоматичному масштабуванню. Було виявлено, що інтеграція Azure Functions з іншими сервісами Azure забезпечує гнучкість архітектури та простоту управління ресурсами. Водночас, дослідження вказало на важливість правильного вибору підходів до безпеки та авторизації для забезпечення захисту додатків.

Висновки. Azure Functions у поєднанні з .NET надають ефективний інструмент для створення сучасних веб-додатків у безсерверній архітектурі. Це

дозволяє розробникам сконцентруватися на створенні доданої вартості застосунків, мінімізувати витрати на інфраструктуру та забезпечити автоматичне масштабування залежно від навантаження.

Перспективи подальших досліджень. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на поглиблене вивчення питань безпеки, оптимізації витрат у хмарі та аналіз сценаріїв інтеграції безсерверних рішень з іншими популярними технологіями, такими як мікросервісна архітектура, DevOps та Continuous Integration/Continuous Deployment (CI/CD). Також перспективними є дослідження використання Azure Functions для спеціалізованих доменів, таких як IoT, Big Data та Machine Learning, що дозволить розширити застосування безсерверних технологій у різних сферах.

ЛІТЕРАТУРА / REFERENCE

1. Lynn Langit, "Learning Azure Functions: Building Serverless Solutions," O'Reilly Media, 2021.
2. M. Collier, R. Shahan, "Microsoft Azure Essentials: Fundamentals of Azure," Microsoft Press, 2020.
3. Jeff Hollan, "Serverless Computing in Azure with .NET: Build, deploy, and manage scalable applications using Azure Functions," Packt Publishing, 2021.
4. Boris Scholl, Trent Swanson, Peter Jausovec, "Serverless Applications with Azure," Manning Publications, 2020.
5. Microsoft Documentation: Azure Functions official documentation, 2024. URL: <https://docs.microsoft.com/azure/azure-functions/>

DEVELOPMENT OF SERVERLESS WEB APPLICATIONS ON THE AZURE FUNCTIONS PLATFORM USING .NET

Nykyta Krasnoshapka, Tetiana Seliviorstova

Abstract. *The study examines the advantages of using a serverless architecture based on Azure Functions in combination with .NET technologies to create modern web applications. The limitations of traditional development approaches are analysed, including the complexity of scaling, infrastructure costs and limited flexibility. A review of relevant scientific publications on the use of serverless technologies and the features of Azure Functions integration with other Azure services was conducted. An experimental study has shown that the use of Azure Functions helps to reduce development time, increase the reliability and flexibility of applications. The paper emphasises the importance of security, authorisation and the correct choice of architectural solutions. The paper suggests areas for further research related to the integration of serverless solutions in the areas of IoT, Big Data, and Machine Learning.*

Keywords: *serverless architecture, Azure Functions, .NET, web applications, automatic scaling, integration of Azure services, cloud technologies.*

**ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ ПОШУКУ СЕГМЕНТІВ ПАМ'ЯТІ: МАТЕМАТИЧНЕ
МОДЕЛЮВАННЯ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ОЦІНКА ПОВНОТИ
ІНФОРМАЦІЙНОГО ВМІСТУ ПРИ ФІКСОВАНИХ ОБ'ЄМАХ ПАМ'ЯТІ**

Мітіков М.Ю.

Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, аспірант, Україна

Анотація. У роботі досліджено проблему надмірного використання оперативної пам'яті в програмних системах, зокрема при зберіганні даних у вигляді масивів `System.Byte[]`. В умовах обмежених ресурсів і високих навантажень постає необхідність ефективного використання доступної пам'яті без залучення додаткових обчислювальних потужностей. Запропоновано математичну модель, що базується на аналізі знімків пам'яті, та методику визначення масивів з низькою щільністю інформації, які є кандидатами на стиснення. Для зменшення обсягу зайнятої пам'яті використано алгоритм LZ4, що забезпечує збереження інформаційного вмісту при зменшенні фізичного розміру масивів. Дослідження реалізовано на платформі .NET із використанням бібліотеки `ClrMD` для програмного аналізу знімків пам'яті. Проведено серію експериментів на знімках промислових систем, які підтвердили ефективність запропонованого підходу: зменшення обсягу пам'яті до 45% для окремих масивів без втрати даних. Результати свідчать про доцільність впровадження подібних рішень для підвищення продуктивності систем і скорочення витрат на інфраструктуру. Науковий внесок полягає в розробці нової метрики оцінки ефективності стиснення та рекомендаційної системи для виявлення надмірного споживання пам'яті в керованих середовищах виконання.

Ключові слова: оптимізація пам'яті, алгоритми стиснення, масив байтів (`byte[]`), знімок пам'яті, надмірне використання пам'яті, математичне моделювання, `ClrMD`, LZ4, управління ресурсами, високонавантажені системи.

Вступ. Зростання обсягів даних і вимог до продуктивності спричиняє актуальність оптимізації використання оперативної пам'яті в програмних системах. Більшість досліджень зосереджуються на виявленні витоків пам'яті, тоді як проблема надмірного, але формально допустимого споживання залишається недостатньо дослідженою. Зокрема, масиви `System.Byte[]`, які зберігають інформацію у вигляді повторюваних значень, можуть займати значний обсяг пам'яті.

Мета роботи – розробити математично обґрунтований підхід до оптимізації використання оперативної пам'яті в програмних системах шляхом

виявлення та стиснення об'єктів типу System.Byte[], зберігаючи повноту інформаційного вмісту. Практична цінність математичної моделі полягає в можливості створення інформаційної системи, яка на основі аналізу знімків пам'яті дозволяє оцінити потенціал зменшення споживання пам'яті без масштабування інфраструктури, шляхом застосування ефективних алгоритмів стиснення (зокрема, LZ4).

Постановка проблеми. Традиційні моделі веб-розробки часто супроводжуються складністю керування інфраструктурою, високими витратами на підтримку серверів і складністю масштабування додатків у відповідь на зміну навантаження. Розробники стикаються з проблемами швидкості розгортання, надмірними витратами на невикористані ресурси та складністю забезпечення високої доступності додатків. Саме тому постає потреба у використанні безсерверних технологій, таких як Azure Functions, для створення гнучких, масштабованих і економічно ефективних веб-додатків.

Основною метою дослідження є аналіз можливостей Azure Functions для створення веб-додатків з використанням технологій .NET, оцінка їх переваг порівняно з традиційними серверами та визначення найкращих практик використання безсерверних архітектур.

Огляд літератури. В роботі проаналізовано сучасні дослідження та публікації щодо використання безсерверних архітектур у веб-розробці. Особливу увагу приділено роботам, що висвітлюють переваги Azure Functions, їх інтеграцію з .NET, а також питання продуктивності, масштабування та безпеки. Дослідження показують, що безсерверні рішення забезпечують значне скорочення часу на розробку, зменшення витрат на підтримку та підвищення надійності веб-додатків.

Дослідження. У ході дослідження було виконано аналіз технології Azure Functions у контексті створення веб-додатків з використанням .NET. Особливу увагу приділено вивченню механізмів автоматичного масштабування, особливостей інтеграції з іншими сервісами Azure (наприклад, Azure Storage, Cosmos DB, Service Bus) та можливостей забезпечення безпеки і авторизації

через Azure Active Directory. Було реалізовано експериментальний додаток для практичної перевірки переваг і обмежень цієї технології.

Аналіз та результати. Результати дослідження продемонстрували, що використання Azure Functions та платформи .NET дозволяє значно скоротити час на розробку і розгортання веб-додатків, а також підвищити їх доступність завдяки автоматичному масштабуванню. Було виявлено, що інтеграція Azure Functions з іншими сервісами Azure забезпечує гнучкість архітектури та простоту управління ресурсами. Водночас, дослідження вказало на важливість правильного вибору підходів до безпеки та авторизації для забезпечення захисту додатків.

Висновки. Azure Functions у поєднанні з .NET надають ефективний інструмент для створення сучасних веб-додатків у безсерверній архітектурі. Це дозволяє розробникам сконцентруватися на створенні доданої вартості застосунків, мінімізувати витрати на інфраструктуру та забезпечити автоматичне масштабування залежно від навантаження.

Перспективи подальших досліджень. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на поглиблене вивчення питань безпеки, оптимізації витрат у хмарі та аналіз сценаріїв інтеграції безсерверних рішень з іншими популярними технологіями, такими як мікросервісна архітектура, DevOps та Continuous Integration/Continuous Deployment (CI/CD). Також перспективними є дослідження використання Azure Functions для спеціалізованих доменів, таких як IoT, Big Data та Machine Learning, що дозволить розширити застосування безсерверних технологій у різних сферах.

ЛІТЕРАТУРА / REFERENCE

1. Gregg, B. (2021). Scaling solutions (Sec. 2.7.3, p. 929). In Systems Performance (2nd ed.). Boston, MA: Addison-Wesley.
2. Bentley, J. L. (1982). Writing efficient programs. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.
3. Efficiently and precisely locating memory leaks and bloat. Gene Novark, Emery D. Berger, Benjamin G. Zorn. Dublin : Proceedings of the 30th ACM SIGPLAN Conference on Programming Language Design and Implementation, 2009. 978-1-60558-392-1.
4. Analyzing Data Structure Growth Over Time to Facilitate Memory Leak Detection. Weninger, Markus. Mumbai : Association for Computing Machinery, 2019. 978-1-4503-6239-9.

5. Understanding and Combating Memory Bloat in Managed. Khanh Nguyen, Kai Wang, Yingyi Bu, Lu Fang, and Guoqing Xu. 4, University of California, Irvine : Athens Information Technology, 2018 p., T. 26. <https://doi.org/10.1145/3162626>.
6. Lee, S. (2015). Mitigating the performance impact of memory bloat [Doctoral dissertation, Georgia Institute of Technology]. Georgia Tech Institutional Repository. <http://hdl.handle.net/1853/56174>
7. Xia, Q., Ji, H., Zhou, Y., & Kim, N. S. (2025). Hardware-accelerated kernel-space memory compression using Intel QAT. IEEE Computer Architecture Letters, 24(1), 57–60. <https://doi.org/10.1109/LCA.2025.3534831>
8. Tsai, P.-A., & Sánchez, D. (2019, April). Compress objects, not cache lines: An object-based compressed memory hierarchy. In Proceedings of the Twenty-Fourth International Conference on Architectural Support for Programming Languages and Operating Systems (ASPLOS 2019) (pp. 229–242). Association for Computing Machinery. <https://doi.org/10.1145/3297858.330400>
9. Mitikov, N. Y., & Guk, N. A. (2023). Identification of problems in software operation based on the analysis of memory snapshots. Issues of applied mathematics and mathematical modelling, (18), 171–178. <https://doi.org/10.15421/322318> [Ukrainian]
10. Lou, C., Chen, C., Huang, P., Dang, Y., Qin, S., Yang, X., Li, X., Lin, Q., & Chintalapati, M. (2022, July). RESIN: A holistic service for dealing with memory leaks in production cloud infrastructure. In M. K. Aguilera & H. Weatherspoon (Eds.), Proceedings of the 16th USENIX Symposium on Operating Systems Design and Implementation (OSDI '22) (pp. 109–125). USENIX Association. ISBN 978-1-939133-28-1
11. Ioannis T. Christou, Sofoklis Efremidis. To Pool or Not To Pool? Revisiting an Old Pattern. Marousi : Athens Information Technology, 2018. arXiv:1801.03763.

**OPTIMISATION OF THE PROCESS OF SEARCHING FOR MEMORY SEGMENTS:
MATHEMATICAL MODELLING AND EXPERIMENTAL EVALUATION OF THE
COMPLETENESS OF INFORMATION CONTENT WITH FIXED
MEMORY VOLUMES**

Mitikov Nikolay

Abstract. *The paper investigates the problem of excessive use of RAM in software systems, in particular when storing data in the form of System.Byte[] arrays. In conditions of limited resources and high loads, there is a need for efficient use of available memory without involving additional computing power. The paper proposes a mathematical model based on the analysis of memory snapshots and a methodology for determining arrays with low information density that are candidates for compression. To reduce the amount of memory occupied, the LZ4 algorithm is used, which ensures the preservation of information content while reducing the physical size of arrays. The study was implemented on the .NET platform using the ClrMD library for software analysis of memory snapshots. A series of experiments on snapshots of industrial systems have been*

conducted to confirm the effectiveness of the proposed approach: reducing the memory size by up to 45% for individual arrays without data loss. The results indicate the feasibility of implementing such solutions to improve system performance and reduce infrastructure costs. The scientific contribution is the development of a new metric for evaluating compression efficiency and a recommendation system for detecting excessive memory consumption in managed runtime environments.

Keywords: *memory optimisation, compression algorithms, byte[] array, memory snapshot, excessive memory usage, mathematical modelling, ClrMD, LZ4, resource management, high-load systems.*

Секція 1 Системний аналіз і синтез процесів у металургії та машинобудуванні	
Section 1 System analysis and synthesis of processes in metallurgy and mechanical engineering.....	3
Adjamsky S.V., Balakhanova T.V., Baranovskaya O.E., Podolskyi R.V. Features of formation of the “key hole” disintegrity defect in lpb technology Аджамський С.В., Балаханова Т.В., Барановська О.Є., Подольський Р.В. Особливості формування дефекту несущільності «key hole» в lpb-технології.....	4
Babachenko O.I., Kononenko G.A., Podolsky R.V., Safronova O.A. Study of the kinetics of fatigue destruction of railway wheel metal with different strength levels using the correlation analysis method. Бабаченко О.І., Кононенко Г.А., Подольський Р.В., Сафронова О.А. Дослідження кінетики втомного руйнування металу залізничних коліс з різними рівнями міцності методом кореляційного аналізу	9
Serhii Bobyr, Eduard Parusov, Ihor Chuiko, Olena Baranovs'ka Influence of deep cryogenic treatment on the change in wearresistance of high-carbon alloy tool steels Бобирь С. В., Парусов Е. В., Чуйко І.М., Барановська О. Є. Вплив криогенного оброблення на зміну зносостійкості високовуглецевих легованих сталей інструментального призначення	14
Serhii Bushtruk, Tetiana Myronova Influence of structural defects in products made from als10mg alloy by pbf-lb/m additive technology on the final mechanical properties Буштрук С.І., Миронова Т.М. Вплив дефектів будови в виробах зі сплаву als10mg, виготовлених за адитивною технологією pbf-lb/m на кінцеві механічні властивості	21
Hrechanyi Oleksii, Vasilchenko Tetyana, Vernydub Mykhailo, Dernovyi Oleksandr The role of cad in the development of engineering solutions for the metallurgical industry Гречаний О.М., Васильченко Т.О., Вернидуб М.В., Дерновий О.О. Роль сапр у розробці інженерних рішень для металургійної галузі.....	28
Hrechukhyn A., Mianovska Y., Kamkina L. Features of the technology of melting and deoxidation of manganese steel Гречухин А.А., Мянновська Я.В., Камкіна Л.В. Особливості технології виплавки і розкислення марганцовистої сталі	35
Yegorov O. P., Mykhailovsky M. V., Rybalchenko M. O. Systematic analysis of invariance of separate control cuts of high-speed rolling with a loop on continuous small section mill Єгоров О. П., Михайловський М. В., Рибальченко М. О. Системний аналіз інваріантності сепаратних контурів керування швидкісним режимом прокатки з петлею на неперервних дрібносортних станах.....	44
Isaiev A., Kramar I., Kamkina L., Mianovska Y. The importance of coke quality in a submerged arc electric furnace for the production of ferroalloys Ісаєв А.С., Крамар І.А., Мянновська Я.В., Камкіна Л.В. Значення якості коксу в електричній печі з зануреною дугою для виробництва феросплавів ...	48

Tetiana Kimstach, Kostiantyn Uzlov, Sergei Repyakh, Oleksandr Bilyi Determination of the preferential method of manufacturing products from metals and alloys Кімстач Т.В., Узлов К.І., Реп'ях С.І., Білий О.П. Визначення приференційного способу виготовлення виробів з металів і сплавів	56
Kononenko G.A., Kimstach T.V., Podolskyi R.V., Safronova O.A. Modern technological schemes for the production of economically alloyed steels for sheet rolling Кононенко Г.А., Кімстач Т.В., Подольський Р.В., Сафронова О.А. Сучасні технологічних схеми виготовлення економнолегованих сталей для листового прокату	62
Kornilov B.V., Chaika O.L., Moskalyna A.O., Dzhygota M.G. Analysis of opportunities for reducing CO ₂ emissions in blast furnace production Корнілов Б.В., Чайка О.Л., Москалина А.О., Чайка А.О. Аналіз можливостей зменшення викидів CO ₂ в доменному виробництві	67
Liudmyla Ivanova, Yevhen Kolotylo, Andrii Bilyi, Vladyslav Shemet Study of the effect of double annealing on the quality of spheroidal graphite cast irons Іванова Л.Х., Хитько О.Ю., Білий А.П., Шемет В.Ю. Дослідження впливу подвійного відпалу на якість валкових чавунів з кулястим графітом	73
Oleksii Serhieiev Application of a genetic algorithm to solve the location-activation problem Сергеев О.С. Застосування генетичного алгоритма до розв'язання задачі розміщення-активації	79
Petryna D.Yu., Harun V.R., Petryk I.Ya. The problem of renovation of long-term operation technical equipment of industrial enterprises Петрина Д.Ю., Харун В.Р., Петрик І.Я. Проблема реновації технічного обладнання промислових підприємств довготривалої експлуатації	85
Povorotnya I.R., Safronova O.A., Podolskyi R.V., Kononenko G.A. Optimization of the chemical composition of os steel to increase hardness Поворотня І.Р., Сафронова О.А., Подольський Р.В., Кононенко Г.А. Оптимізація хімічного складу сталі марки ос для підвищення твердості.....	91
Pavlo Sazonov , Svitlana Klymenko Improvement of the methodology for ultrasonic non-destructive testing application Сазонов П.О., Клименко С.В. Вдосконалення методології застосування ультразвукового неруйнівного контролю	96
Viktor Strelbitskyi Study of operational reliability of portal cranes “GANZ” 5-30 Стрельбіцький Віктор Дослідження експлуатаційної надійності порталних кранів «ГАНЦ» 5-30	101

Chumak D., Kamkina L., Mianovska Y. Characteristics of shungite rock for use in alloy production processes Чумак Д.Д., Камкіна Л.В., Мянєвська Я.В. Характеристика шунгітових порід для використання в процесах одержання сплавів	105
Oleksandr Yaichuk, Viktor Povorotnii Research on journal bearings: design solutions and finite element analysis Яйчук О.О., Поворотний В.В. Дослідження підшипників ковзання: конструкційні рішення та аналіз методом кінцевих елементів	115
Avtonomov D.V., Kamkin V.Yu., Togobytska D.M., Mianovska Ya.V. Simulation of the influence of slag composition on hydrogen access to metal Автономов Д.В., Камкін В.Ю., Тогобицька Д.М., Мянєвська Я.В. Моделювання впливу складу шлаку на надходження водню в метал	119
Olshansky O.V., Panov O.O., Ankudinov R.V., Myanovska Ya.V. Use of finely dispersed manganese concentrates in metallurgical Ольшанський О.В., Панов О.О., Анкудінов Р.В., Мянєвська Я.В. Використання дрібнодисперсних марганцевих концентратів в металургійних процесах	125
Секція 2 Інформаційні технології в процесах одержання матеріалів із заданими властивостями Section 2 Information technologies in the processes of obtaining materials with specified properties	132
Zinchenko M. D., Potap O. Y., Burchak A. A., Mykhailovsky M. V. Research of the cutting process of rolled section steel on rail-beam and large-size rolling mills Зінченко М. Д., Потап О. Ю., Бурчак А. А., Михайловський М. В. Дослідження процесу різання сортового прокату на рейкобалочних та великосортних станах	133
Likhosha M.L., Boiarkin V.V. Improvement of cooling regimes for the formation of mechanical properties of hot-rolled sheets Ліхоша М.Л., Бояркін В.В. Вдосконалення режимів охолодження для формування механічних властивостей гарячекатаних листів	138
V.I. Liubushkin, O.B. Zagorodny, V.Yu. Bozhanova, A.V. Liubushkina, O.Ye. Kononova. Physico-mechanical properties of ceramic materials and coatings obtained by plasma spraying: quality management aspects Любушкін Валерій, Загородній Олексій, Божанова Вікторія, Любушкіна Анастасія, Кононова Олександра Фізико-механічні властивості керамічних матеріалів і покриттів отриманих плазменним напыленням: аспекти менеджменту якості	142

Eduard Oliinyk, Eduard Parusov, Ihor Chuiko, Oleh Kuksa Features of the influence of chemical composition on the formation of mechanical properties in low-carbon Cr-Mo-V welding steels Олійник Е.В., Парусов Е.В., Чуйко І.М., Кукса О.В. Особливості впливу хімічного складу на формування механічних властивостей низьковуглецевих Cr-Mo-V сталей зварювального призначення	148
Togobitska Daria, Povorotnia Iryna, Likhachev Yury, Nadiya Khodotova Databases and model bases – the fundamental basis for the development of new technological solutions in the production of quality steels Тогобицька Д.М., Поворотня І.Р., Ліхачов Ю.М., Ходотова Н.Є. Бази даних та бази моделей – фундаментальне підґрунтя для розробки нових технологічних рішень при виробництві якісних сталей	155
Frolov Y.V., Bobukh O.S., Boiarkin V.V., Konovodov D.V. Kirigami inspired solid-state alloying (KISA) method of creation of functionally graded materials Фролов Я.В., Бобух О.С., Бояркін В.В., Коноводов Д.В. Твердотільне легування на основі кірігамі-структур (ТЛКС) для створення функціональних матеріалів	161
Секція 3 Математичне моделювання та проектування складних систем Section 3 Mathematical modeling and design of complex systems	166
Oleksandr Movchan Advanced damage-plasticity modelling and calibration strategies for accurate finite-element analysis of unreinforced concrete in thin-walled structures Мовчан О.Ю. Удосконалені моделі пластичності з урахуванням руйнування та стратегії калібрування для точного скінченно-елементного аналізу бетону без армування у тонкостінних конструкціях	167
Panasenko Y. S ., Belozyorov V. Superior classification of eeg states using recurrence quantification analysis Панасенко Єгор, Білозьоров Василь Покращена класифікація станів еег за допомогою рекуррентного кількісного аналізу	172
Baraban Oleh Dmytrovych, Polyakov Mykhailo Oleksiiiovych, Vasilevskyi V.V. The effect of a high-intensity electric field on the aging of cellulose insulation of a power transformer in the FEMM software package Барабан Олег Дмитрович, Поляков Михайло Олексійович, Василевський В.В. Вплив електричного поля високої напруженості на старіння целюлозної ізоляції силового трансформатора в пакеті програм FEMM.....	177
Oleksandr Berlov, Sofiia Myhur, Olena Biliaieva Numerical modeling of the distribution of pollutants in the air Берлов О.В. , Мигур С.О., Біляєва О.М. Чисельне моделювання поширення забруднюючих речовин в повітрі.....	185

Mykola Biliaiev, Pavlo Kirichenko, Larysa Tatarko Mathematical modeling of air pollution at mining and industrial complex facilities Біляєв М.М., Кіріченко П.С., Татарко Л.Г. Математичне моделювання забруднення повітря на об'єктах гірничо-промислового комплексу	189
Rovshan Gasanov, Oleksandr Ivanov Adaptive data stream thinning in remote monitoring systems for transport infrastructure Гасанов Р.З., Іванов О.П. Адаптивне проріджування потоку даних у системах дистанційного моніторингу об'єктів транспортної інфраструктури.	193
Hnylytsia I. D., Hrushetskyi M.V. Model of the influence of the stress state on the strain rate curve during high-temperature deformation of silicon nitride-based ceramics Гнилиця І.Д., Грушецький М.В. Модель впливу напруженого стану на криву швидкості деформації при високотемпературній деформації кераміки на основі нітриду кремнію	199
Golub T.S., Molchanov L.S., Minai O.M. Verification of the results of numerical modeling of gas jets outflow from a cylindrical nozzle using shadow photography methods Голуб Т.С., Молчанов Л.С., Мінай О.М. Верифікація результатів чисельного моделювання витікання газових струменів з циліндричного сопла за допомогою методів тіньової зйомки	204
Hryhorovych Mykyta Detecting flat roof defects with machine learning and deep learning techniques Григорович М.С. Виявлення дефектів плоских покрівель за допомогою методів машинного навчання та глибокого навчання.....	211
Artem Zhadan, Viktor Shynkarenko Implementing distributed genetic algorithm workflow with channels and message processing nodes Жадан А. А., Шинкаренко В.І. Реалізація розподіленого процесу роботи генетичного алгоритму шляхом впровадження каналів та вузлів обробки повідомлень	215
Zhulkovskyi O.O., Zhulkovska I.I., Vokhmianin H.Ya. Using dlp to optimize computer models in SCADA systems Жульковський О.О., Жульковська І.І., Вохмянін Г.Я. Використання dlp для оптимізації комп'ютерних моделей у SCADA-системах	220
Andrii Zavhorodnii, Oleksandr Ivanov Modern trends and challenges in debugging software based on large language models Завгородній А.Д., Іванов О.П. Сучасні тенденції та проблеми налагодження програмного забезпечення на базі великих мовних моделей	224

Olha Zinovieva Artificial intelligence in systems simulation Зінов'єва О.Г. Штучний інтелект в імітаційному моделюванні систем	230
Andrii Zinchenko, Dmytro Redchyts On development of hybrid computational meshes for numerical simulation of turbulent flows in the flow part of centrifugal fans Зінченко А.В., Редчиць Д.О. До питання побудови гібридних розрахункових сіток для чисельного моделювання турбулентних течій у проточній частині радіальних вентиляторів	235
O. Inkin, V. Belozyorov Long short-term memory model with the external trend and internal components analysis Інкін О. А., Білозьоров В. Є. Модель довгострокової короткострокової пам'яті з врахуванням зовнішнього тенденційного та внутрішнього компонентного аналізу	241
Dmytro Karpovskiy, Viktor Shynkarenko Using ontologies in texts annotation Карповський Д.О., Шинкаренко В.І. Онтології на основі анованих текстів	247
V.G. Kislyakov, V.I. Yelisieiev, V.P. Petrusha Studying the regularities of the process of injecting a mixture of reagents Кисляков В.Г., Єлісєєв В.І., Петруша В.П. Дослідження закономірностей процесу інжектування суміші реагентів	252
Klymenko I.V., Lebid Y.A. Comparative analysis of time efficiency of substring search algorithms Клименко І.В., Лебідь Є.А. Порівняльний аналіз часової ефективності алгоритмів пошуку підрядка	256
Klymenko O. D. Research on the homogeneity of pseudo-random samples using anderson's criterion and its analogs Клименко О. Д. Дослідження однорідності псевдовипадкових вибірок критеріями андерсона та його аналогами	262
Kononov D.O., Tsikolia A.Z., Atamanchuk R. P. Mathematical model of the movement of bulk material along the working body of a vibrating feeder with an arbitrary cross-sectional shape Кононов Д.О., Ціколія А.З., Атаманчук Р. П. Математична модель руху сипучого матеріалу по робочому органу вібраційного живильника з довільною формою поперечного перерізу	266
Anatolii Kosolap Optimal location of service centers Косолап А.І. Оптимальне розташування сервісних центрів	274

Oleksii Kuropiatnyk Use of computer algebra systems for simulating the ropeways drives dynamics Куруп'ятник О. С. Використання систем комп'ютерної алгебри для моделювання динаміки приводів канатних доріг	278
Oleksandr Letuchyi, Viktor Shynkarenko Graph fractals with the variability of the formation process Летучий О. І. , Шинкаренко В. І. Експериментальна обчислювальна складність формування графових фракталів на основі кристалічних ґраток	284
Lomonosov Valentyn, Anisimov Volodymyr Prospects for the use of game engines for modeling the operation of industrial equipment Ломоносов В.В., Анісімов В.В. Перспективи використання ігрових рушіїв для моделювання роботи промислового обладнання	290
Lubko D.V. Development of a methodology for designing a simulation model of a grain collection and transportation complex Лубко Д.В. Розробка методології проектування імітаційної моделі зернового збирально-транспортного комплексу	293
Liakh Mykhailo, Deineha Ruslan, Mykhailiuk Vasyl, Fedorovych Yaroslav. Research of the stress-straightening state of a flange connection Лях М.М., Дейнера Р.О., Михайлюк В.В., Федорович Я.Л. Дослідження напружено-деформованого стану фланцевого з'єднання	298
Liakh Mykhailo, Fursa Roman, Protsiuk Vasyl, Mykhailiuk Vasyl. Influence of temperature on the efficiency of the gas-liquid separator Лях М.М., Фурса Р. П., Процюк В.Р., Михайлюк В. В. Вплив температури на ефективність роботи газорідного сепаратора	304
O. Makarov, V. Shynkarenko, Doctor of Engineering Sciences Construction of sorting algorithms Макаров О. В., Шинкаренко В. І. Конструювання алгоритмів сортування	311
Ivan Manachyn, Volodymyr Yelisyyev, Volodymyr Kysliakov, Mariya Rybalchenko Development of a model of the interaction process of the components of a two-phase flow introduced into cast iron during injection desulfurization Маначин І.О. , Єлісєєв В.І., Кисляков В.Г., Рибальченко М.О. Розробка моделі процесу взаємодії компонентів двофазного потоку, введенного в чавун, при інжекційній десульфурзації	317
Olena Melnykova, Oleksandr Gerasin Information and computer complex for modeling the kinematics of a manipulating robot Мельникова О.Є. , Герасін О.С. Інформаційно-обчислювальний комплекс для моделювання кінематики робота-маніпулятора	324

Myrhorod Volodymyr, Hvozdeva Iryna Mathematical description and optimization by the quadratic quality criterion of automatic control systems using pulse width modulation of signals Миргород В.Ф. , Гвоздева І.М. Математичний опис та оптимізація за квадратичним критерієм якості систем автоматичного керування із застосуванням широтно-імпульсної модуляції сигналів	330
Tetiana Nadryhailo, Yevhenii Morhun Methods and means for modeling metal refining Надригайло Т.Ж., Моргун Є.М. Методи та засоби моделювання рафінування металів	336
Panasenko Y. S., V. Belozyorov Phase space reconstruction for brain state classification by EEG signals Панасенко Єгор, Білозьоров Василь Відновлення фазового простору для класифікації станів мозку за сигналами ЕЕГ	343
Sergei Panteikov Mathematical modeling of the kinetics of reduction processes from wustite of iron and its carbonization with solid carbon Пантейков С. П. Математичне моделювання кінетики процесів відновлення з вюстити заліза і його науглецювання твердим вуглецем	347
Viktor Povorotnii, Iryna Shcherbyna, Nina Diachenko, Oleksandr Yaichuk Ways to improve the efficiency of slag bowls: analysis of materials and temperature regime Поворотній В. В., Щербина І. В., Дьяченко Н. К., Яйчук О. О. Шляхи підвищення ефективності шлакових чаш: аналіз матеріалів та температурних режимів	355
Polissky Yury On some new approaches to performing non-modular operations in the residual class system Поліський Юрій Давидович, Про деякі нові підходи до виконання немодульних операцій у системі залишкових класів	359
Polonska A. Optimization of server caching using adaptive ttl based on machine learning Полонська А.Є. Моделі та методи обробки даних агроінформації	364
Oleg B. Polevoy, Dmytro O. Redchyts Numerical simulation of the interaction of a shock wave with a supersonic laminar boundary layer in the presence of heat and mass exchange with the surface Польовий О.Б., Редчиць Д.О. Чисельне моделювання взаємодії стрибка ущільнення з надзвуковим ламінарним примежовим шаром за наявності тепломасообміну з поверхнею.....	367

Volodymyr Poshyvalov Ensuring the reliability of the ergatical system during technical maintenance В.П. Пошивалов Забезпечення надійності ергатичної системи при технічному обслуговуванні	371
Prokopchuk Yurii Some topical issues of of formalization of cognitive science Прокопчук Ю.О. Деякі актуальні питання формалізації когнітивної науки	377
Dmytro Redchyts, Andrii Zinchenko, Svitlana Moiseienko, Oksana Akimenko Numerical simulation of the laminar-turbulent transition in external aerodynamics problems Редчиць Д.О., Зінченко А.В., Моїсеєнко С.В., Акіменко О.В. Чисельне моделювання ламінарно-турбулентного переходу в задачах зовнішньої аеродинаміки	384
Taras Romanyshyn Study of the hoisting capacity of the magnetic fishing tools	392
Романишин Т. Л. Дослідження вантажопідіймальної сили магнітних ловильних пристроїв	389
Syrotkina Nataliya Petrivna, Vasyliv Stepan Stepanovych, Muzyka Lev Volodimirovich Analysis of the conditional standard of unmanned flying vehicles and filling for unmanned flying vehicles Н.П. Сироткіна, С.С. Василів, Л.В.Музика. Аналіз сучасного стану безпілотних літальних апаратів та палива для безпілотних літальних апаратів	394
Simakin S., Bozhukha L. Optimization of server caching using adaptive TTL based on machine learning Сімакін С.К., Божуха Л.М. Оптимізація серверного-кешування за допомогою адаптивного TTL на основі машинного навчання	400
Stepkin V.V, Trunov D.E Structural study of a DC motor model in MATLAB R2024a software Стьопкін В.В., Трунов Д.Є. Структурне дослідження моделі двигуна постійного струму в програмному забезпеченні MATLAB R2024a	403
Tanasienko Dmytro, Andriushchenko Vadym Processing data and generating recommendations in marketing testing Танасієнко Д.О., Андрющенко В.О. Обробка даних та генерування рекомендацій в маркетинговому тестуванні	411
Tarasov Serhii Simulation of dynamic algorithms for load distribution to wind turbine stabilization channels С.В. Тарасов, О.Н. Молотков Моделювання динамічних алгоритмів розподілу навантаження на канали стабілізації вітрової турбіни	417

Togobitska D., Belkova A. Methodology for constructing complex indicators to describe interaction processes in the "metal-slag" system during steel refining in a ladle furnace using harrington's desirability function Тогобицька Д.М., Белькова А.І. Методика побудови комплексних показників для опису процесів взаємодії у системі "металл-шлак" при доведенні сталі на У КП з використанням функції бажаності Харрінгтона.....	422
Fedotova M.O., Trushakov D.V., Skrynnik I.O., Zavoruyev R.S. Generalized methodology for synthesis of a system for automatic regulation of parameters of a complex multidimensional object Федотова М.О., Трушаков Д.В., Скриннік І.О., Заворуєв Р.С. Узагальнена методика синтезу системи автоматичного регулювання параметрів складного багатовимірного об'єкта	428
Fomenko Valerii, Chala Veronika Modeling the creative economy as a complex system: integrating sociocultural dimensions through IT-based approaches Фоменко Валерій, Чала Вероніка Моделювання креативної економіки як складної системи: інтеграція соціокультурних вимірів через ІТ підходи.....	435
Viktor KharunIgor Grabovetsky Spiral-bucket hydro turbine for micro hydropower plants Харун В.Р., Грабовецький І.І. Спірально-ківшова гідротурбіна для мікро ГЕС	440
Leonid Tsvirkun, Yurii Myronov Continuous integration process model taking into account resource consumption in a cloud environment Цвіркун Л.І. , Миронов Ю.А. , Модель процесу неперервної інтеграції з урахуванням споживання ресурсів у хмарному середовищі	445
Shapovalova S. I., Titov V. M. Tools for implementing a digital twin of a distributed computer system with energy facilities	448
Світлана Шаповалова, Тітов Владислав.....	452
Засоби реалізації цифрового двійнику розподіленої комп'ютерної системи з енергетичними об'єктами.....	452
Dmytriieva Iryna Serhiivna, Dmytrenko Andrii Mykolaiovych Review of ai methods for predicting hydrocarbon deposits from 3D seismic images Дмитрієва І.С., Дмитренко А.М. Огляд методів ші для прогнозування покладів вуглеводнів з 3D-сейсмічних зображень	454

Avrunin O.G., Selivanova K.G., Tymkovych M.Y., Nosova Y.V. International experience in the use of FLYSHAPE software for individualized three-dimensional modeling of lower limb prostheses Аврунін О.Г., Селіванова К.Г., Тимкович М.Ю., Носова Я.В. Міжнародний досвід використання програмного забезпечення FLYSHAPE для індивідуалізованого тривимірного моделювання протезів нижніх кінцівок	460
Tetiana Labutkina Simplified simulation model of a load-open packet switching network Лабуткіна Т.В. Спрощена імітаційна модель розімкненої за наваначенням мережі комутації пакетів	468
Yuliia Mala, Tatyana Selivorstova Application of decision-making methods for situation of solar power stations in Ukraine Мала Ю. А., Селівьорстова Т. В. Застосування методів прийняття рішень для вибору місця розташування станцій сонячної енергетики в Україні	474
Pilipenko Viacheslav ANALYSIS OF CAUSES AND CONSEQUENCES OF VOLTAGE SAGS IN INDUSTRIAL POWER SUPPLY SYSTEMS	480
Піліпенко В. О.	484
АНАЛІЗ ПРИЧИН І НАСЛІДКІВ ПРОСАДОК НАПРУТИ В СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПРОМИСЛОВИХ ОБ'ЄКТІВ	480
Oleksandr Verovkin Influence of higher harmonics on power quality in industrial electrical networks Верьовкін Олександр Вплив вищих гармонік на якість електроенергії в промислових електричних мережах	485
Секція 4 Інтелектуальні інформаційно-управляючі системи та проблеми інформаційної безпеки Section 4 Intelligent information management systems and information security issues	490
Hennadi Shvachych, Andrii Bytko Research on algorithms for managing competitive access and avoiding collisions in blockchain networks Швачич Г.Г., Битько А.М. Дослідження алгоритмів управління конкурентним доступом та уникнення колізій у блокчейн-мережах	491
Hennadi Shvachych, Hlib Monastyrov Digital transformation of informal education through mobile systems Швачич Г.Г., Монастирьов Г.В. Цифрова трансформація інформальної освіти через мобільні системи.....	497
Berezuk M.O., Guda A.I. Context-aware adaptation of generative LLM responses Березюк М.О., Гуда А.Ю. Контекстно залежна адаптація відповідей генеративних LLM.....	503

Viacheslav Bobrenok, Anton Guda Trust based model for cloud security Бобренко В.В., Гуда І.А. Використання моделі на основі безпеки для захисту хмарних середовищ.....	509
Velehura Yevhenii, Horiachkin Vadym Consensus protocols and their application in freight flow management systems Велегура Є.А., Горячкін В.М. Протоколи консенсусу та їх застосування у системах управління вантажопотоками	515
Vdovychenko I.N. Current trends in the use of artificial intelligence in cybersecurity Вдовиченко І.Н. Сучасні тенденції використання штучного інтелекту в кібербезпеці.....	522
Oleksandr Halushka, Viktor Shynkarenko Mathematical and cognitive foundation for the systematization of ontological relations Галушка О.В., Шинкаренко В.І. Математико-когнітивна основа для систематизації онтологічних відношень	528
Hnatushenko V., Kashtan V., Ovcharenko M., Ivanko A. Analysis of Twitter users' sentiment based on text data using convolutional neural network Гнатушенко В.В., Каштан В.Ю., Овчаренко М.А., Іванько А.М. Аналіз настроїв користувачів Twitter на основі текстових даних з використанням згорткової нейронної мережі	534
Honcharov O.H., Hnatushenko V.V. Automatic semantic segmentation of Sentinel-2 images: integration of clustering and large multimodal models for cluster interpretation Гончаров О. Г., Гнатушенко В. В. Автоматична семантична сегментація зображень Sentinel-2: інтеграція методів кластеризації та великих мовних моделей для інтерпретації кластерів	538
Vitalii Gorbato, Anna Zhurba Using real-time neural networks in intrusion detection systems Горбатов В.С., Журба А.О. Використання нейронних мереж реального часу у системах виявлення мережевих вторгнень.....	542
Yurii Kavats, Kateryna Sergieieva, Tatjana Fenenko, Danilo Dibrii Assessing water pollution based on spectral indexes Кавац Ю.В., Сергєєва К.Л., Фененко Т.М., Дібрій Д.А. Оцінка стану забруднення водних об'єктів на основі спектральних індексів	546
O.O. Zhukov, V.I. Horbenko Using time series and lstm neural networks for identification of hive states О.О. Жуков, В.І. Горбенко Використання часових рядів та нейронних мереж lstm для ідентифікації станів вулика.....	551

Ivashchev D. V., Herasymov V. V. Data segmentation algorithm for fuel level monitoring Іващев Д. В., Герасимов В. В. Алгоритм сегментації даних при моніторингу рівня палива	554
Korennoi Volodymyr New methods of determining the technical condition of the driving line of the rolling stands Коренной В.В. Нові способи визначення технічного стану лінії приводу прокатних клітей	558
Yevhenii Korchev, Liliya Bozhukha Design and development of an order management information system for food service establishments with cross-platform access Корчев Є.А. , Божуха Л.М. Проектування та розробка інформаційної системи управління замовленнями у закладах харчування з кросплатформеним доступом	565
Pavlo Kundenko, Viktoria Hnatushenko Research on the effect of activation functions on the accuracy of water body segmentation from satellite images Кунденко П.Р., Гнатушенко Вік.В. Дослідження впливу активаційних функцій на точність сегментації водних об'єктів на супутникових зображеннях	570
Hennadi Shvachych, Borys Moroz, Pavlo Shcherbyna, Dmytro Moroz Software analysis for the task of intellectual control of technological processes Швачич Г.Г., Мороз Б.І., Щербина П.О., Мороз Д.М. Аналіз програмного забезпечення в задачі інтелектуального управління технологічними процесами.....	573
Marko Nalbandian, Valerij Mazurenko Methods for managing the connection of alternative power source to existing grid Налбандян М.В. , Мазуренко В.В. Методи керування підключенням альтернативних джерел живлення до існуючої мережі	578
Valerii Nosov, Kateryna Ostrovska Adaptive system for online transaction risk assessment based on intelligent analysis	587
Носов В.О., Островська К.Ю. Адаптивна система оцінювання ризиків онлайн транзакцій на основі інтелектуального аналізу	584
Pertsev Y. O., Korotka L. I. Deep learning in financial analysis: application of LSTM and GANS for stock price prediction Перцев Ю. О., Коротка Л. І. Глибоке навчання у фінансовому аналізі: застосування LSTM та GAN для прогнозування цін акцій.....	589

Pidkorytov Volodymyr, Kupin Andrew Artificial intelligence in drone navigation: approaches, challenges and prospects Підкоритов В.О., Купін А.І. Штучний інтелект у навігації дронів: сучасні підходи, виклики та перспективи	594
Romanenko O. O ., Kupin A. I Universal classification for maintenance approaches Романенко О. О., Купін А. І Універсальна класифікація методів технічного обслуговування	601
Tetiana Rusakova Information support in environmental protection technologies Русакова Т.І. Інформаційне забезпечення для покращення ресурсоефективності виробництва.....	606
Oleksandr Syrota, Horiachkin Vadym, Methods for improving large language models to improve the quality of code refactoring Сирота О.А., Горячкін В.М. Методи покращення великих мовних моделей для покращення якості рефакторингу коду	615
Roman Sytnyk, Viktoriia Hnatushenko Multi-level personal data verification system in blockchain environment Ситник Р.С., Гнатушенко Вік.В. Система багаторівневої верифікації персональних даних у блокчейн-середовищі	620
Vitalii Slipchenko, Mykhailo Poliakov. Spectral analysis in GTPP control: a path to enhanced dynamic stability and efficiency. Сліпченко В.О., Поляков М.О. Спектральний аналіз у керуванні ГТЕС: шлях до підвищення динамічної стійкості та ефективності.	625
V.Tsaryk, Vikt.Hnatushenko, T.Selivorstova Modern approaches to optimizing web application interfaces: interactivity, functionality, and accessibility Царик В.Ю., Гнатушенко Вікт.В., Селівьорстова Т.В. Сучасні підходи до оптимізації інтерфейсів веб-застосунків: інтерактивність, функціональність та доступність	631
Cheshenko Dmytro, Matsuga Olga Comparative analysis of deep learning models for plant disease classification in different color spaces Чешенко Д.Р, Мацуга О.М. Порівняльний аналіз моделей глибокого навчання для класифікації хвороб рослин у різних кольорових просторах.....	635
Shapovalova S. I., Baranichenko O. M. Controlling of the hierarchical object based on the production model Світлана Шаповалова, Олексій Бараніченко Керування ієрархічним об'єктом на основі продукційної моделі.....	641

Sharov S. Expert system for comparative analysis of educational metaobjects Шаров С.В. Експертна система для проведення порівняльного аналізу освітніх метаоб'єктів	646
Sharova T. Information security in the era of digital transformation Шарова Т.М. Інформаційна безпека в епоху цифрової трансформації.....	652
Khrystyna Ryabinets, Tetiana Shestakevych, Nataliya Syrotynska Digital mapping of the ukrainian sacred monody Рябінець Х.Я, Шестакевич Т., Сиротинська Н Цифрове відображення української сакральної монодії	657
Dmytriieva Iryna Serhiivna, Bimalov Dmytro Viktorovych Analysis of emotions using voice features Дмитрієва І.С., Бімалов Д.В. Аналіз емоцій з використанням голосових ознак.....	662
Kupin Andrey, Kosei Maksym Comparative analysis of promising models of swarm intelligence Купін А.І., Косей М.П. Порівняльний аналіз перспективних моделей ройового інтелекту	666
Nykyta Krasnoshapka, Tetiana Seliviorstova Development of Serverless web applications on the Azure Functions platform using .net Карасношапка Н.С., Селівьорстова Т.В. Створення безсерверних Serverless веб-додатків на платформі Azure Functions з використанням .net	673
Mitikov Nikolay Optimisation of the process of searching for memory segments: mathematical modelling and experimental evaluation of the completeness of information content with fixed memory volumes Мітіков М.Ю. Оптимізація процесу пошуку сегментів пам'яті: математичне моделювання та експериментальна оцінка повноти інформаційного вмісту при фіксованих об'ємах пам'яті	677