

Міністерство освіти і науки України

Системні технології

System technologies

6 (143) 2022

Регіональний міжвузівський збірник наукових праць

Засновано у січні 1997 року.

У випуску:

- ПРОГРЕСИВНІ ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ
ТА ОРГАНІЗАЦІЯ СУЧАСНОГО ВИРОБНИЦТВА**
- МАТЕМАТИЧНЕ ТА ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ СИСТЕМ**
- СИСТЕМНІ ТЕХНОЛОГІЇ ОБРОБКИ ІНФОРМАЦІЇ
ТА КІБЕРБЕЗПЕКА**

Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Випуск 6 (143). - Дніпро, 2022. – 143 с.
ISSN 1562-9945 (Print).
ISSN 2707-7977 (Online).

Редакційна колегія випуску:

Алпатов А.П. - д.т.н., проф. (відп. редактор)
Архипов О.Є. - д.т.н., проф.
Білозьоров В.Є. - д.ф.-м.н., проф.
Бабічев С.А. (Чеська Республіка) - д.т.н., доц.
Єрьомін О.О. - д.т.н., проф.

Прогресивні інформаційні
технології та організація
сучасного виробництва

Гече Ф.Е. - д.т.н., проф., (відп. редактор)
Гуда А.І. - д.т.н., проф.
Гнатушенко Вік.В. - д.т.н., проф.
Скалозуб В.В. - д.т.н., проф.

Математичне
та програмне забезпечення
інтелектуальних систем

Гнатушенко В.В. - д.т.н., проф., (відп. редактор)
Гожий О.П. - д.т.н., проф.
Кіріченко Л.О. - д.т.н., проф.
Светличний Д.С. (Польща) - д.т.н., проф.
Хандецький В.С. - д.т.н., проф.

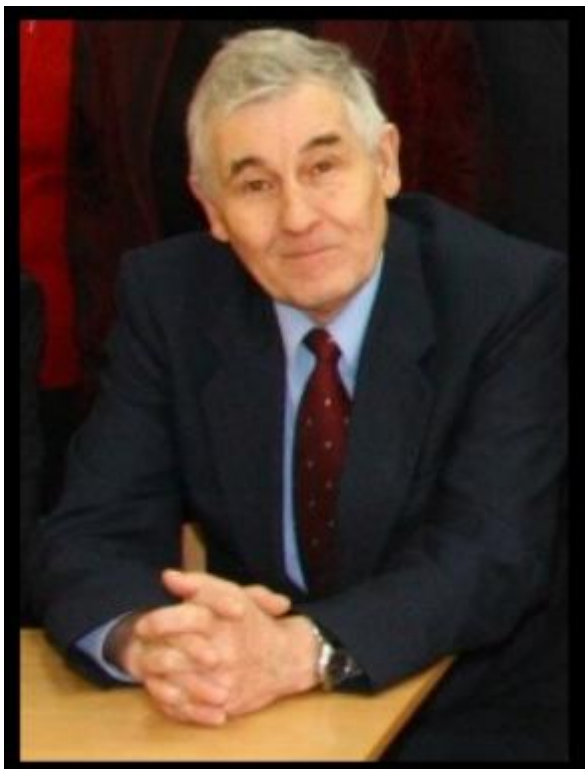
Системні технології
обробки інформації
та кібербезпека

Збірник друкується за рішенням Вченої Ради
Українського державного університету науки і технологій
від 28.03.2022 р., № 5

Адреса редакції: 49600, Дніпро, пр. Гагаріна, 4
Український державний університет науки і технологій,
ННІ «Інститут промислових та бізнес технологій»
кафедра Інформаційних технологій та систем.
Тел. +38(097)6854525
E-mail: st@nmetau.edu.ua
<https://journals.nmetau.edu.ua/index.php/st>

© Український державний університет науки і технологій,
ННІ «Інститут промислових та бізнес технологій»,
ІВК «Системні технології», 2022

Пам'яті професора, доктора технічних наук ГОЛОВКА В'ячеслава Ілліча.



Для мене особисто, як і для багатьох інших, В'ячеслав Ілліч Головка був визначною постаттю. Він народився 07 липня 1947 року. Моє знайомство із ним відбулося під час підготовки до захисту моєї кандидатської дисертації. Його трохи прижмурений погляд із сигаретою запам'ятовується на усе життя. Завжди спілкування з В'ячеславом Іллічем мало характерну рису – він завжди шукав можливість допомогти. І допомагав він щиро, від душі. При чому це стосувалося не тільки науки, це обіймало увесь спектр життєвих питань.

Було таке відчуття, що він проникав в тебе. Його підопічні завжди знали – «шеф» поряд будь-де та будь-коли.

В'ячеслав Ілліч Головка був людиною – генератором. Він постійно генерував ідеї, аналізував їх впровадження, це був сенс його життя. Саме ця якість характеризувала професора Головка впродовж всього його наукового шляху. А науку він любив. І любов ця була взаємною. Зі студентських років В'ячеслав Головка приймав активну участь у науковому житті. Спочатку студентські науково-дослідні роботи, потім участь у науково-дослідних роботах кафедр. Не дивно, що після закінчення металургійного інституту у 1970 році він переходить працювати до Інституту чорної металургії. До сфери його наукових інтересів входило доменне виробництво, сталеплавильні агрегати. Він особисто об'їздив майже усі металургійні комбінати колишнього СРСР. Накопичений досвід дав змогу отримати вагомий науковий результат – захист кандидатської дисертації, де були вирішені комплексні питання алгоритму роботи систем подачі шихтових матеріалів на колошник доменної печі. Матеріали дисертації майже одразу були впроваджені у виробництво, що свідчить про вагомий науково-практичний результат.

У подальшому В'ячеслав Ілліч захопився впровадженням радарної техніки у металургії. Часто у металургійних агрегатах потрібно знати фактичний рівень

шихтових матеріалів або розплаву. Оскільки основними перешкодами є замкнутий простір та висока температура, то для цього завдання радіолокація є найоптимальнішим рішенням. В'ячеслава Ілліча по праву можна вважати родоначальником радіолокації металургії в Україні. Саме цій тематиці була присвячена його докторська дисертація, матеріали якої звісно ж були впроваджені у виробництво. Під науковим супроводженням професора Головка була встановлена система радіолокаційного контролю рівня засипу шихтових матеріалів на колошнику найпотужнішої доменної печі №9 у Кривому Розі, яка дозволила значно оптимізувати її роботу та підвищити техніко-економічні показники доменної плавки.

Під керівництвом та консультуванням В'ячеслава Ілліча було захищено ряд кандидатських та докторських дисертацій. Він був членом багатьох докторських спеціалізованих Вчених рад.

Окремо хочеться згадати про дружину В'ячеслава Ілліча. Людмила Андріївна була надійним тилом та завжди підтримувала чоловіка. Природньо, що вона також була пов'язана з науковою діяльністю. Кандидат хімічних наук Людмила Андріївна Головка все життя присвятила питанням хімії в металургійних процесах та пропрацювала у інституті чорної металургії ім. З.І.Некрасова НАН України.

Війна дуже негативно вплинула на всіх нас та на В'ячеслава Ілліча. Це була його особиста трагедія, яка, нажаль, дуже негативно відобразилась на його здоров'ї. За два дні після свого 75-ти річного ювілею, 09 липня 2022 р В'ячеслава Ілліча Головка не стало. Про це боляче говорити... Мені іноді здається, що раптом двері до кабінету швидко та впевнено відчиняться та усміхнений шеф скаже: «Андрюха, хвiate папірців, давай будемо займатися наукою!».

Впевнений, що всі ми, його учні, друзі та колеги пам'ятатимемо В'ячеслава Ілліча усе життя. Знаю, що його справа жива і ми будемо її розвивати.

Андрій Селегей, професор кафедри «Технічна механіка» УДУНТ.

ЗАСТОСУВАННЯ КЛАСТЕРИЗАЦІЇ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ЛІНІЙНИХ НАБЛИЖЕНЬ

Анотація. У статті запропоновано спосіб підвищення точності моделювання об'єкта дослідження на основі набору темпоральних мультимодальних даних за допомогою лінійних наближень з використанням кластеризації. Запропонований підхід може бути застосований при створенні цифрового двійника досліджуваного об'єкта.

Ключові слова: цифрові двійники, темпоральні мультимодальні дані, аналіз даних.

Вступ. Сучасні технологічні засоби спостереження, моніторингу та вимірювання дозволяють генерувати величезний об'єм гетерогенних даних, що описують стан та поведінку систем та процесів, таких як розумні будинки, автоматичні виробництва та випробувальні стенди, медичні дослідження тощо. Внаслідок цього виникає необхідність аналізу та використання цих даних з великою точністю для отримання розуміння процесів, що спостерігаються, та побудови цифрових моделей складних систем та процесів, зокрема цифрових двійників, з метою дослідження, вивчення та оптимізації прийняття рішень [1–3]. Такі набори даних породжують цілу низку проблем та викликів, які становлять значний інтерес для дослідників у різних областях науки та техніки, наприклад, їх отримання, синхронізація, зберігання і ефективні обробка та аналіз [4].

За своєю природою мультимодальні дані містять більше інформації, ніж значення модальностей, зафіксовані окремо, завдяки наявності зв'язків між ними. Хоча ці зв'язки можуть бути невідомі безпосередньо, про них можна зробити певні висновки з використанням методів поєднання даних (data fusion). Поєднання даних визначається як процес комбінування значень, що надходять з різних джерел, наприклад, сенсорів різних типів, для більш повного опису середовища, процесу або об'єкта, що досліджується, таким чином, щоб при цьому суттєво зросла деяка інформаційна метрика [5]. З практичної точки зору поєднання даних дозволяє отримати більш точні моделі

досліджуваних явищ на основі різних джерел інформації, які використовуються в різних цілях, в тому числі для побудови цифрових двійників – комп’ютерних моделей реальних систем, які досліджуються для аналізу інформації та прийняття рішень в умовах, коли відповідні експерименти з реальною системою не є доцільними з міркувань вартості, безпеки тощо. У таких системах модальності впливають одна на одну, забезпечуючи більш точне представлення об’єкта дослідження.

Постановка проблеми. Задача методів моделювання та аналізу в цілому полягає у створенні цифрової моделі об’єкта дослідження за набором темпоральних мультимодальних даних з попередньо невідомими зв’язками, що дозволить передбачення з більшою точністю, ніж одне лінійне наближення. Вхідний набір даних вважатимемо повним та синхронізованим за часом.

Ця стаття присвячена використанню кластеризації для аналізу наборів темпоральних мультимодальних даних, які характеризують об’єкт дослідження з метою підвищення точності моделювання.

Аналіз літературних джерел. У роботі [6] запропоновано базову модель цифрового двійника, яка призначена для аналізу та моделювання виробничих процесів. Вона складається з чотирьох рівнів: рівня фізичного простору виробничого процесу, рівня комунікаційної системи, рівня цифрового двійника та рівня користувацького простору. Програмна система для реалізації цифрового двійника включає модуль керування, модуль симуляції, модуль передбачення і виявлення аномалій, а також модуль збереження даних (хмарне сховище). Недоліком запропонованої моделі є неможливість її використання для інших галузей застосування цифрових двійників.

У роботі [7] представлено метод створення цифрової моделі виробничого пристрою та передбачення дефектів виробництва та зносу робочих частин завдяки збору й обробці опосередкованих даних зовнішніх сенсорів.

Запропонований у роботі [8] метод дозволяє забезпечити зв’язок між різними моделями промислового об’єкта для коректної візуалізації цифрового двійника. Цей метод не може бути застосований для цифрового подання об’єктів іншої природи, наприклад, медико-біологічних об’єктів.

Аналіз цих та інших літературних джерел, опублікованих нещодавно, дозволяє стверджувати про необхідність удосконалення методів подання та аналізу темпоральних мультимодальних даних для комплексного подання наборів даних та формування цифрових двійників досліджуваних об’єктів.

Подання темпоральних мультимодальних даних. Для формальної специфікації цифрових двійників досліджуваних об'єктів потрібен математичний апарат, який забезпечить логіку подання та оброблення темпоральних мультимодальних даних з урахуванням властивостей цих даних, а саме, мультимодальності (цифровий двійник визначається сукупністю даних різної природи; логіка подання та оброблення даних цифрового двійника залежить від якісного та кількісного складу цієї сукупності даних) та темпоральності (елементи сукупності даних цифрового двійника є впорядкованими за часом їх отримання; порядок слідування окремих елементів послідовності даних впливає на результат оброблення всієї сукупності даних цифрового двійника). Таким математичним апаратом є алгебраїчна система агрегатів [10].

Агрегат A – це впорядкована скінчена сукупність елементів, яка визначається кортежем множин $\{A\}$ та кортежем кортежів елементів $\langle A \rangle$, причому елементи a_i^j кожного кортежу елементів $\langle a_i^j \rangle_{i=1}^{n_j} \in \langle A \rangle$ належать до відповідної множини $M_j \in \{A\}$, $j = [1 \dots N]$, що задає взаємно-однозначний зв'язок між порядком слідування множин та порядком слідування кортежів елементів:

$$A = \llbracket M_j | \langle a_i^j \rangle_{i=1}^{n_j} \rrbracket_{j=1}^N = \llbracket \{A\} | \langle A \rangle \rrbracket, \quad (1)$$

де $\{A\}$ – кортеж множин M_j ; $\langle A \rangle$ – кортеж кортежів елементів $\langle a_i^j \rangle_{i=1}^{n_j}$; a_i^j – окремий елемент (значення) або складений елемент (кортеж однорідних значень або кортеж різнорідних значень), $a_i^j \in M_j$.

Розглянемо об'єкт спостереження S , який виявляє свою сутність через набір властивостей F_1, F_2, \dots, F_N , які можуть бути вимірні. В багатьох випадках ці властивості є взаємопов'язаними, оскільки вони представляють стан одного і того ж об'єкта та, фактично, є різними проявами його поведінки, що змінюється з плином часу. Комплексне подання даних, що відображають характеристики досліджуваного об'єкта, сприяє кращому розумінню загальної картини поведінки цього об'єкта. Вимірні значення властивостей досліджуваного об'єкта S можна представити як агрегат A_S , компонентами якого є кортежі значень $\langle f_i^j \rangle_{i=1}^{n_j}$ властивостей F_j ($j = 1 \dots N$) об'єкта S :

$$A_S = \llbracket M_1, M_2, \dots, M_N | \langle f_1^1, f_2^1, \dots, f_{n_1}^1 \rangle, \langle f_1^2, f_2^2, \dots, f_{n_2}^2 \rangle, \dots, \langle f_1^N, f_2^N, \dots, f_{n_N}^N \rangle \rrbracket \quad (2)$$

Розглянемо спосіб дослідження зв'язку між даними різних модальностей об'єкта дослідження, визначеного (2), які визначають його властивості.

Використання кластеризації даних для підвищення точності моделювання. У випадку, коли поведінка систем описується нелінійним законом, або сукупністю законів в залежності від певних умов, єдина апроксимація мультимодальних даних, яка будується в більшості методів поєднання даних стає значно менш ефективною через викиди, що сильно відхиляються від лінійного наближення.

Застосування в такому випадку методів факторизації або компонентного аналізу дозволяє описати систему більш точно за рахунок появи більшої кількості ступенів свободи, або введенню принципово інших властивостей, але при цьому все одно будується єдине лінійне наближення, обчислення, аналіз та інтерпретація якого є нетривіальною задачею.

Для вирішення даної проблеми пропонується виконати розділення області даних на інтервали, в яких лінійні наближення будуть давати задовільну точність – виконати кластеризацію з урахуванням самих значень точок даних та їх статистичних характеристик.

Загальний алгоритм, що пропонується для цього є модифікацією методу DBSCAN, у якому метрикою відстані є відхилення точки від лінійного наближення по поточному кластеру:

1. Обрати мінімальну кількість точок m .

2. Ініціалізувати список відхилень $R = \emptyset$ та список кандидатів $A = \emptyset$, лічильник кластерів $i = 0$, поточний кластер $C_i = \emptyset$.

2. У впорядкованому за незалежною величиною наборі даних побудувати лінійне наближення залежної величини за першими m точками, додати їх у поточний кластер C_i та обчислити середнє відхилення s .

3. Для кожної наступної точки P обчислити відхилення d від наближення на поточному кластері.

3.1. Якщо $d \leq s$:

3.1.1. Якщо $|R| = 0$, $C_i = C_i \cup \{P\}$;

3.1.2. Інакше якщо $|R| + |A| = m$:

3.1.2.1. Якщо $|R| \geq |A|$, то $i = i + 1$, $C_i = R \cup A$;

3.1.2.2. Інакше $C_i = C_i \cup R \cup A$,

3.1.2.3. Переобчислити наближення та s для поточного кластера;

3.1.2.4. $R = \emptyset$, $A = \emptyset$, перейти до п. 3

3.1.3. Інакше якщо $d \leq s$, то $A = A \cup \{P\}$

3.2. Інакше $R = R \cup \{P\}$, перейти до п. 3.1.2.

4. $C_i = C_i \cup R \cup A$

5. Отримано множу кластерів C та відповідні наближення та них.

Запропонований алгоритм по суті є жадібним алгоритмом, який додає точки даних до поточного кластера, поки не накопичить достатню кількість точок, що відхиляються від лінійної моделі даних для поточного кластера, які сигналізують про необхідність виділення нового кластера та віднесення накопчених точок до нього. Таким чином, отримані наближення є чисельно більш точними, ніж застосування єдиного наближення на всій множині даних.

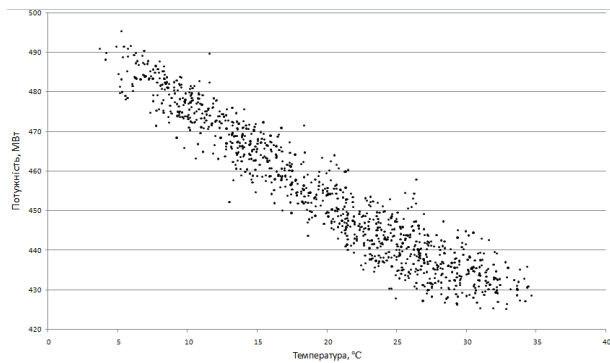
Застосування методу та аналіз результатів. Для дослідження зв'язку між даними різних модальностей розглянемо набір даних містить 9568 точок даних, зібраних з комбінованої електростанції протягом 6 років (2006-2011), коли електростанція була налаштована на роботу з повним навантаженням. Характеристики складаються із середніх годинних значень температури навколишнього середовища (AT), тиску навколишнього середовища (AP), відносної вологості (RH), тиску носія (V) та вихідної потужності електростанції (PE).

Середні значення беруться з різних сенсорів, розташованих на електростанції, які щосекунди реєструють параметри навколишнього середовища. Значення задані без нормування [10].

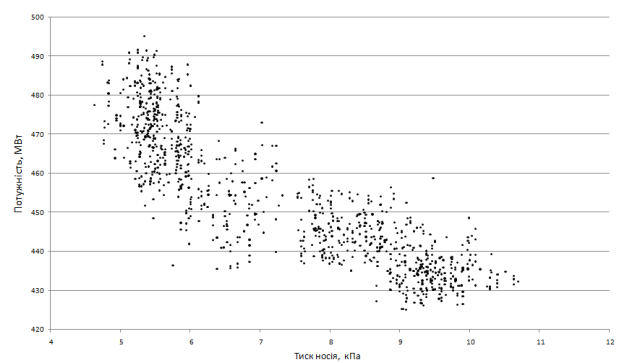
Зв'язки між наведеними модальностями не є очевидними і їх складно повною мірою виявити з наявного набору даних через його розмірність, проте можна застосувати статистичний аналіз та візуалізацію для того, щоб отримати деяке уявлення про зв'язки між модальностями. Їх розуміння дозволяє побудову більш ефективних моделей, що поєднують модальності.

Вважатимемо температуру, тиск, вологість та тиск носія незалежними величинами, оскільки їх визначають приховані особливості процесів установки, а вихідну потужність – залежною, оскільки вона є похідною відповідних процесів, які визначають інші величини. Для дослідження зв'язку між модальностями використаємо графічне представлення та кореляційний аналіз. На рис. 1 (а-е) зображено залежності між деякими модальностями для рівномірної вибірки із тисячі точок даних.

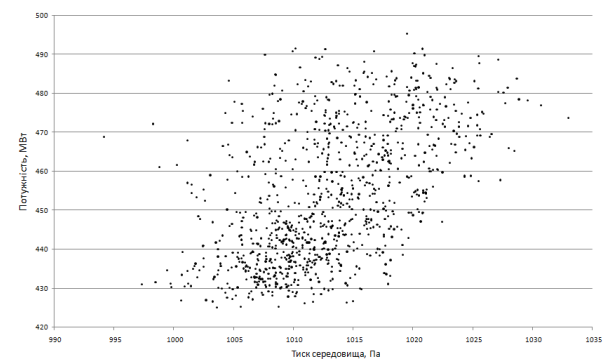
Хоча зображені залежності відображають лише попарний зв'язок між величинами, і не враховують зв'язки між ними, можна зробити висновок, що вихідна потужність станції знаходиться в лінійній залежності від температури середовища, і в експоненціальній залежності від тиску носія. В той час вологість та тиск середовища слабо пов'язані з потужністю, але мають певний зв'язок із великою дисперсією з температурою, що може свідчити про наявність прихованих змінних, які визначають їх співвідношення.



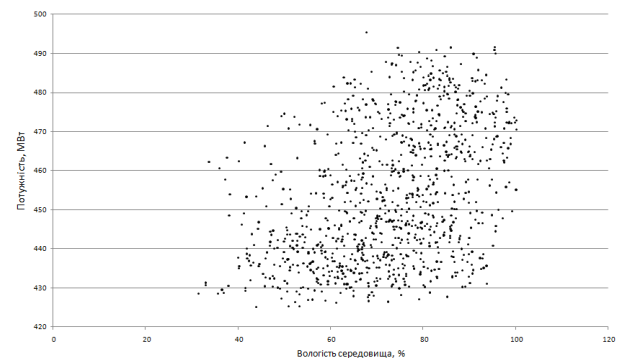
(а) Температура – Потужність



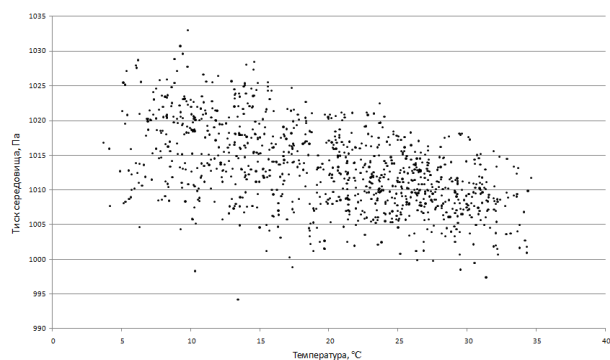
(б) Тиск носія – Потужність



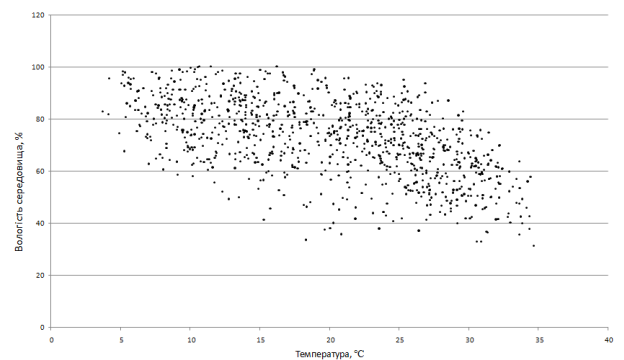
(в) Тиск середовища – Потужність



(г) Вологість середовища – Потужність



(д) Температура – Тиск середовища



(е) Температура – Вологість середовища

Рисунок 1 - Залежності між даними деяких модальностей

Ці висновки підтверджуються кореляційним аналізом (табл. 1, 2). Висока кореляція Пірсона між температурою, тиском носія та потужністю свідчить про наявність залежності між ними, близької до лінійної. Так само, висока кореляція Спірмена означає монотонну (не обов'язково лінійну) залежність між даними величинами.

Таблиця 1

Кореляційна матриця модальностей (коефіцієнт Пірсона)

	AT	V	AP	RH	PE
AT	1.000	0.844	-0.508	-0.543	-0.948
V	0.844	1.000	-0.414	-0.312	-0.870
AP	-0.508	-0.414	1.000	0.010	0.518
RH	-0.543	-0.312	0.010	1.000	0.370
PE	-0.948	-0.870	0.518	0.390	1.000

Таблиця 2

Кореляційна матриця модальностей (коефіцієнт Спірмена)

	AT	V	AP	RH	PE
AT	1.000	0.851	-0.519	-0.543	-0.944
V	0.851	1.000	-0.426	-0.305	-0.884
AP	-0.519	-0.426	1.000	0.087	0.543
RH	-0.543	-0.305	0.087	1.000	0.390
PE	-0.944	-0.884	0.543	0.390	1.000

З урахуванням отриманих висновків, застосуємо запропонований алгоритм для будови лінійної моделі для обчислення вихідної потужності за температурою та тиском.

Результат використання алгоритму із $m = 1435$ (15% від загальної кількості даних щоб забезпечити стійкість до відхилень та уникнути виділення великої кількості кластерів) дозволяє отримати один кластер для температури та два кластери для тиску (рис. 2).

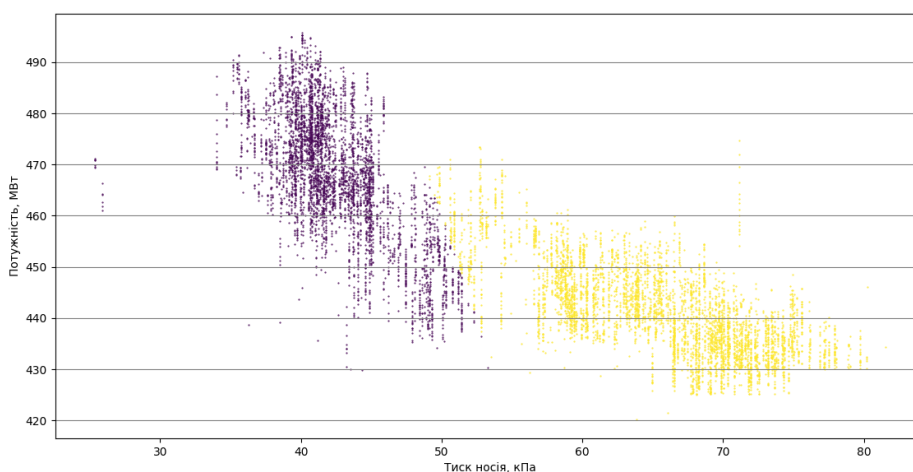


Рисунок 2 - Результат кластеризації за тиском

Для використання отриманого поділу і побудови наближень необхідно скоригувати отримані результати кластеризації таким чином, щоб приналежність вхідної точки до певного інтервалу однозначно визначалась набором залежних змінних. Для цього, межа поділу за тиском обрана як точка, рівновіддалена від крайніх точок відповідних кластерів (рис. 3).

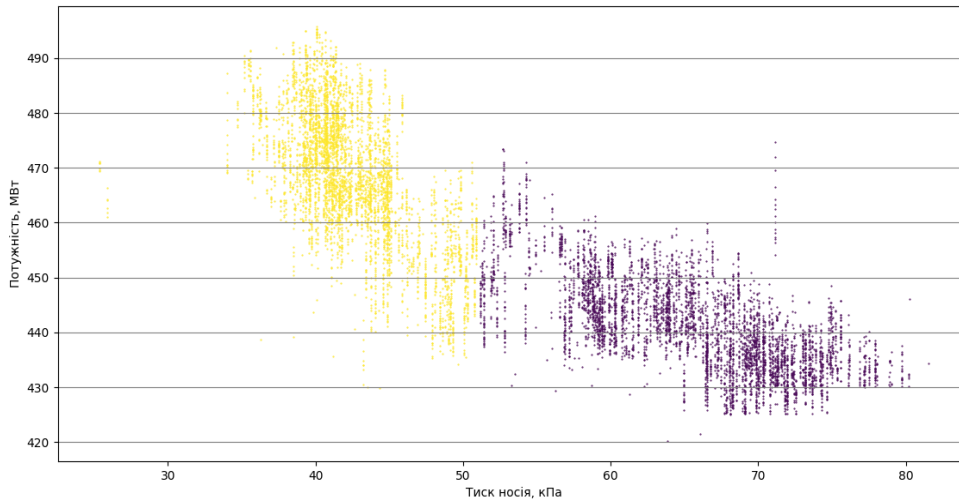


Рисунок 3 - Поділ, однозначний за незалежними змінними

Для виділених інтервалів будуються та використовуються окремі наближення. Для побудови моделі використовувались 90% наявних у наборі даних, і відповідно 10% використовувались для її оцінки на кожному інтервалі. Наближення побудовані та оцінені з використанням програмного пакету Scikit Learn мови python для множинної лінійної регресії та оцінки моделей. В якості параметрів оцінки моделі обрано середньоквадратичну помилку та коефіцієнт детермінації.

Використання єдиного наближення дозволяє отримати модель із середньоквадратичною помилкою 24.13 та коефіцієнтом детермінації 0.91. Модель із окремими наближеннями на кластерах, побудована з використанням запропонованого методу, відповідно має середньоквадратичне відхилення 21.49 та коефіцієнтом детермінації 0.93, тобто помилка моделі зменшилась на 11% і вона краще пояснює вплив незалежних змінних на залежну.

Також, у рамках дослідження за набором даних були побудовані та оцінені інші можливі наближення, результати наведено в табл. 3.

Побудова та оцінка інших наближень

Залежність	Середньоквадратичне відхилення	Коефіцієнт детермінації
Лінійна від тиску	72.20	0.75
Лінійна від температури	29.28	0.93
Лінійна від усіх параметрів	33.72	0.91
Лінійна від температури та квадратична від тиску	66.51	0.82
Лінійна від температури та експоненціальна від тиску	2049.39	0.76

Висновки. У роботі запропоновано метод побудови моделей об'єктів за набором мультимодальних даних з використанням кластеризації для підвищення точності. Так, запропонований підхід можна використовувати в моделюванні при створенні цифрових двійників.

Запропонований алгоритм кластеризації може бути модифікований в залежності від особливостей задачі та набору даних. Наприклад, кількість точок у початковій множині, що формує перший кластер може бути більша, ніж мінімальна кількість точок у кластері, щоб зменшити вплив граничних значень, або умова виділення нового кластеру може залежати від співвідношення наборів відхилень та кандидатів на додавання в поточний кластер.

Було розглянуто його застосування запропонованого методу на наборі даних, що описує характеристики електростанції комбінованого циклу з метою передбачення вихідної потужності за характеристиками середовища. В результаті, досліджено зв'язки між модальностями та проведено низку експериментів з моделювання системи з урахуванням виявлених залежностей.

Застосування запропонованого підходу призвело до підвищення точності моделювання (значення середньоквадратичної помилки, що використовується як метрика точності, зменшилось на 11%). При цьому лінійні моделі мають значно кращу точність завдяки алгоритмам обчислення параметрів, що менш схильні до перенавчання та є чисельно стійкішими у порівнянні з іншими видами апроксимації.

Недоліком методу є обчислювальна складність через необхідність виконання кластеризації, обчислення параметрів та зберігання більшої

кількості моделей, що описують систему. За наявності більшої кількості даних, модальностей та варіацій в поведінці системи їх кількість може бути значно більшою і може призвести до зменшення продуктивності та точності моделі.

ЛІТЕРАТУРА

1. Norris S. Systematically working with multimodal data: Research methods in multimodal discourse analysis. John Wiley & Sons, 2019.
2. Gao J. et al. A survey on deep learning for multimodal data fusion. *Neural Computation*. 2020. Т. 32. №. 5. С. 829–864.
3. Worsley M. Multimodal learning analytics: enabling the future of learning through multimodal data analysis and interfaces. *Proceedings of the 14th ACM international conference on Multimodal interaction*. 2012. С. 353–356.
4. Lahat D., Adali T., Jutten C. Multimodal data fusion: an overview of methods, challenges, and prospects. *Proceedings of the IEEE*. 2015. Т. 103. №. 9. С. 1449–1477.
5. Raol J. R. *Data fusion mathematics: theory and practice*. CRC Press, 2015.
6. Bevilacqua M. et al. Digital Twin Reference Model Development to Prevent Operators' Risk in Process Plants. *Sustainability*, 2020, Issue 12, Paper 1088, 17 p.
7. Cai Y. et al. Sensor data and information fusion to construct digital-twins virtual machine tools for cyber-physical manufacturing // *Procedia manufacturing*. – 2017. – Т. 10. – С. 1031-1042.
8. Talkhestania B.A., Jazdib N., Schlöglc W., Weyrich M. A concept in synchronization of virtual production system with real factory based on anchor-point method. *Procedia CIRP*, 2018. Vol. 67, P. 13–17.
9. Sulema Ye., Kerre E., et al. *Mathematical Methods in Interdisciplinary Sciences*. Wiley, USA, 2020. 464 p.
10. Tüfekci P. Prediction of full load electrical power output of a base load operated combined cycle power plant using machine learning methods. *Intern. Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2014. Т. 60. С. 126–140.

REFERENCES

1. Norris S. Systematically working with multimodal data: Research methods in multimodal discourse analysis. John Wiley & Sons, 2019.
2. Gao J. et al. A survey on deep learning for multimodal data fusion. *Neural Computation*. 2020. Т. 32. №. 5. С. 829–864.
3. Worsley M. Multimodal learning analytics: enabling the future of learning through multimodal data analysis and interfaces. *Proceedings of the 14th ACM international conference on Multimodal interaction*. 2012. С. 353–356.

4. Lahat D., Adali T., Jutten C. Multimodal data fusion: an overview of methods, challenges, and prospects. Proceedings of the IEEE. 2015. T. 103. №. 9. C. 1449–1477.
5. Raol J. R. Data fusion mathematics: theory and practice. CRC Press, 2015.
6. Bevilacqua M. et al. Digital Twin Reference Model Development to Prevent Operators' Risk in Process Plants. Sustainability, 2020, Issue 12, Paper 1088, 17 p.
7. Cai Y. et al. Sensor data and information fusion to construct digital-twins virtual machine tools for cyber-physical manufacturing //Procedia manufacturing. – 2017. – T. 10. – C. 1031-1042.
8. Talkhestania B.A., Jazdib N., Schlöglc W., Weyrich M. A concept in synchronization of virtual production system with real factory based on anchor-point method. Procedia CIRP, 2018. Vol. 67, P. 13–17.
9. Sulema Ye., Kerre E., et al. Mathematical Methods in Interdisciplinary Sciences. Wiley, USA, 2020. 464 p.
10. Tüfekci P. Prediction of full load electrical power output of a base load operated combined cycle power plant using machine learning methods. Intern. Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2014. T. 60. C. 126–140.

Received 01.11.2022.

Accepted 07.11.2022.

Application of clustering to improve the accuracy of linear approximations

The paper presents an approach to increase the accuracy of modelling an object of research based on a temporal multimodal data set with linear approximations using clustering. The proposed approach can be applied for creating digital twins of a researched object.

The purpose of the study as a whole is to create a digital twin of the researched object based on a set of temporal multimodal data with previously unknown relationships, which will allow predictions with greater accuracy than a single linear approximation. The input data set is considered as complete and synchronized. This paper focuses on the use of clustering to analyse the sets of temporal multimodal data that characterize the researched object.

The paper presents a method for dividing the data space into intervals, where linear approximations will be more accurate, by clustering based on the values of data points and their statistical characteristics for independent variables that show a nonlinear relationship with the dependent variable. As a result, the accuracy in models that use a linear approximation for a given value has increased (the value of the mean square error used as an accuracy metric has decreased by 11%). At the same time, linear models have much

better accuracy due to algorithms for calculating parameters that are less prone to overfitting and are more numerically stable. However, the proposed method is more computationally expensive due to the need to perform clustering, calculate intermediary approximations and store more models that describe the system. If there is more data, modalities and variations in the behaviour of the system, their number can be much larger and can lead to some reduction in productivity and accuracy.

Keywords: digital twins, temporal multimodal data, data analysis.

Сулема Євгенія Станіславівна - д.т.н., зав. кафедри ПЗКС Київського політехнічного інституту ім. Ігоря Сікорського.

Пеня Олександр Романович - аспірант кафедри ПЗКС Київського політехнічного інституту ім. Ігоря Сікорського.

Sulema Yevgenia - D. Eng., assistant professor, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute.

Penia Oleksandr - graduate student, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute.

USING SHARDING TO IMPROVE BLOCKCHAIN NETWORK SCALABILITY

Annotation. Blockchain is a distributed and decentralized database for recording transactions. It is shared and maintained by network nodes, which ensures its operations using cryptography and consensus rules that allow all nodes to agree on a unique structure of the blockchain. However, modern blockchain solutions face network scalability issues due to different protocol design decisions.

In this paper, we discuss sharding as a possible solution to overcome the technical limitations of existing blockchain systems and different forms of its practical realization presented in recent research spurred by blockchain popularity.

Keywords: blockchain, sharding, scalability, distributed networks, proof of work, multi blockchain, decentralized systems, directed acyclic graph.

1. Introduction. Blockchain — a centerpiece technology underlying Bitcoin and over thousand other cryptocurrencies that rapidly emerged in recent years — offers great potential and benefits in many applications. Not only does it fuel modern economic system changes, but also decentralized markets and governance models that benefit from lack of censorship and reliability of not having a singular failure point.

The main drawback of such systems is their performance. Most popular existing solutions have incredibly low processing bandwidth and confirmation latency: around 15 transactions per second (tps) and 12 minutes per transaction for Ethereum, 7 tps, and up to 60 minutes for Bitcoin [2]. This is incomparable with processing rates of traditional payment systems like Visa or Mastercard, standing at around 5000 transactions per second on average [2, 3]. Unfortunately, more than available computation capacity will be needed to solve this problem.

In this paper we want to discuss a demand and ways to achieve a more scalable solution with a throughput of a few orders of magnitude higher than existing systems while maintaining crucial blockchain benefits like security and decentralization, by looking at existing approaches to the problem in the industry. These in-the-

wild solutions are often lacking proper scientific rigor, but provide interesting insight into the problem.

2. Problem definition. A few modifications to existing protocols were proposed in recent years to mitigate these issues among the industry and academic communities [4-6], but no significant advancements are discussed in academic literature.

As first described in [1], blockchain is a decentralized, replicated, and transparent data store that allows anyone to read data and verify its correctness. Data is usually stored on the blockchain in the form of blocks (hence the name) as a linked list with cryptographic hashes instead of pointers. This list is stored on a series of (usually independent and generally untrusted) nodes in a network that must communicate without the presence of a trusted intermediary maintaining the consistency of data stored on the chain. This setup presents several challenges to the classical Byzantine generals' problem of finding consensus among the nodes, such as a lack of viable identity verification infrastructure or quadratic complexity on the number of messages needed.

Classical implementations of the blockchain employ a Proof-of-Work consensus method of selecting a random node as a designated trusted verifier from a pool of available nodes by producing hard-to-solve but easy-to-validate computationally intensive problems (e.g., Hashcash-like [7] — finding a SHA256 hash that satisfies a specific condition — in Bitcoin protocol). The node that finds the solution to a problem is then allowed to modify the blockchain with the new data. However, it's easy to see how this is a very limiting solution that scales poorly with the number of nodes and transactions in the system — reducing the underlying properties of the required computational puzzle (i.e., block time interval) leads to increased security risks. So does also increase the total transactions allowed per block (while further decreasing network propagation). This makes proof-of-work consensus neither particularly cost-effective nor ecologically viable [8].

Many blockchain projects propose a move to use a different consensus mechanism, among others:

- Proof-of-Stake, where block proposers are selected by their stake in the system (wealth, age, or other factors);
- Distributed Proof-of-Stake, where the stakeholders vote on block proposers;
- Directed Acyclic Graph that removes sequential limitations on block processing.

These methods come with their own limitations in other critical aspects of the blockchain infrastructure. (For a more detailed overview of the modern blockchain consensus protocols, see [12].)

This leads to the drive for another way of tackling the network throughput and bandwidth scaling problems present in the existing protocols, preferably without massive security and decentralization drawbacks.

Note that a few commercial blockchain solutions are promising to solve the scaling problem by relying on trusted infrastructure or using federated identities, i.e., not targeting an open permissionless environment [9-11]. This is a concise decision on their part, and we are not discussing them within this paper.

3. Sharding architectures. One of the possible solutions to the scaling challenges of blockchain comes from traditional database design.

Sharding is a technique in which the main blockchain is divided into smaller parts, called shards or sub-chains, that exist in either separate sub-network or on the main blockchain network and processes a non-overlapping set of transactions.

This produces several challenges that need to be solved:

1) Cross-shard transactions: Cross-shard transactions enable interoperability between accounts or transactions on different shards but are hard to do securely when a consensus of more than one sub-chain is required. This is an essential property, even more complex when smart contracts are involved, especially in call chaining scenarios (i.e., when a cross-shard smart contract calls another cross-shard smart contract).

2) Masternode assignment: Each sub-chain must start from a primary node, but this process should be sufficiently random to prevent adaptive attacks and masternode collisions, especially in a non-proof-of-work system.

3) Shard reshuffling and data availability: By design, blockchain networks are not stable, and as such, there is a massive potential for network reconfigurations that will lead to synchronization issues. This synchronization during masternode re-assignment may take a significant portion of network uptime.

Let's look at a few examples of sharding architectures and compare their approach to the challenges posed above. Based on the similarities we can then deduce possible solutions to these problems and how this knowledge can be applied to other network architectures.

3.1. Elastico. Elastico [14] is one of the first protocols that utilized sharding and was developed specifically to solve scalability issues, initially of Bitcoin, that can be applied to any blockchain. (Zilliqa [15] was one of the first cryptocurrencies that

used Elastico protocol as the basis for development from the start.) Elastico scales linearly with the amount of available computational power in the network and can withstand up to 25% of its nodes being byzantine adversaries.

The protocol is uniformly splitting the network into separate sub-networks, called committees, that run a disjoint set of transactions in parallel using a classical byzantine consensus protocol internally. One of the committees is selected to combine shards selected by other committees, computing and broadcasting the digest and selecting randomness seeds.

Inside one committee, each node is responsible for solving proof-of-work challenge and providing identity to other members. Once most members sign the selected shard, that is then sent to a final committee that produces the final value (usually equal to a traditional block). This process, called an epoch, is then repeated with different sets of transactions, with different final committees on each epoch.

Despite the initially proposed algorithm using proof-of-work as part of the process to establish the node identity, which is central to the byzantine consensus protocols, it's possible to use other mechanisms.

The algorithm assumes a few drawbacks:

1) The protocol assumes the transactions are independent and subsequently doesn't try to restrict the number of transactions per shard, as traditional Bitcoin-like protocols do. Consequently, no additional interdependent data can be stored on the chain, and double spending can become an issue.

2) Elastico requires careful consideration of the controlling constants — number of committees and transactions per epoch — that greatly influence its viability and scalability. However, protocol authors propose a way to estimate these values.

3) The protocol is reliant on randomness generation by the final committee of each epoch, which assumes an easy vector for Byzantine and Sybil attacks.

3.2. Aspen. Aspen [16] is a protocol that proposes service-oriented sharding, the separation of blockchain data based on service preference. This is rooted in the idea of a multi-blockchain, where multiple separate chains have a common genesis block and share checkpoint blocks that contain data for the management of the overall structure.

This technique requires additional restrictions on the sharded blocks, such that they can belong to only one service. The added benefit is that intra-shard protocols can be completely separate and independent of the main blockchain. Aspen contains methods for introducing these new sub-chains (and, most importantly, their protocols) on the fly as part of the maintenance transactions in the checkpoint blocks of

the main chain, allowing for seamless integration with existing systems. This, combined with the ability to be built upon any existing blockchain platform, makes service-oriented sharding a very interesting protocol for non-payment related blockchain solutions.

The obvious drawback here is a possible non-uniformity of the service-chains. While the number of side-chains does not hinder the scalability, the existence of high-load services that require much computational power can draw it from less transactions-heavy services, resulting in their throttling, unless an additional mechanism for controlling per-service throughput is introduced.

Unfortunately, no practical implementations of this protocol exist, and no more developments have emerged since its conception, as well as no peer-reviewed data on its properties of it.

3.3. TON Blockchain. TON or Telegram Open Network, Blockchain [17, 18] is a blockchain system developed as part of the Telegram messaging platform to handle a large number of transactions. Practical implementation is currently in the testing phase, but theoretical papers describing its architecture are openly available.

TON's direction is wildly different from previous examples. TON proposes a so-called Sharding Paradigm, implying that not only main blockchain can be sharded, but every resulting subchain can be subsequently subdivided further into sub-subchains practically ad infinitum.

As such, the central architecture of the TON blockchain consists of 3 chains:

- 1) mainchain, which possesses general information about subchains, validators, and stakes;
- 2) workchains, which are subchains of the mainchain, that contain actual transactions, smart contracts, and so on;
- 3) shardchains, which are subchains of workchains and correspond to a self-contained set of accounts.

Each mainchain and shardchain block is considered a 1-block blockchain on its own. This allows for sharding particular shardchains if they become too big, scaling the system on the go.

TON Blockchain uses a proof-of-stake solution, designating specific nodes as validators and subdividing them among shards in a pseudorandom fashion, changing every 1024 blocks. For each validator, there is a set order of preference for a concrete block to be chosen to be committed. Validators use a variant of Byzantine fault tolerant consensus for selecting the new block in a shard. The mainchain block is generated on a timeout or when all new shardchain blocks are processed, containing

hashes for all shardchain latest blocks, by consensus of all validators to achieve persistence in the system.

What is different from protocols like Elastico is that each validator can be assigned to more than one shard, processing them in parallel. Moreover, invalid blocks in the shardchains can be corrected by subchaining the wrong block and generating a correct transaction in the top block of the subchain. This means that mainchain forks can be achieved only by incorrect behavior of the majority of validators, meaning significant stake losses for them.

Another interesting development is in the cross-shard messaging between shardchains. Messages are allowed to travel only between "neighboring" shardchains, i.e., shardchains that have only a small difference in their shard identifiers. Routing messages further is a special transaction. This creates a routing network between shardchains with the approximate number of intermediate transitions being $\lceil \log_{16} N \rceil - 1$, which scales incredibly well on the number of shardchains N .

Shardchain validators are encouraged to process messages from the output queues of their "neighbors," ensuring the routing mechanism works. The negative side of such a system lies in its heavy reliance on the proof-of-stake mechanism to ensure cross-shard transaction delivery and validation.

4. Discussion. Sharding solutions presented in this paper use a wide variety of different consensus strategies, with Elastico and Aspen building upon a more traditional proof-of-work Nakamoto consensus and TON using a proof-of-stake system at its core. All of them mix it with Byzantine-based protocols to achieve a consensus process to increase the system's security properties.

It's worth noting that there exist consensus-independent sharding protocols, such as OptChain, as well as mixed systems, that use different consensus strategies inside and outside shards.

In contrast to the traditional single-chained solutions, sharding protocols are much more reliant on randomness generation for security purposes, complicated by the distributed nature of the system. Most of the discussed protocols use Verifiable Random Functions, Verifiable Secrets Sharing, and Verifiable Delay Functions, which are a de-facto standard in the community.

Cross-sharding is still one of the most complex problems to solve. For example, in [19], it's expected that more than 90% of transactions are cross-sharded if using the traditional Unspent Transaction-Output model, where each transaction represents a unique atomic state of the ledger. Because of these, cross-shard transactions

need to ensure consistency of the produced state in all of the shards involved. This is usually referred to as an atomic commit property.

There is no agreed-upon common protocol for atomicity. Solutions include:

- use of a distributed set of trusted authorities [14, 20];
- use of locking mechanisms [19];
- splitting the cross-sharded operation into a series of intra-shard transactions and special atomic-by-construction cross-shard transactions [17].

Often cross-shard communications are the primary source of bandwidth in sharded blockchain systems, so choosing the correct algorithm is paramount to ensure proper scalability. Cross-shard communication can also be a significant vector of attack on the blockchain, as many atomic commit protocols are vulnerable to Denial of Service attacks. For a more detailed analysis, see [13].

We argue that, at least to some degree, the security, atomicity, and cross-shard communication (or, similarly, bandwidth of such communication) are mutually exclusive properties for now. We can think of them as of CAP-like triad for sharding, presenting a unique challenge in balancing out these properties. We also argue that most practical applications of these systems, like those mentioned above, are only focusing on solving one of the issues and generally do not care for the overall system's performance.

Finally, there are other venues for research in sharding, such as horizontal sharding (the influence of which we can see in TON Blockchain) and heterogeneous sharding. In these instances, we see each new instance of the blockchain, an equivalent of a shard, being configured separately in response to a specific demand, which can be more flexible in solving specific growth issues and balancing network bandwidth. Heterogeneous systems can consolidate the solution for the atomicity and communication problems.

Security still poses a problem but can be addressed where needed, specifically by sacrificing the overall performance. One way of doing so would be by introducing special "secure nodes" that process sensitive transactions. They would be bottleneck points and influence the network's overall bandwidth. Horizontal sharding has the same properties with a different technological basis.

Beside the sharding protocols, there are other alternatives to tackle scalability issues, like [21], that are conceptually similar to sharding.

For the sake of completeness, we need to mention other solutions. Off-chain solutions are outsourcing the transactions to a third-party entity, providing only de-

scriptions to the blockchain. These solutions are especially prone to identity attacks as they require additional mechanisms for validating the off-chain transactions.

Another popular method of achieving scalability is using a Directed Acyclic Graph when blocks are not connected as a chain, but as a graph, with validity being represented by outgoing edges. Throughput can be optimized by not requiring downloading the complete graph for all nodes. The obvious drawback is the additional dependency on validators, as well as the probability of valid transactions being appended to an invalid sub-graph.

It is also worth mentioning that there, of course, exist many other valid issues that factor into the scalability problem, such as environmental factors and socio-cultural acceptance of blockchain solutions that we only briefly mentioned in this article. Such matters may further hinder the development of the mentioned approaches. Environmental concerns are the most pressing in this regard, as the performance impact on the energy footprint of some algorithms is very high and can be unattainable when applied at scale. Such factors warrant additional research.

5. Conclusion. Among the many proposed solutions to achieve scale-out throughput and latency limitations of permissionless blockchain networks, like off-chain solutions, Directed Acyclic Graph, and sharding, the latter is the only one that seems most suited to overcome primary security and centralization issues posed by the problem.

Sharding solutions still imply the use of consensus protocols on top of traditional proof-of-X consensus, dominated by Byzantine fault-tolerant solutions, as well as a cross-shard communication protocol that requires additional atomic properties.

New developments in recent years include hybrid and non-traditional solutions championed by multi-blockchains like TON Blockchain.

We analyzed several sharding algorithms that present the most interest in solving scalability problems of classical blockchain. We concluded that sharding is the best possible solution to the scaling issues in most existing classical blockchain architectures based on practical data from in-the-wild usage. [16, 17, 19, 21]

We conclude that multi-chain solutions, such as the one proposed by TON developers, are the most effective for solving sharding problems in a decentralized setting. The trusted authority distribution can be performed in many different ways, and this problem is very similar to the classic database scaling problems. Solutions proposed by Elastico and RSCoin both have their strong sides under different conditions.

The results of this research can be applied to a number of problematic scaling solutions in existing blockchain networks, such as Bitcoin and Bitcoin Classic, as well as modern blockchain infrastructures such as Ethereum.

Additional research is required regarding the non-algorithmic properties of these solutions, such as their environmental impact.

Acknowledgment. P.B. wants to thank Volodymyr Pasko for insightful conversations on different aspects of blockchain technology during the preparation of this paper.

REFERENCES

1. S. Nakamoto, "Bitcoin: a peer-to-peer electronic cash system," [Online], 2009. Available: <https://bitcoin.org/bitcoin.pdf>.
2. Bitcoin Wiki. (2019) Scalability. Scalability targets, [Online], Available: <https://en.bitcoin.it/wiki/Scalability>.
3. Visa. (2019) Benefits accepting Visa, [Online]. Available: <https://usa.visa.com/content library/modal/benefits-accepting-visa.html>.
4. I. Eyal, A. E. Gencer, E. G. Sirer, and R van Renesse, "Bitcoin-ng: A scalable blockchain protocol," arXiv: 1510.02037 [cs.CR], November 2015.
5. G. Andersen. (2015) Bitcoin improvement proposal 101, [Online]. Available: <https://github.com/bitcoin/bips/blob/master/bip-0101.mediawiki>.
6. J. Garzik. (2015) Bitcoin improvement proposal 102, [Online]. Available: <https://github.com/bitcoin/bips/blob/master/bip-0102.mediawiki>.
7. A. Back, "Hashcash - A Denial of Service Counter-Measure," [Online], August 2002. Available: <http://hashcash.org/papers/hashcash.pdf>.
8. Digiconomist. (2019) Bitcoin Energy Consumption Index, [Online]. Available: <https://digiconomist.net/bitcoin-energy-consumption>.
9. Hyperledger. (2016) Sawtooth distributed ledger, [Online]. Available: <https://wiki.hyperledger.org/display/sawtooth>.
10. D. Mazieres, "The Stellar consensus protocol: A federated model for Internet-level consensus," [Online], 2016. Available: <https://www.stellar.org/papers/stellar-consensus-protocol.pdf>
11. B. Chase, E. MacBrough, "Analysis of the XRP ledger consensus protocol," arXiv:1802:07242 [cs.DC], February 2018.
12. S. Bano, A. Sonnino, M. Al-Bassam, S. Azouvi, P. McCorry, S. Meiklejohn, and G. Danezis, "SoK: Consensus in the Age of Blockchains," in Proc. of the 1st ACM Conference on Advances in Financial Technologies (AFT '19). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, October 2019, pp. 183–198.

13. G. Wang, Z. Shi, M. Nixon, and S. Han, "SoK: Sharding on Blockchain," in Proc. of the 1st ACM Conference on Advances in Financial Technologies (AFT '19). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, October 2019, pp. 41–61.
14. L. Luu, V. Narayanan, K. Baweja, C. Zheng, S. Gilbert, and P. Saxenna, "A secure sharding protocol for open blockchains," in Proc. of the 2016 ACM SIGSAC Conf. on Computer and Communications Security (CCS '16, New York, NY, USA, 2016, pp. 17-30.
15. The Zilliqa Team, "The Zilliqa technical whitepaper," [Online], 2017. Available: <https://docs.zilliqa.com/whitepaper.pdf>.
16. A. E. Gencer, R. van Renesse, E. G. Sirer, "Service-Oriented Sharding with Aspen," arXiv:1611.06816 [cs.CR], November 2016.
17. N. Durov, "Telegram Open Network," [Online], March 2019. Available: <https://test.ton.org/ton.pdf>.
18. N. Durov, "Telegram Open Network Blockchain," [Online], October 2019. Available: <https://test.ton.org/tblkch.pdf>.
19. E. Kokoris-Kogias, P. Jovanovic, L. Gasser, N. Gailly, E. Syta, and B. Ford, "Omniledger: A secure, scale-out, decentralized ledger via sharding," in 2018 IEEE Symposium on Security and Privacy (SP), 2018, pp. 583-598.
20. G. Danezis, S. Meiklejohn, "Centrally banked cryptocurrencies," arXiv: 1505.06895 [cs.CR], December 2015.
21. J. Wang, H. Wang, "Monoxide: Scale out blockchains with asynchronous consensus zones," in 16th USENIX Symposium on Networked Systems Design and Implementation (NSD '19), 2019, pp. 95-112

Received 07.11.2022.

Accepted 11.11.2022.

Використання шардингу для покращення масштабованості мереж

Блокчейн – це розподілена та децентралізована база даних для зберігання інформації про транзакції. Вона підтримується членами мережі, що гарантують її операції використовуючи криптографічні засоби підтримки консенсусу, що дозволяють членам мережі домовитися щодо унікальної структури блокчейну. Однак, сучасні блокчейн рішення стикаються із проблемами масштабованості через різноманітні проблеми із їх протоколами. У цій статті ми розглядаємо використання шардингу як можливого рішення для подолання технічних обмежень існуючих блокчейн систем і різні форми його практичного втілення у сучасних дослідженнях, викликаних популярністю блокчейну.

Громова Вікторія Вікторівна - Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського".

Борисенко Павло Борисович - Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського".

Gromova Viktoria Viktorivna - assistant Professor, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Faculty of Applied Mathematics, Kyiv, Ukraine.

Borysenko Pavlo Borysovych - assistant Professor, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Faculty of Applied Mathematics, Kyiv, Ukraine

В.П. Малайчук, С.В. Клименко, Н.О. Лисенко

**ІНФОРМАТИВНІСТЬ СТАТИСТИЧНОЇ ОБРОБКИ
ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ВИМІРЮВАНЬ
МОДИФІКОВАНИМ КРИТЕРІЄМ БУША-ВІНДА**

Анотація. Класична математична статистика пропонує перевіряти статистичну однорідність вибірок нормальних випадкових величин комбінованим критерієм Буша Вінда та оцінювати їх зсуви та масштаби формулами апроксимації законів та функцій розподілу Гауса. Пропонується більш простий аналог критерію Буша Вінда, який формується за формулами логістичних випадкових величин. Шляхом проведення комп'ютерних обчислювальних експериментів оцінюється їх ефективність та факторний аналіз впливу розмірів вибірок і видів статистичних закономірностей досліджуваних випадкових величин, їх асиметричності.

Ключові слова: непараметрична статистика, захист інформації, кібербезпека, однорідність експериментальних вибірок вимірювань, критерій Буша Вінда, обчислювальний експеримент.

Постановка проблеми. Помилки комп'ютерної обробки експериментальних вимірювань, які містять інформацію про стан природних і технічних об'єктів та технологічних процесів, порушують їх кібербезпеку. Дуже важливим є застосування ефективних критеріїв прийняття рішень, особливо, коли йдеться про забезпечення інформаційної безпеки. Контрольовані ознаки, наприклад, характеристики клавіатурного почерку, інтенсивність мережевих атак та багато інших, описуються випадковими величинами, закони розподілу яких, як правило, є невідомими [1].

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Класична непараметрична статистика пропонує порівнювати вибірки випадкових величин за ранговими критеріями однорідності, вільних від видів розподілу. Це критерії зсуву вибірок, у яких однакові дисперсії та критерії масштабів (розкиду), якщо у них рівні математичні сподівання. Таких критеріїв існує велика кількість [2]. Використовуючи критерій зсуву Ван-дер-Вардена та критерій масштабу Клотца, Буш і Вінд запропонували комбінований критерій Буша-Вінда. Це асимптотично

оптимальна непараметрична статистика для рівноправного тестування двох нормальних середніх і вибіркової дисперсій в генеральній сукупності [3].

Ван-дер-Варден запропонував алгоритм перевірки гіпотези (припущення) про те, що дві вибірки вимірювань $x_1(k)$ і $x_2(k)$ однорідні шляхом їх порівняння. Спочатку формується єдина вибірка розміром $2n$ $x_{12}(i) = x_1(i) + x_2(i - n)$ і потім усі три вибірки перетворюються в упорядковані за зростанням $x_1^*(k), x_{12}^*(i)$ і $x_2^*(k)$.

Ранги впорядкованих вибірок $x_1^*(k)$ і $x_2^*(k)$, як номери їх в вибірці $x_{12}^*(i)$, визначаються за формулами

$$R_{12}(x_1^*(k/j)) = \sum_{i=1}^{2n} \text{sgn}(x_1^*(k/j) - x_{12}^*(i/j)), k = 1, 2, \dots, n;$$

$$R_{12}(x_2^*(k/j)) = \sum_{i=1}^{2n} \text{sgn}(x_2^*(k/j) - x_{12}^*(i/j)), k = 1, 2, \dots, n,$$

де j – номер обчислювального експерименту, $\text{sgn}(x - a)$ – функція одиничного стрибка, дорівнює 1, якщо $x \geq a$, та дорівнює 0, якщо $x < a$.

Якщо вибірки $x_1(k)$ і $x_2(k)$ однорідні, то однорідні вони також і з впорядкованою вибіркою $x_{12}^*(i)$. Ван-дер-Варден пропонує перевірку того, що у них однакова статистика зсувів. Його критерій формується на апроксимаціях функції нормальних (гаусових) випадкових величин

$$F_a(x) = 1 - 0,852 \exp\left(\frac{x + 1,574}{2,0637}\right)^{2,34}, x \geq 0.$$

Якщо $x \leq 0$, то $F_a(-x) = 1 - F_a(x)$. Її зворотня функція $x = \psi(F_a(x))$ описується формулою

$$\psi(F_a(x)) = 4,91 \left[(F_a(x))^{0,14} - (1 - F_a(x))^{0,14} \right].$$

Емпіричні неперервні функції розподілу ймовірності $F^*(x)$ експериментальних вибірок формуються за формулою

$$F(x) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \text{sgn}(x - x^*(i)).$$

Внаслідок, ранги $R(x^*(k))$ функціонально зв'язані з функцією розподілу ймовірності

$$F^*(x^*(k)) = \frac{1}{n} R(x^*(k)).$$

Використовуючи експериментальні ранги $R_{12}(x_1^*/j)$ і $R_{12}(x_2^*/j)$, Ван-дер-Варден запропонував критерій перевірки рівності зсувів визначати за зворотною емпіричною функцією

$$\psi(F_a^*(x(k))) = 4,91 \left[(F_a^*(x(k)))^{0,14} - (1 - F_a^*(x(k)))^{0,14} \right].$$

Це випадкові величини з нульовим математичним сподіванням і дисперсією

$$D_a[\psi_a(x^*(k))] = \frac{1}{2n-1} \sum_{i=1}^{2n} \psi_a^2\left(\frac{i}{2n+1}\right).$$

Критерій Ван-дер-Вардена описується за формулою

$$B_a(j) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \psi_a\left(\frac{R(x^*(k/j))}{2n+1}\right) \left(\sqrt{\frac{1}{2n-1} \sum_{i=1}^{2n} \psi_a^2\left(\frac{i}{2n+1}\right)} \right)^{-1}$$

Клотц запропонував критерії для перевірки гіпотези про рівність в двох вибірках показників масштабу (вибіркових дисперсій) на основі емпіричних оцінок квадрату зворотної функції

$$K_a(j) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \psi_a^2\left(\frac{R(x(k/j))}{2n+1}\right) - \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^{2n} \psi_a^2\left(\frac{i}{2n+1}\right) \left(\sqrt{\frac{1}{2n-1} \sum_{i=1}^{2n} \psi_a^4\left(\frac{i}{2n+1}\right)} \right)^{-1},$$

де під радикалом дисперсія $\psi_a^2\left(\frac{R(x(k/j))}{2n+1}\right)$.

Буш і Вінд запропонували перевіряти гіпотезу про рівність зсувів і масштабів двох вибірок $x_1(k/j)$ і $x_2(k/j)$ за двомірною функцією модуль критеріїв Ван-дер-Вардена та Клотца

$$B_a(j) = 2 \left[\ln \left(\frac{1}{2(1 - F_a(|B_a(j)|))} \right) + \ln \left(\frac{1}{2(1 - F_a(|K_a(j)|))} \right) \right].$$

Предбачається, що якщо у досліджуваних вибірках $x_1(k)$ і $x_2(k)$ однакові математичні сподівання та дисперсії, тоді критерій Буша-Вінда – це випадкові величини, які описуються законом розподілу хі-квадрат з чотирма ступенями свободи. Якщо $n < 30$, тоді значення порогів рівняння B_0 представлені у таблиці 1.

Значення порогових значень B_0 для критерія Буша-Вінда

$n \setminus n$	110	115	220	225	330
00,45	88,05	88,97	99,05	99,09	99,24

Формулювання мети дослідження. Розглянемо задачу перевірки гіпотези про статистичну однорідність двох експериментальних вибірок вимірювань, якщо критерії Ван-дер-Вардена і Клотца, які формуються за апроксимаціями зворотних функцій Гауса, змінити їх аналогами – зворотними функціями логістичних випадкових величин. Проведемо обчислювальні експерименти та дослідимо інформативність класичного критерію Буша-Вінда і його аналога, який формується на логістичній зворотній функції розподілу.

Виклад основного матеріалу. Сформуємо вибірки випадкових величин з трьома видами статистичних закономірностей - логістичні, релеєвські і експоненціальні з однаковими математичними очікуваннями. Оцінимо за критерієм Буша-Вінда їх однорідність. Функції розподілу ймовірності описуються формулами

$$F_1(x) = \left(1 + \exp \left(- \frac{\pi}{\sqrt{3}} \frac{x-a}{\sigma} \right) \right)^{-1}, \quad F_2(x) = 1 + \exp \left(- \frac{x^2}{2b^2} \right), \quad F_3(x) = 1 + \exp \left(- \frac{x}{\lambda} \right).$$

Математичні очікування таких вибірок дорівнюють

$$M[x_1] = a, \quad D[x_1] = \sigma^2; \quad M[x_2] = \sqrt{\frac{\pi}{2}} b, \quad D[x_2] = \frac{4-\pi}{2} b^2; \quad M[x_3] = \lambda, \quad D[x_3] = \lambda^2.$$

Використовуючи програмні генератори $\xi_1(k)$, $\xi_2(k)$, $\xi_3(k)$ вибірок випадкових величин з рівномірним законом розподілу $w(\xi) = 1$ і функцією розподілу вибірок $F(\xi) = \xi$, сформуємо вибірки з логістичним $x_1(k)$, релеєвським $x_2(k)$ і експоненціальним $x_3(k)$ законами розподілу ймовірності.

Закон збереження ймовірності при перетворенні випадкових величин $\xi(k)$ в $x(k)$ описується диференціальним рівнянням $w[\xi] d\xi = W(x) dx$. Вирішивши його, отримаємо формулу функціональної залежності $\xi(k) = F(x(k))$. Використовуючи її обернену функцію $x(k) = \Psi(\xi(k))$, отримаємо формули перетворення вибірки $\xi(k)$ у вибірку $x(k)$. Це математичні моделі програмних генераторів вибірок випадкових величин із заданими статистичними закономірностями

$$x_1(k) = a + \sigma \frac{\sqrt{3}}{\pi} \ln \left(\frac{\xi_1(k)}{1 - \xi_1(k)} \right), \quad x_2(k) = \sqrt{2b^2 \ln \left(\frac{1}{1 - \xi_2(k)} \right)}, \quad x_3(k) = \lambda \ln \left(\frac{1}{1 - \xi_3(k)} \right).$$

Проведемо обчислювальні експерименти і оцінимо інформативність критерію Буша - Вінда і його модифікованого аналогу. Класичний критерій Буша-Вінда формується по зворотній функції Гауса. Аналогом її може бути зворотна логістична функція

$$\psi_x(F(x)) = \frac{\sqrt{3}}{\pi} \ln \left(\frac{F(x)}{1 - F(x)} \right),$$

яка записується у вигляді

$$\psi_x \left(\frac{R \left(x^* \left(\frac{k}{j} \right) \right)}{2n + 1} \right) = \frac{\sqrt{3}}{\pi} \ln \left(\frac{R \left(x^* \left(\frac{k}{j} \right) \right)}{2n + 1 - R \left(x \left(\frac{k}{j} \right) \right)} \right).$$

Якщо в формулах $B_a(j)$ и $K_a(j)$ функцію $\psi_x \left(\frac{R \left(x \left(\frac{k}{j} \right) \right)}{2n + 1} \right)$ замінити на

функцію $\psi_x \left(\frac{R \left(x \left(\frac{k}{j} \right) \right)}{2n + 1} \right)$, то отримаємо

$$B_x(j) = \frac{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \psi_x \left(\frac{R \left(x^* \left(\frac{k}{j} \right) \right)}{2n + 1} \right)}{\sqrt{\frac{1}{2n - 1} \sum_{i=1}^{2n} \psi_x^2 \left(\frac{i}{2n + 1} \right)}}, \quad K_x(j) = \frac{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \psi_x^2 \left(\frac{R \left(x \left(\frac{k}{j} \right) \right)}{2n + 1} \right) - \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^{2n} \psi_x^2 \left(\frac{i}{2n + 1} \right)}{\sqrt{\frac{1}{2n - 1} \sum_{i=1}^{2n} \psi_x^4 \left(\frac{i}{2n + 1} \right)}}.$$

В формулі $B_a(j)$ функції $F_a(B(j))$ і $F_a(K(j))$ на функції $F_x(B_x(j))$ і $F_x(K_x(j))$, то аналог критерію Буша-Вінда $B_x(j)$ визначимо за формулами

$$F_x(|B_x(j)|) = \frac{1}{1 + \frac{\pi}{\sqrt{3}} \exp(-|B_x(j)|)},$$

$$F_x(|K_x(j)|) = \frac{1}{1 + \frac{\pi}{\sqrt{3}} \exp(-|K_x(j)|)},$$

$$B_x(j) = 2 \left[\ln \left(\frac{0,5 \left(1 + \frac{\pi}{\sqrt{3}} \exp(-|B_x(j)|) \right)}{\frac{\pi}{\sqrt{3}} \exp(-|B_x(j)|)} \right) + \ln \left(\frac{0,5 \left(1 + \frac{\pi}{\sqrt{3}} \exp(-|K_x(j)|) \right)}{\frac{\pi}{\sqrt{3}} \exp(-|K_x(j)|)} \right) \right].$$

Проведемо N обчислювальних експериментів та оцінимо ефективність критеріїв $B_a(j)$ та $B_x(j)$. Отримаємо кількості N_a і N_x виконання нерівностей $B_a(j) < B_0$ і $B_x(j) < B_0$. Їх відношення $\frac{N_a}{N} = P_a^*$ і $\frac{N_x}{N} = P_x^*$ - оцінки ймовірностей прийняття вірних рішень про статистичну однорідність досліджуваних вибірок вимірювань.

Перший обчислювальний експеримент. Проведемо дослідження статистичних закономірностей показників $B_a(j)$ та $B_x(j)$. Обчислимо мінімальні B_{\min} , максимальні B_{\max} та середні значення \bar{B} , вибіркові дисперсії D_B^* , оцінки емпіричної ймовірності вірного розпізнавання однорідності вибірок P_{BP}^* та побудуємо гістограми досліджуваних показників $B_a(j)$ та $B_x(j)$.

Статистичні показники критерію Буша-Вінда $\bar{B}_a(j)$ та його аналогу $\bar{B}_x(j)$ для трьох видів однорідних некорельованих випадкових величин довжиною $n = 100$ представлені в таблиці 2.

Таблиця 2

Статистичні показники $\bar{B}_a(j)$ та $\bar{B}_x(j)$ для трьох видів однорідних некорельованих випадкових величин довжиною $n = 100$

Показники	Логістичні в.в.		Релеєвські в.в.		Експоненціальні в.в.	
	$\bar{B}_a(j)$	$\bar{B}_x(j)$	$\bar{B}_a(j)$	$\bar{B}_x(j)$	$\bar{B}_a(j)$	$\bar{B}_x(j)$
B_{\max}	14.116	12.624	15.386	13.824	13.857	12.941
B_{\min}	0.08	0.039	0.155	0.036	0.016	0.114
\bar{B}	3.41	3.748	3.449	3.754	3.394	3.736
D_B^*	5.441	5.283	5.736	5.349	4.989	4.871
P_{BP}^*	0.992	0.997	0.987	0.992	0.993	0.998

Модифікований показник Буша-Вінда $\bar{B}_x(j)$ незначно відрізняється від класичного показника $\bar{B}_a(j)$, спостерігається зміщення середнього значення в більшу сторону (на 9%). Вибіркова дисперсія $\bar{B}_x(j)$ менше від вибіркової

дисперсії $\bar{B}_a(j)$ (в середньому на 4%), а ймовірність прийняття вірного рішення більше на 0,5 %.

При довжині вибірок $n > 30$ для класичного критерію Буша-Вінда справедлива апроксимація розподілом хі-квадрат з $f = 4$ ступенями свободи. Наведено на рис.1 гістограми показників класичного критерія Буша-Вінда $\bar{B}_a(j)$ та його аналога $\bar{B}_n(j)$ разом з кривою закону розподілу хі-квадрат з чотирма ступенями свободи. Гістограми показників $\bar{B}_a(j)$ та $\bar{B}_n(j)$ побудуємо для трьох видів досліджуваних однорідних некорельованих вибірок вимірювань довжиною $n = 100$.

При великих розмірах вибірок $n > 100$ запропонований аналог критерію Буша-Вінда не дуже значно, але більш ефективний, ніж класичний критерій.

Другий обчислювальний експеримент. При $n > 30$ показники критерію Буша-Вінда – це випадкові величини, які описуються законом розподілу хі-квадрат з чотирма ступенями свободи. Перевіримо гіпотези про закони розподілу ймовірності досліджуваних показників $B_a(j)$ та $B_n(j)$ за критерієм хі-квадрат [4].

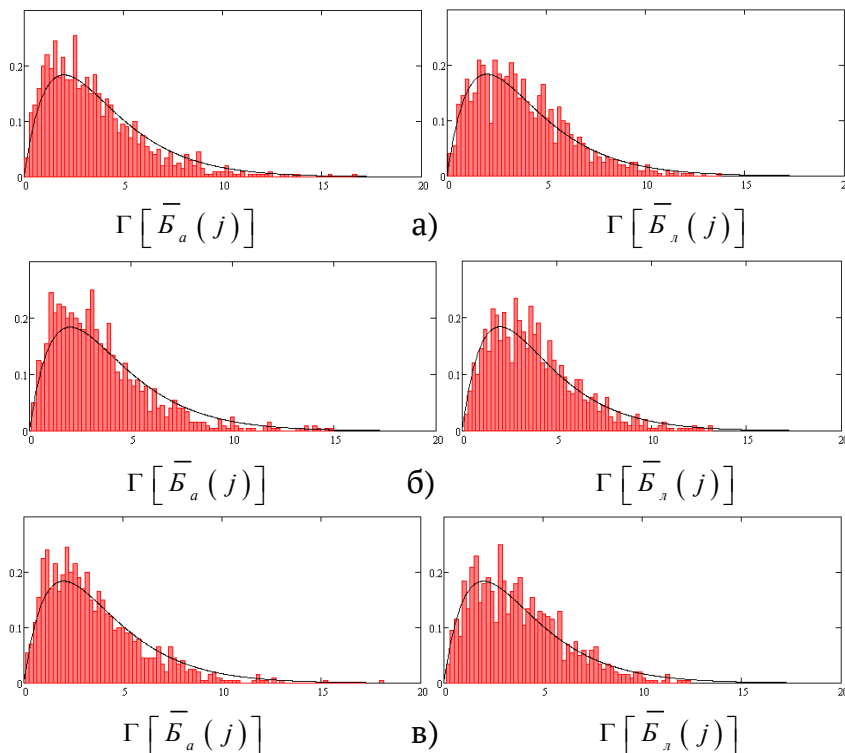


Рисунок 1 - Крива закону розподілу хі-квадрат з чотирма ступенями свободи та гістограми показників $\bar{B}_a(j)$ і $\bar{B}_n(j)$ для вибірок а) логістичних, б) релеєвських та в) експоненціальних випадкових величин ($n = 100$)

Задамо кількість інтервалів гістограми L та обчислимо інтервал дискретизації

$$\Delta x = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{L},$$

де x_{\min} - мінімальне значення вибірки вимірювань та x_{\max} - максимальне значення вибірки вимірювань.

Гістограмні числа k_1, k_2, \dots, k_L - це кількість вимірювань досліджуваної вибірки, які влучили в інтервали дискретизації $x_{0i} \pm \Delta x / 2$, где $x_{0i} = x_{01} + (i-1)\Delta x$, $x_{01} = x_{\min} + \Delta x / 2$. Якщо використати функцію Хевісайда (одиничного стрибка) для визначення гістограмних чисел, то алгоритм їх визначення буде мати вигляд

$$k_i = \sum_{k=1}^n [\text{sgn}(x_k - x_{0i} + \Delta x / 2) - \text{sgn}(x_k - x_{0i} - \Delta x / 2)],$$

де $\text{sgn}(x)$ - функція одиничного стрибка приймає лише два значення: $\text{sgn}(x) = 0$, якщо $x < 0$, та $\text{sgn}(x) = 1$, якщо $x \geq 0$.

Якщо закон розподілу вимірювань $W(x)$, то ймовірності влучення вимірювань в i -тий інтервал гістограми p_i визначаються за формулою

$$p_i = \int_{x_{0i} - \frac{\Delta x}{2}}^{x_{0i} + \frac{\Delta x}{2}} W(x) dx \approx W(x_{0i}) \Delta x, \quad i = 1, 2, 3, \dots, L,$$

де x_{0i} - центр i -го інтервалу гістограми.

Очевидно, що відносні гістограмні числа $p_i^* = \frac{k_i}{n}$ - є оцінками ймовірностей p_i . Якщо ймовірності p_i визначені за гіпотетичним законом розподілу $W(x)$, то зважена сума квадратів різниці p_i и p_i^* може бути показником близькості $W(x)$ та невідомого закону досліджуваної вибірки вимірювань

$$z = \sum_{i=1}^L \left(\frac{p_i^* - p_i}{\sqrt{D_i}} \right)^2 = \sum_{i=1}^L \frac{(k_i - np_i)^2}{np_i(1 - p_i)}.$$

Рішення про вірність висунутої гіпотези слід приймати шляхом порівняння обчисленого значення показника z з деяким граничним значенням z_0 : якщо $z \leq z_0$, то слід вважати, що гіпотеза вірна, якщо $z > z_0$, то гіпотезу слід відхилити та запропонувати іншу. Поріг порівняння z_0 визначають за правилом Неймана - Пірсона із умови: ймовірність помилки 1-го роду не повинна

перевищувати деяке граничне значення P_0 (наприклад, $P(H/B) \leq 0.05$). Приблизне значення z_0 можна оцінити за формулою

$$z_0 = L \left(1 - \frac{2}{9L} + \Psi(P) \sqrt{\frac{2}{9L}} \right)^3,$$

де $\Psi(x)$ - функція, зворотна інтегралу ймовірності Гауса. Якщо декілька гіпотез задовільняють нерівності $z \leq z_0$, то треба обирати гіпотезу, для якої z мінімально [4].

Перевіriamo гіпотезу про закон розподілу хі-квадрат з чотирма ступенями свободи для показників класичного критерія Буша-Вінда $B_a(j)$ та його модифікованого аналога $B_n(j)$.

Таблиця 3

Значення показників близькості z , граничні значення z_0 та результати роботи критерію хі-квадрат для $B_a(j)$ та $B_n(j)$ за трьома видами однорідних некорельованих випадкових величин довжиною $n = 100$

Довжина вибірок	Показники близькості та граничні значення	Логістичні в.в.		Релеєвські в.в.		Експоненціальні в.в.	
		$B_a(j)$	$B_n(j)$	$B_a(j)$	$B_n(j)$	$B_a(j)$	$B_n(j)$
100	z	16.951	10.998	22.34	17.107	23.409	18.808
	z_0	21.013		22.78		28.86	
50	z	17,462	6,858	21,332	8,734	16,555	11,945
	z_0	19,66		22,35		27,58	
30	z	10,462	8,804	19,004	12,011	16,273	14,53
	z_0	21,43		23,07		24,98	

Як видно з таблиці 3, показники Буша-Вінда $B_a(j)$ та $B_n(j)$ задовільняють умові про те, що вони описуються законом розподілу хі-квадрат з чотирма ступенями свободи (за критерієм хі-квадрат $z \leq z_0$). Аналог критерію Буша-Вінда демонструє менші показники близькості z , що свідчить

про те, що висунута гіпотеза про закон розподілу ймовірності підходить йому краще, ніж класичному показнику $B_a(j)$. Отже, модифікований показник $B_n(j)$ з більшою ймовірністю описується законом розподілу хі-квадрат з чотирма ступенями свободи, ніж класичний варіант критерію, з використанням апроксимації нормальної функції розподілу.

Третій обчислювальний експеримент. Практична значущість критерія Буша-Вінда щільно пов'язана з довжиною вибірок вимірювань. Якщо критерій характеризується високими значеннями ймовірностей вірного розпізнавання навіть в умовах обмеженості вхідних даних, то його можна рекомендувати для практичного застосування. Перевіримо ефективність класичного та модифікованого критеріїв Буша-Вінда, застосовуючи короткі вибірки вимірювань $n = 10; 20$.

Обчислимо статистичні характеристики показників $B_a(j)$ та $B_n(j)$ та представимо їх в таблиці 4. Побудуємо гістограми досліджуваних показників $\bar{B}_a(j)$ та $\bar{B}_n(j)$ для трьох видів однорідних некорельованих коротких вибірок вимірювань. На рис. 2 представлені гістограми показників класичного критерія Буша-Вінда $\bar{B}_a(j)$ та його аналога $\bar{B}_n(j)$ разом з кривою закону розподілу хі-квадрат з чотирма ступенями свободи для довжини вибірок $n = 10$.

Таблиця 4

Статистичні показники $\bar{B}_a(j)$ та $\bar{B}_n(j)$ критерію Буша-Вінда для трьох видів однорідних некорельованих випадкових величин довжиною $n = 10$

	Логістичні в.в.		Релеєвські в.в.		Експоненціальні в.в.	
	$\bar{B}_a(j)$	$\bar{B}_n(j)$	$\bar{B}_a(j)$	$\bar{B}_n(j)$	$\bar{B}_a(j)$	$\bar{B}_n(j)$
B_{\max}	11,147	9,33	9,797	8,628	8,463	7,958
B_{\min}	0,159	0,039	0,209	0,345	0,293	0,45
\bar{B}	3,225	3,494	3,402	3,657	3,523	3,807
D_B^*	4,197	3,859	4,805	4,435	4,376	4,263
P_{BP}^*	0,992	0,997	0,991	0,997	0,992	0,999

Статистичні показники $\bar{B}_a(j)$ та $\bar{B}_n(j)$ критерію Буша-Вінда для трьох видів однорідних некорельованих випадкових величин довжиною $n = 20$

	Логістичні в.в.		Релеєвські в.в.		Експоненціальні в.в.	
	$\bar{B}_a(j)$	$\bar{B}_n(j)$	$\bar{B}_a(j)$	$\bar{B}_n(j)$	$\bar{B}_a(j)$	$\bar{B}_n(j)$
B_{\max}	14,47	11,191	13,689	11,684	13,497	12,353
B_{\min}	0,036	0,059	0,15	0,005	0,029	0,115
\bar{B}	3,464	3,789	3,376	3,668	3,395	3,693
D_B^*	4,822	4,409	4,962	4,557	4,77	4,572
P_{BP}^*	0,992	0,998	0,991	0,997	0,995	0,997

При порівнянні даних таблиці 2 (для довгих вибірок вимірювань, $n = 100$) з даними таблиць 3 та 4 (для коротких вибірок вимірювань, $n = 10$ у 20) можна зробити наступні висновки.

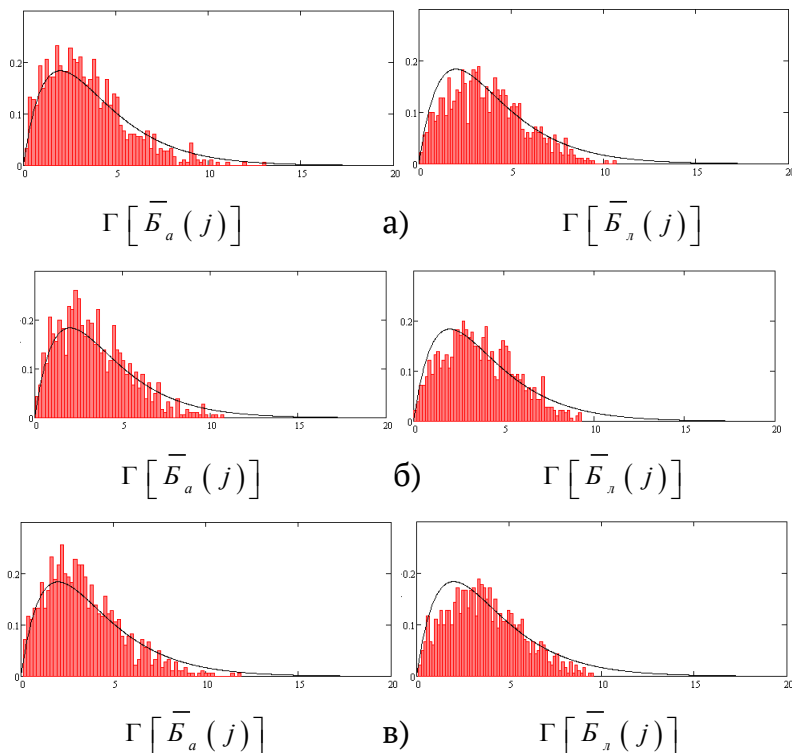


Рисунок 2 - Графік закону розподілу χ^2 з чотирма ступенями свободи та гістограми показників $\bar{B}_a(j)$ і $\bar{B}_n(j)$ для вибірок а) логістичних, б) релеєвських та в) експоненціальних випадкових величин ($n = 10$)

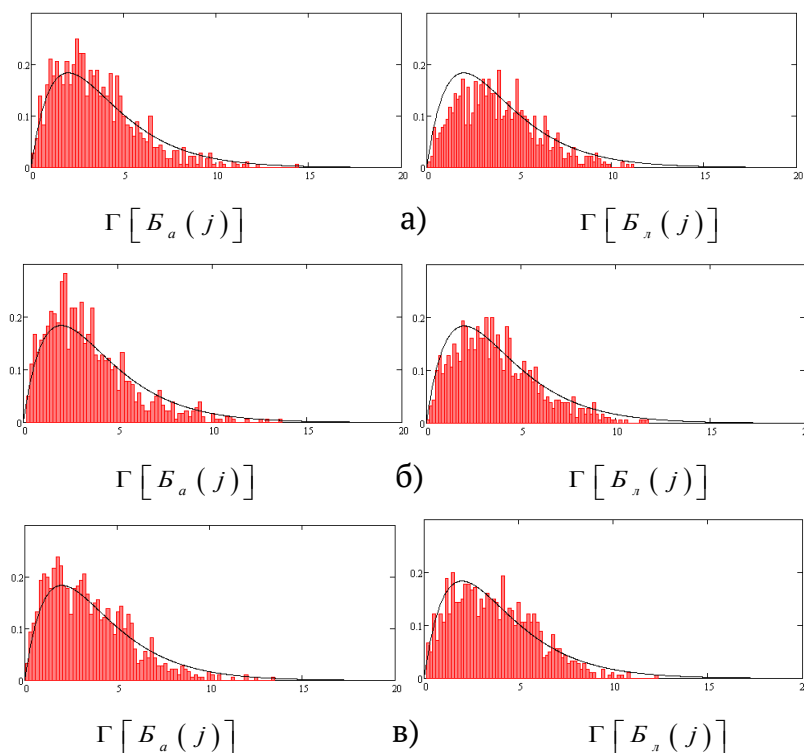


Рисунок 3 - Графік закону розподілу хі-квадрат з чотирма ступенями свободи та гістограми показників $\bar{B}_a(j)$ і $\bar{B}_n(j)$ для вибірок а) логістичних, б) релеєвських та в) експоненціальних випадкових величин ($n = 20$)

При використанні вибірок вимірювань довжиною $n = 10; 20$ середні значення класичного і модифікованого показників критерію Буша-Вінда залишаються без суттєвих змін і відхиляються від середніх значень, отриманих при використанні вибірок довжиною $n = 100$, не більше ніж на 7%. При зменшенні довжини вибірок вимірювань звужується діапазон розмаху $B_{\max} - B_{\min}$, а вибіркові дисперсії показників $\bar{B}_a(j)$ і $\bar{B}_n(j)$ зменшуються в середньому на 16%.

Особливо слід звернути увагу на те, що значення ймовірностей прийняття вірного рішення, як за класичним критерієм Буша-Вінда, так і за його аналогом, при застосуванні коротких вибірок вимірювань ($n = 10; 20$) залишаються на такому ж високому рівні, як і при застосуванні довгих вибірок вимірювань випадкових величин ($n = 100$).

Отже, можна зробити висновок про ефективність класичного та модифікованого критеріїв Буша-Вінда при застосуванні коротких вибірок вимірювань ($n = 10; 20$).

Висновки. Запропонований в роботі аналог критерію Буша-Вінда відрізняється від класичного критерію зменшенням обчислювальної складності зі збереженням ефективності. Емпіричні ймовірності розпізнавання однорідності вибірок, які отримані шляхом проведення обчислювальних експериментів для вибірок логістичних, релеєвських та експоненціальних випадкових величин, свідчать про непараметричність, високу чутливість та можливість застосування критерію в умовах обмеженості експериментальних даних.

Модифікований критерій Буша-Вінда характеризується високою інформативністю та може бути рекомендований для статистичної обробки експериментальних вимірювань.

ЛІТЕРАТУРА

1. Хиценко В.Е. Ранговые критерии в задачах защиты информации // Доклады ТУСУРа, № 1 (25), часть 2, июнь 2012, С. 29-33.
2. Кобзарь А.И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 816 с.
3. Bush J.R., Wieand H.S. An asymptotically optimal nonparametric statistic for testing equality of two normal population means and variances // Commun. Stat.-Theor. Meth. 1982. V.11, №1. P. 1-12.
4. Малайчук В.П. Статистична теорія оцінювання [Текст]: Навчальний посібник / В.П. Малайчук, Н.О. Лисенко. – Дніпропетровськ: РВВ ДНУ, 2009. – 84 с.

REFERENCE

1. Khitsenko V.E. Rank criteria in information security tasks // Reports of TUSUR, No. 1 (25), part 2, June 2012, pp. 29-33.
2. Kobzar A. I. Applied mathematical statistics/ A. And yu Kobzar - M. : FIZMATLIT, 2006. - 816 p.
3. Bush J.R., Wieand H.S. An asymptotically optimal nonparametric statistic for testing equality of two normal population means and variances // Commun. Stat.-Theor. Meth. 1982. V.11, №1. P. 1-12.
4. Malaychuk V.P. Statistical theory of estimation [Text]: Manual / V.P. Malaychuk, N.O. Lysenko. - Dnipropetrovsk: RVV DNU, 2009. - 84 p.

Received 10.11.2022.

Accepted 14.11.2022.

Informativeness of statistical processing of experimental measurements by the modified Bush-Wind criterion

The use of effective decision-making criteria is very important, especially when it comes to ensuring information security. Controlled attributes, such as keyboard handwriting characteristics, intensity of network attacks, and many others, are described by

random variables whose distribution laws are usually unknown. Classical nonparametric statistics suggests comparing samples of random variables by rank-based homogeneity criteria that are independent of the type of distribution. Using the Van der Warden shift criterion and the Klotz scale criterion, Bush and Wind proposed the combined Bush-Wind criterion. It is an asymptotically optimal nonparametric statistic for equal testing of two normal means and sample variances in a population. The article considers the problem of testing the hypothesis of statistical homogeneity of two experimental measurement samples if the Van der Warden and Klotz criteria, which are formed by approximations of the inverse Gaussian functions, are replaced by their analogues - the inverse functions of logistic random variables. Computational experiments are carried out and the informativeness of the classical Bush-Wind criterion and its analog, which is formed on the logistic inverse distribution function, is investigated. The analog of the Bush-Wind criterion proposed in this paper differs from the classical criterion by reducing computational complexity while maintaining efficiency. The empirical probabilities of recognizing the homogeneity of samples, obtained by conducting computational experiments for samples of logistic, Rayleigh and exponential random variables, indicate nonparametricity, high sensitivity and the possibility of applying the criterion in conditions of limited experimental data. The modified Bush-Wind criterion is characterized by high information content and can be recommended for statistical processing of experimental measurements.

Малайчук Валентин Павлович - професор кафедри кібербезпеки та комп'ютерно-інтегрованих технологій, фізико-технічний факультет, Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара.

Клименко Світлана Володимирівна - доцент кафедри кібербезпеки та комп'ютерно-інтегрованих технологій, фізико-технічний факультет, Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара.

Лисенко Наталія Олександрівна - доцент кафедри кібербезпеки та комп'ютерно-інтегрованих технологій, фізико-технічний факультет, Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара.

Malaichuk Valentin Pavlovich - professor of the department of cybersecurity and computer-integrated technologies, faculty of physics and technology, Oles Honchar Dnipro national university.

Klymenko Svitlana Volodimirivna - docent of the department of cybersecurity and computer-integrated technologies, faculty of physics and technology, Oles Honchar Dnipro national university.

Lysenko Nataliia Oleksandrivna - docent of the department of cybersecurity and computer-integrated technologies, faculty of physics and technology, Oles Honchar Dnipro national university.

І.О. Калініна, О.П. Гожий, В.В. Нечахін, С.І. Шиян

**ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМ
ЗІ СКЛАДНИМ СТОХАСТИЧНИМ ПРОЦЕСОМ ОБРОБКИ ДАНИХ
ЗА ДОПОМОГОЮ КОЛЬОРОВИХ МЕРЕЖ ПЕТРІ**

Анотація. В статті розглядається процес побудови імітаційних моделей систем з стохастичним процесом обробки даних на основі кольорових мереж Петрі. Представлено формальний опис моделей на основі кольорових мереж Петрі. Для імітаційного моделювання задач обробки даних обґрунтовано використання часових мереж Петрі, що дозволяє ви значити і детально описати часові проміжки процесу, який моделюється. Приведено алгоритм побудови імітаційних моделей на основі кольорових мереж Петрі. Визначено особливості застосування часових мереж Петрі при побудові імітаційних моделей зі складними стохастичними процесами обробки даних. Для завдання випадкових величин використані спеціальні функції. Наведено перелік функцій з їх докладним описом і діапазонами допустимих значень для вхідних параметрів. В якості прикладу розглянуто побудова імітаційної моделі процесу роботи центру обробки заявок комерційної фірми. Модель була побудована в середовищі CPN Tools. Визначені та досліджені параметри системи, змінні, функції та параметри моделі. Для накопичення статистики про результати роботи моделей було застосовано метод накопичення інформації в позиціях. Представлено аналіз результатів імітаційного моделювання процесу роботи центру обробки заявок комерційної фірми.

Ключові слова: Моделювання, імітаційна модель, кольорові мережі Петрі, стохастичний процес, CPN Tools, центр обробки заявок.

Вступ

Моделювання систем є найбільш ефективним способом дослідження складних систем різного призначення, – технічних, економічних, екологічних, соціальних, інформаційних, на різних етапах їх життєвого циклу, проектування, а також в процесі експлуатації [1]. Сучасні технології моделювання не тільки значно полегшили і прискорили процес побудови та дослідження моделей складних систем, але й значно підвищили ефективність моделювання. Можливості систем моделювання постійно розширюються, тому що постійно з'являються найновіші методи та технології моделювання. Це сприяє, широко-

му розповсюдженню різноманітних методів та підходів моделювання. Потреба у розв'язанні задач моделювання систем виникає не тільки у дослідників та науковців, але й у проєктувальників та виробників під час проєктування та моделювання складних систем. Математичні моделі та методи моделювання використовуються при створенні інформаційних систем різного типу: систем прийняття рішень, систем автоматизованого керування, систем штучного інтелекту та інш..

Одним з сучасних методів побудови моделей складних систем є візуальне моделювання на основі кольорових мереж Петрі. Використання мереж Петрі, як інструмента графічного і математичного моделювання складних систем та процесів останнім часом отримало широке розповсюдження. Мережа Петрі (PN) це орієнтований дводольний граф з двома типами вузлів: позиціями (представлені колами), та переходами (представлені прямокутниками). Позиції в мережах Петрі містять довільну кількість маркерів (*токенів*). Розподіл маркерів над місцями називається *маркуванням*. Існують різні типи мереж Петрі: стохастичні мережі Петрі (SPN), часові мережі Петрі (TPN), кольорові мережі Петрі (CPN), нечіткі мережі Петрі та інші [2-5].

Кольорові мережі Петрі є одним з ефективних інструментів імітаційного моделювання. Кольори призначені для врахування змінних різних типів. Таким чином при моделюванні можливо враховувати особливості даних різних дискретних систем. В поєднанні з можливостями імітаційного моделювання кольорові мережі Петрі надають потужний інструмент для дослідження складних дискретних систем.

Постановка проблеми

Метою даної роботи є дослідження процесу імітаційного моделювання систем зі складним стохастичним процесом обробки даних за допомогою кольорових мереж Петрі.

Аналіз останніх досліджень

Застосування мереж Петрі, як інструмента графічного і математичного моделювання складних систем та процесів засновано на використанні орієнтованого дводольного графу з двома типами вузлів: позиціями та переходами. Дуги графа з'єднують позиції і переходи таким чином, що позиції можуть бути пов'язані тільки з переходами і навпаки. Позиції в мережі Петрі можуть містити дискретне число маркерів. Розподіл маркерів над місцями називається *маркуванням* [6]. Спочатку мережі Петрі служили для опису паралельних систем з точки зору причинно-наслідкових зв'язків без обліку часу [7]. Потім розвиток

теорії мереж Петрі дозволив розширити та доповнити формальний апарат мереж Петрі часовими концепціями [8]. Для моделювання складних систем та процесів різної природи використовуються різні модифікації [9-11]. В роботах [12-14] мережі Петрі різних типів були використані для побудови систем різного призначення. Задача моделювання систем зі складним стохастичним процесом обробки даних є актуальною, тому що велика кількість складних технічних систем обробляють стохастичні дані і потребують коректного представлення та моделювання. Для вирішення задач розробки імітаційних моделей із складним процесом обробки даних необхідно розробити метод побудови моделей на основі кольорових мереж Петрі [15-17].

Результати дослідження та їх обговорення

При побудові імітаційних моделей для систем з складним стохастичним процесом обробки заявок доцільно використовувати кольорові мережі Петрі.

Модель на основі кольорової мережі Петрі має наступний вигляд:

$$PN_{\mathbf{1}col} = \{S, T, F, M_{\mathbf{1}0}, Type, Type(T, Type" (* M, In)\}$$

де $S = \{s_1, s_2, \dots, s_g\}$ – множина станів; $T = \{t_1, t_2, \dots, t_v\}$ – множина переходів; F – множина дуг, яка включає підмножини вхідних та вихідних дуг по відношенню до переходу; $M_{\mathbf{0}}$ – множина, в якій задається початкове маркування мережі Петрі, $Type$ – множина типів даних; $Type_T$ – множина, яка відображає доступну множину типів даних у позиціях мережі; $Type_M$ – множина типів маркерів, що ініціюють перехід; In – множина умов ініціації переходів.

Для моделювання задач обробки даних також можливе використання часових мереж Петрі, що є вдосконаленням мережі Петрі і пов'язано з додаванням до кожного з переходів інформації про часові межі. Це дозволяє визначити і детально описати часові проміжки процесу, який моделюється. Часова мережа описується за допомогою наступного виразу:

$$N_{time} = \{S, T, F, Eft, Lft, M_{\mathbf{0}}\}$$

де Eft, Lft – функції, що ставляться у відповідність кожному з переходів і визначають нижню (Eft) та верхню (Lft) часові межі, які задовольняють наступним умовам: $Eft \leq Lft$. Модель, яка враховує пріоритети, включає множину пріоритетів для кожного з переходів і має наступний вигляд:

$$PN_{\mathbf{1}pr}(time) = \{S, T, F, Eft, Lft, PR, M_{\mathbf{1}0}\},$$

де $PR = \{Pr_1, Pr_2, \dots, Pr_v\}$ – множина пріоритетів, а Pr_{1-v} – величини пріоритетів.

Алгоритм побудови імітаційних моделей на основі кольорових мереж Петрі складається з наступних кроків:

1. Визначається множина станів $S = \{s_1, s_2, \dots, s_g\}$, та множина переходів $T = \{t_1, t_2, \dots, t_v\}$, які відповідають процесу, що моделюється.

2. Визначається F , та задається початкове маркування мережі M_0 .

3. Визначаються можливі зміни ситуації, та відображаються у $Type_T$ множині типів у позиціях мережі.

4. Визначаються маркери, які ініціюють переходи, і умови ініціалізації переходів In (часові).

5. Остаточна формується структура мережі.

На основі кольорових мереж Петрі доцільно розробляти імітаційні моделі нелінійних та нестационарних процесів генерації та обробки даних, приймати рішення на підставі моделювання, а також перевіряти результати моделювання.

При побудові моделей реальних систем потрібно дослідження динаміки процесу і визначення часових характеристик роботи моделі. Реальні процеси розвиваються в часі, тому і математичний апарат, призначений для їх моделювання, повинен мати можливість подання подій у часі. Тому моделі, що описує тільки внутрішню структуру та логіку, часто буває недостатньо. Для моделювання процесів у часі, мережі Петрі розширюються введенням часових міток в маркерах. Часова мітка показує, з якого моменту часу маркер буде доступний в позиції. При визначенні активності переходів в часовій мережі Петрі враховуються тільки ті маркери, у яких значення часу менше або дорівнює поточному часу моделі [1].

При побудові моделі реальної системи часові інтервали не завжди можуть бути представлені у вигляді певного числа, замість цього в моделях час майже завжди задається в вигляді випадкової величини, що розподілена по деякому закону. Для завдання випадкових величин можуть бути використані спеціальні функції. Перелік функцій з їх докладним описом і діапазонами допустимих значень для вхідних параметрів представлений в таблиці 1.

Приклад. Необхідно побудувати модель, що дозволяє аналізувати роботу центру обробки заявок комерційної фірми з багатоканальним зв'язком. Існує багатоканальний телефонний номер, на який надходять дзвінки користувачів з питаннями. Так як дзвінків багато, деяким користувачам доводиться чекати, поки один з операторів звільниться. Користувачі розділені на групи за пріоритетами (N груп), для кожної групи реалізована окрема черга. У центрі обробки заявок працюють кілька операторів (M людей). Вільний оператор повинен вибрати користувача з найбільшим пріоритетом у черзі. Кожен користувач зверта-

ється в центр обробки заявок з однією з K проблем. Кожній проблемі відповідає час, за яке оператор може знайти рішення $KMin$ і $KMax$ для рівномірного розподілу часу відповіді та KN і KV для нормально розподіленого часу відповіді. У разі, якщо кількість користувачів, які одночасно очікують дзвінка, досягло величини $UMax$, то всім наступним користувачам буде відмовлено в обробці заявок [1].

Змоделювати роботу центру обробки заявок комерційної фірми з обслуговування 1000 клієнтів. Можлива структура моделі представлена на рисунку 1.

Таблиця 1

Функції CPN ML для генерації випадкових величин

Функція зі списком параметрів	Опис функції
$bernoulli(p:real) : int$	Розподіл Бернуллі. Діапазон допустимих значень для параметра p : $0.0 \leq p \leq 1.0$. Тип значення, що повертається ціле число, зазначений в оголошенні функції після двокрапки. У цій та інших функціях, в разі виходу значень параметра за межі допустимих границь буде згенеровано виняток та моделювання припиниться.
$binomial(n:int, p:real) : int$	Біноміальний розподіл. Діапазон значень параметрів: $n \geq 1$ та $0.0 \leq p \leq 1.0$
$chisq(n:int) : real$	Розподіл ксі-квадрат. Діапазон значень параметра: $n \geq 1$.
$discrete(a:int, b:int) : int$	Дискретний рівномірний розподіл. Параметр a менше або дорівнює параметру b , $a \leq b$.
$erlang(n:int, r:real) : real$	Гамма розподіл з цілим параметром n (розподіл Ерланга). Діапазон значень параметрів: $n \geq 1$ та $r > 0.0$
$exponential(r:real) : real$	Експоненціальне розподіл. Діапазон значень параметра $r > 0.0$
$normal(n:real, v:real) : real$	Нормальний розподіл. Діапазон значень параметра $v \geq 0.0$
$poisson(m:real) : int$	Розподіл Пуассона. Діапазон значень параметра $m > 0.0$
$student(n:int) : real$	Розподіл Стьюдента. Діапазон значень параметра $n \geq 1$.

$uniform(a:real, b:real) : real$	Рівномірний розподіл. Параметр a менше або дорівнює параметру b , $a \leq b$.
$rayleigh(s:real) : real$	Розподіл Рейлі. Діапазон значень параметра $s \geq 0.0$
$gamma(l:real, k:real) : real$	Гамма розподіл. Діапазон значень параметрів $l, k \geq 0.0$
$beta(a:real, b:real) : real$	Бета розподіл. Діапазон значень параметрів $a, b \geq 0.0$

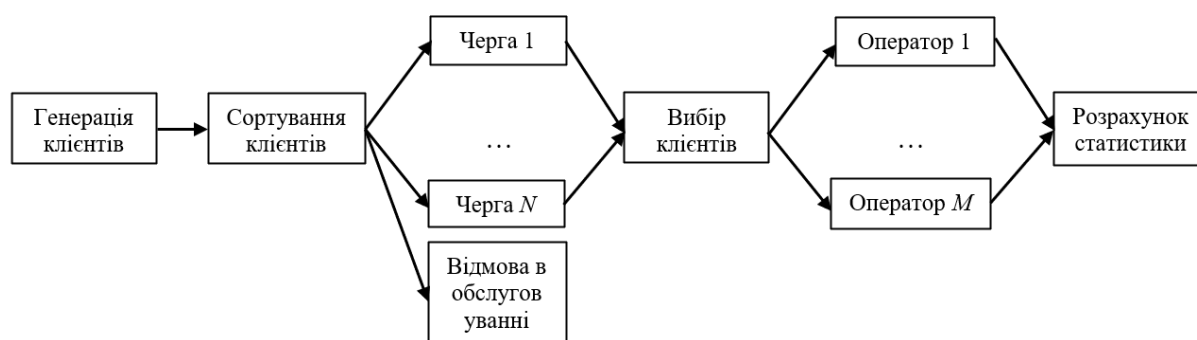


Рисунок 1 – Схема моделі

Побудова моделі. Загальна модель процесу роботи центру обробки заявок має 7 функціональних блоків (див. рис. 2). Блок генерації клієнтів представлено 4 позиціями (*Group* – має набір міток, що вказують групи клієнтів за пріоритетами (N груп); *Problem* – містить мітки, що вказують на проблеми (K), з якими звертаються клієнти; *MaxGen* містить загальну кількість клієнтів, яка обслуговується в процесі моделювання; *GenDelay* – необхідна для формування часової мітки при кожному зверненні «нового» клієнта) та переходом *Generate*, якій безпосереднє виконує функцію генерації клієнтів. Блок сортування клієнтів представлено позицією *Client*, в яку потрапляє інформація про поточного клієнта, та 2 переходами *SortQ1*, *SortQ2*, які сортують клієнтів по пріоритетам. Відсортовані клієнти накопичуються в чергах – це позиції *Queue1*, *Queue2*. Контроль за кількістю надходження клієнтів виконується за допомогою позиції *SumQ*. Блок відбору клієнтів з черг до операторів представлено 2 переходами *GetCQ1*, *GetCQ2* та 2 позиціями *PriorClient*, *Limit*, в яких потрапляє інформація про поточного клієнта з черг та контролюється кількість надходження клієнтів до операторів для обслуговування. Затримка на час обслуговування кожним оператором моделюється за допомогою переходів *Op(i)* та *Exit(i)*, які починають та закінчують процес обслуговування, та 3 позиціями: *TimeO(i)* – містить часові мітки про час обслуговування, *Op(i)* – містить запис інформації про клі-

ISSN 1562-9945 (Print) 47
 ISSN 2707-7977 (Online)

ента, $LimitO(i)$ – контролює обслуговування оператором по одному клієнту за раз, де $i = \overline{1,5}$. Розрахунок статистики виконується переходами $Prior1$, $Prior2$. Попередньо в позицію $Statistics$ потрапляє інформація про поточного клієнта, якій був обслуговано одним з операторів. Результати по кількості клієнтів по пріоритетам (по групам) збираються в позиції $NumP1$, $NumP2$. Загальний час обслуговування клієнтів кожної групи накопичується в позиціях $TimeSumP1$, $TimeSumP2$. Середній час обслуговування клієнтів кожної групи накопичується в позиціях $AvrTimeP1$, $AvrTimeP2$. Загальна кількість усіх клієнтів, яких обслужено збирається в позиції $TotalNum$.

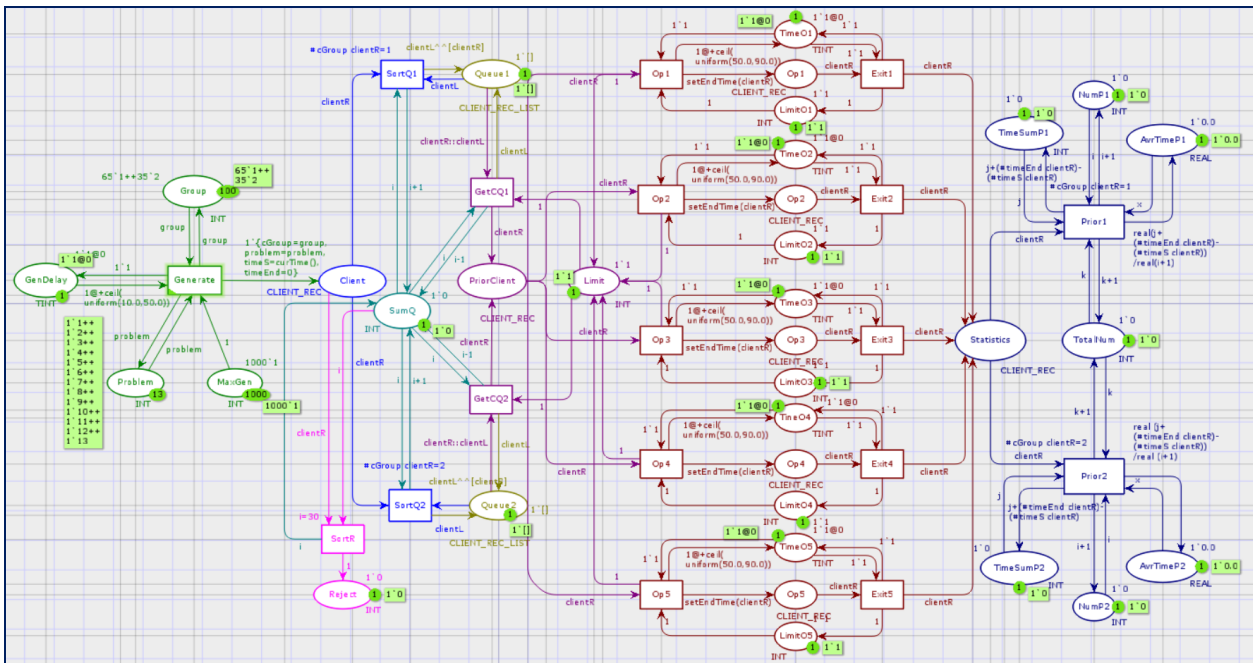


Рисунок 2 – Імітаційна модель процесу роботи центру обробки заявок комерційної фірми

Завдання декларації системи. Визначаються параметри системи, яка моделюється. Для кольорових мереж Петрі, це *множина кольорів системи (colorset)*, які мають наступні значення:

- фішки типу $TINT$ – визначають множину цілих чисел з часовими мітками;
- кортеж $CLIENT_REC$ має 4 цілі чисельні поля, які відповідають за $cGroup$ – тип групи клієнта за пріоритетом, $problem$ – тип проблеми, з якою звернувся клієнт, $timeS$, $timeEnd$ – модельні часи початку та закінчення обслуговування клієнта;

• фішки типу *CLIENT_REC_LIST* – це список інформації про клієнтів центру обробки заявок.

Змінні моделі:

- *group* – визначає значення групи, до якої відноситься клієнт;
- *problem* – визначає номер проблеми, з якою звертається клієнт;
- *clientR* – визначає повну інформацію про клієнта.
- *clientL* – визначає надходження інформації про клієнта в чергу;
- *i, j, k* – визначають значення ціле чисельних змінних;
- *x* – визначає значення дійсної змінної.

Визначимо функції системи:

- функція *curTime()* необхідна в моделі для здобуття поточного значення модельного часу;
- функція *setEndTime()* розраховує час закінчення обслуговування клієнта і формує повний пакет запису інформації про поточного клієнта.

Після визначення основних декларацій системи задаються параметри моделі на графах мережі. На модельному аркуші представлено загальні параметри моделі (див. рис. 2):

- у позиції *Group* множина кольорів фішок – *INT*; початкове маркування $65^1 1^{++} 35^2$ визначає відсоткове відношення між двома групами клієнтів (кількість груп в прикладі $N=2$);

- у позиції *Problem* множина кольорів фішок – *INT*; початкове маркування $1^1 1^{++} 2^{++} 1^3 1^{++} 4^{++} 1^5 1^{++} 6^{++} 1^7 1^{++} 8^{++} 1^9 1^{++} 10^{++} 1^{11} 1^{++} 12^{++} 1^{13}$ встановлює нумерацію проблем, з якими звертається клієнт;

- у позиції *MaxGen* множина кольорів фішок – *INT*; початкове маркування 1000^1 визначає максимальну кількість клієнтів для обслуговування в процесі моделювання;

- у позиціях *GenDelay*, *TimeO1*, *TimeO2*, *TimeO3*, *TimeO4*, *Time5* множина кольорів фішок – *TINT*; початкове маркування $1^1 @0$ встановлює часові мітки;

- у позиціях *Client*, *PriorClient*, *Op1*, *Op2*, *Op3*, *Op4*, *Op5*, *Statistics* множина кольорів фішок – *CLIENT_REC*;

- у позиціях *Queue1*, *Queue2* множина кольорів фішок – *CLIENT_REC_LIST*; початкове маркування $1^[]$ визначає, що спочатку моделювання черги порожні;

- у позиціях *LimitO1*, *LimitO2*, *LimitO3*, *LimitO4*, *LimitO5*, *Limit*, *NumP1*, *NumP2*, *TimeSumP1*, *TimeSumP2*, *TotalNum*, *SumQ*, *Reject* множина кольорів фішок – *INT*;

- у позиціях *AvrTimeP1*, *AvrTimeP2* множина кольорів фішок – *REAL*;

- на дузі від позиції *GenDelay* до переходу *Generate* вираз $1@+\text{ceil}(\text{uniform}(10.0,50.0))$ формує значення модельного часу звертання клієнта, як округлене до найближчого цілого в більшу сторону значенні випадкової величини рівномірно розподіленої на проміжку [10, 50];
- на дузі від переходу *Generate* до позиції *Client* вираз $1\{cGroup=group, problem=problem, imeS=curTime(),timeEnd=0\}$ формує набір даних про «нового» клієнта;
- на дугах від переходу *SortQ1* до позиції *Queue1* та від переходу *SortQ2* до позиції *Queue2* вираз $clientL \wedge [clientR]$ задає надходження заявок в черги;
- на дугах від позиції *Queue1* до переходу *SortQ1* та від позиції *Queue2* до переходу *SortQ2* вираз $clientL$ задає зворотній зв'язок;
- на дугах від позиції *Queue1* до переходу *GetCQ1* та від позиції *Queue2* до переходу *GetCQ2* вираз $clientR::clientL$ визначає, що блок вибору клієнта може почати обробку заявки, якщо в чергах є хоча б один клієнт;
- на дугах від переходу *GetCQ1* до позиції *Queue1* та від переходу *GetCQ2* до позиції *Queue2* вираз $clientL$ повертає в черги списки клієнтів;
- на дугах від переходів $Op(i)$ до позицій $TimeO(i)$ (де $i = \overline{1,5}$) вираз $1@+\text{ceil}(\text{uniform}(50.0,90.0))$ формує значення модельного часу обслуговування клієнта i -м оператором, як округлене до найближчого цілого в більшу сторону значенні випадкової величини рівномірно розподіленої на проміжку [50, 90];
- на дугах від переходів $Op(i)$ до $Op(i)$ (де $i = \overline{1,5}$) вираз $setEndTime(clientR)$ підраховує модельний час кінця обслуговування для клієнта та формує повний набір даних про клієнта;
- на дугах від переходів $Exit(i)$ до позицій *Statistics* вираз $clientR$ задає надходження запису про клієнта, який був обслуговано i -м оператором;
- на дугах від переходу *Prior1* до позиції *TimeSumP1* та від переходу *Prior2* до позиції *TimeSumP2* вираз $j+(\#timeEnd\ clientR)-(\#timeS\ clientR)$ підраховує загальний час обслуговування клієнтів відповідної групи;
- на дугах від переходу *Prior1* до позиції *AvrTimeP1* та від переходу *Prior2* до позиції *AvrTimeP2* вираз $real(j+(\#timeEnd\ clientR)-(\#timeS\ clientR))/real(i+1)$ підраховує середнє значення часу обслуговування клієнтів відповідної групи.

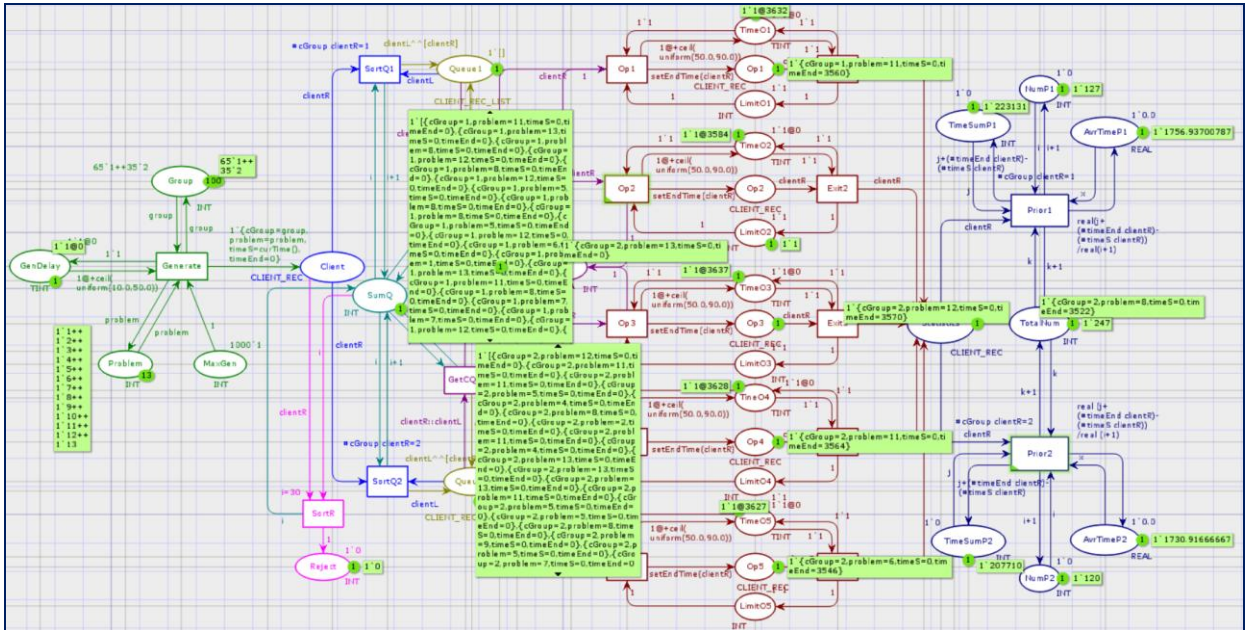


Рисунок 3 – Результати імітаційного моделювання процесу роботи центру обробки заявок комерційної фірми

Аналіз результатів моделювання. Для накопичення статистики про результати роботи моделей можуть бути використані різні методи. У даній роботі розглянуто метод *накопичення інформації в позиціях*.

На рисунку 3 представлено результати імітаційного моделювання процесу роботи центру обробки заявок комерційної фірми. В таблиці 2 представлено результати імітаційного моделювання процесу обслуговування 1000 клієнтів центру. Користувачі звертаються у центр випадковим чином в проміжку часу від 1 до 5 секунд. Відсоткове співвідношення кількості клієнтів в кожній групі пріоритетів: 65%, 35%.

Таблиця 2

Результати моделювання

Параметри моделі	Група 1	Група 2
Кількість обслужених клієнтів	127	120
Середній час обслуговування клієнтів	2,93 хвил.	2,88 хвил.
Загальний час обслуговування клієнтів	6,2 год.	5,77 год.
Загальна кількість обслужених клієнтів	247	
Кількість клієнтів яким було відмовлено в обслуговуванні	1	

Накопичення статистики є важливим елементом процесу моделювання. Деякі характеристики моделі можуть бути обчислені в реальному часу, в про-

цесі моделювання, для інших можуть знадобитися додаткові розрахунки в спеціалізованих математичних додатках [1].

Висновки

В роботі було розглянуто побудова імітаційних моделей систем з стохастичним процесом обробки даних. Представлено формальний опис моделей на основі кольорових мереж Петрі. Наведено алгоритм побудови імітаційних моделей на основі кольорових мереж Петрі. Обґрунтовано використання для імітаційного моделювання складних стохастичних процесів обробки даних використання часових мереж Петрі. Визначено особливості застосування часових мереж Петрі при побудові імітаційних моделей зі складними стохастичними процесами обробки даних. Для завдання випадкових величин використані спеціальні функції. Наведено перелік функцій з їх докладним описом і діапазонами допустимих значень для вхідних параметрів. В якості прикладу розглянуто побудова імітаційної моделі процесу роботи центру обробки заявок комерційної фірми. Модель була побудована в середовищі *CPN Tools*. Визначені та досліджені параметри системи, змінні та параметри моделі. Представлено аналіз результатів імітаційного моделювання процесу роботи центру обробки заявок комерційної фірми. Аналіз результатів імітаційного моделювання дозволяє зробити висновок про ефективність застосування кольорових мереж Петрі для моделювання систем зі складними стохастичними процесами обробки даних.

ЛІТЕРАТУРА

1. Калініна І.О., Гожий О.П. Моделювання складних систем на основі кольорових мереж Петрі: навчальний посібник. Херсон: книжкове видавництво ФОП Вишемирський В.С., 2021. – 60 с.
2. Bause, F. Stochastic Petri nets: an introduction to the theory [Text] / F. Bause, Pieter S. Kritzinger. – Friedrich Vieweg & Sohn Verlag, 2002. – 223 p.
3. Modelling with Generalized Stochastic Petri Nets [Text] / M. Ajmone Marsan, G. Balbo, G. Conte, S. Donatelli, G. Franceschinis. – John Wiley & Sons, 1995. – 324 p.
4. Jensen K., Kristensen L.M., Wells L. Coloured Petri Nets and CPN Tools for Modelling and Validation of Concurrent Systems. Software Tools for Technology Transfer manuscript. 2007. 40 p.
5. Бодянский Е.В., Кучеренко Е.И., Михалев А.И. Нейро-фаззи сети Петри в задачах моделирования сложных систем: монография. Днепропетровск: Системные технологии, 2005, 311 с.
6. Murata T. "Petri nets: Properties, analysis and applications," in Proc. of the IEEE, Vol. 77(4), 1989, pp. 541580.

7. Genrich H. J., Lautenbach K., System modeling with high level Petri nets, Theoretical Computer Science, Vol. 13, pp. 109-136, 1981.
8. Алиев Т.И. Основы моделирования дискретных систем / Т.И. Алиев. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2009. – 363 с.
9. Alcaraz-Mejia M., Campos-Rodriguez R., Caballero-Gutierrez M., Modeling and Simulation of Task Allocation with Colored Petri Nets. Computer Simulation. Open access peer-reviewed chapter, 2017. DOI: 10.5772/67950.
10. Wil M. P. van der Aalst, Stahl Ch., Westergaard M., Strategies for Modeling Complex Processes Using Colored Petri Nets. Lecture Notes in Computer Science book series (TOPNOC, Vol. 7480), Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2013, pp 6–55. DOI: 10.1007/978-3-642-38143-0_2.
11. Boubeta-Puig J., Díaz G., Macià H., Valero V., Ortiz G., MEdit4CEP-CPN: An approach for complex event processing modeling by prioritized colored petri nets. Information Systems, Vol. 81, 2019, pp. 267-289.
<https://doi.org/10.1016/j.is.2017.11.005>.
12. Bozek A., Rak T., Rzonca D., Timed Colored Petri Net-Based Event Generators for Web Systems Simulation. Department of Computer and Control Engineering, Rzeszow University of Technology, Powstancow Warszawy 12, 2022, pp. 35-959, Rzeszow,. <https://doi.org/10.3390/app122312385>.
13. Souravlas S., Anastasiadou S., Kostoglou I., A Novel Method For General Hierarchical System Modeling via Colored Petri Nets Based on Transition Extractions from Real Datasets. Appl. Sci. 2023, 13, 339. <https://doi.org/10.3390/app13010339>.
14. Grobelna I., Karatkevich A., Challenges in Application of Petri Nets in Manufacturing Systems. Electronics 2021, Vol.10, No. 2305, pp. 1-24. <https://doi.org/10.3390/electronics10182305>.
15. Valero V., Diaz G., Boubeta-Puig J., Macia H., Brazalez E., A Compositional Approach for Complex Event Pattern Modeling and Transformation to Colored Petri Nets with Black Sequencing Transitions. IEEE transactions on software engineering, Vol. 48, No. 7, pp. 2584-2605, 2022. DOI: 10.1109/TSE.2021.3065584.
16. Gehlot V., Nigro C., An introduction to systems modeling and simulation with colored petri nets, Proceedings of the 2010 Winter Simulation Conference B. Johansson, S. Jain, J. Montoya-Torres, J. Hukan, and E. Yücesan, eds. INSPEC Accession Number: 11746242, 2011, pp. 104-117. DOI: 10.1109/WSC.2010.5679170.
17. Westergaard1 M., Slaats T., CPN Tools 4: A Process Modeling Tool Combining Declarative and Imperative Paradigms. In M. C. Fauvet, & B. F. Dongen, van (Eds.), BPM Demo Sessions 2013 (Co-located with 11th International Conference on

Business Process Management, BPM2013, Beijing, China, August 26-30, 2013) (pp. 1-5). (CEUR Workshop Proceedings; Vol. 1021).

REFERENCE

1. Kalinina I.O., Hozhyi O.P. Modeliuvannia skladnykh system na osnovi kolorovykh merezh Petri: navchalnyi posibnyk. Kherson: knyzhkove vydavnytstvo FOP Vyshemyrskiy V.S., 2021. – 60 s.
2. Bause, F. Stochastic Petri nets: an introduction to the theory [Text] / F. Bause, Pieter S. Kritzinger. – Friedrich Vieweg & Sohn Verlag, 2002. – 223 p.
3. Modelling with Generalized Stochastic Petri Nets [Text] / M. Ajmone Marsan, G. Balbo, G. Conte, S. Donatelli, G. Franceschinis. – John Wiley & Sons, 1995. – 324 p.
4. Jensen K., Kristensen L.M., Wells L. Coloured Petri Nets and CPN Tools for Modeling and Validation of Concurrent Systems. Software Tools for Technology Transfer manuscript. 2007. 40 p.
5. Bodianskiy E.V., Kucherenko E.Y., Mykhalev A.Y. Neuro-fazzy sety Petry v zadachakh modelyrovannya slozhnykh system: monohrafiya. Dnepropetrovsk: Systemnye tekhnolohyy, 2005, 311 s.
6. Murata T. “Petri nets: Properties, analysis and applications,” in Proc. of the IEEE, Vol. 77(4), 1989, pp. 541580.
7. Genrich H. J., Lautenbach K., System modeling with high level Petri nets, Theoretical Computer Science, Vol. 13, pp. 109-136, 1981.
8. Alyev T.Y. Osnovnyy modelyrovannya diskretnykh system / T.Y. Alyev. – SPb: SPbHU YTMO, 2009. – 363 s.
9. Alcaraz-Mejia M., Campos-Rodriguez R., Caballero-Gutierrez M., Modeling and Simulation of Task Allocation with Colored Petri Nets. Computer Simulation. Open access peer-reviewed chapter, 2017. DOI: 10.5772/67950.
10. Wil M. P. van der Aalst, Stahl Ch., Westergaard M., Strategies for Modeling Complex Processes Using Colored Petri Nets. Lecture Notes in Computer Science book series (TOPNOC, Vol. 7480), Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2013, pp 6–55. DOI: 10.1007/978-3-642-38143-0_2.
11. Boubeta-Puig J., Díaz G., Macià H., Valero V., Ortiz G., MEdit4CEP-CPN: An approach for complex event processing modeling by prioritized colored petri nets. Information Systems, Vol. 81, 2019, pp. 267-289.
<https://doi.org/10.1016/j.is.2017.11.005>.
12. Bozek A., Rak T., Rzonca D., Timed Colored Petri Net-Based Event Generators for Web Systems Simulation. Department of Computer and Control Engineering,

Rzeszow University of Technology, Powstancow Warszawy 12, 2022, pp. 35-959, Rzeszow., <https://doi.org/10.3390/app122312385>.

13. Souravlas S., Anastasiadou S., Kostoglou I., A Novel Method For General Hierarchical System Modeling via Colored Petri Nets Based on Transition Extractions from Real Datasets. Appl. Sci. 2023, 13, 339. <https://doi.org/10.3390/app13010339>.

14. Grobelna I., Karatkevich A., Challenges in Application of Petri Nets in Manufacturing Systems. Electronics 2021, Vol.10, No. 2305, pp. 1-24. <https://doi.org/10.3390/electronics10182305>.

15. Valero V., Diaz G., Boubeta-Puig J., Macia H., Brazalez E., A Compositional Approach for Complex Event Pattern Modeling and Transformation to Colored Petri Nets with Black Sequencing Transitions. IEEE transactions on software engineering, Vol. 48, No. 7, pp. 2584-2605, 2022. DOI: 10.1109/TSE.2021.3065584.

16. Gehlot V., Nigro C., An introduction to systems modeling and simulation with colored petri nets, Proceedings of the 2010 Winter Simulation Conference B. Johansson, S. Jain, J. Montoya-Torres, J. Hukan, and E. Yücesan, eds. INSPEC Accession Number: 11746242, 2011, pp. 104-117. DOI: 10.1109/WSC.2010.5679170.

17. Westergaard1 M., Slaats T., CPN Tools 4: A Process Modeling Tool Combining Declarative and Imperative Paradigms. In M. C. Fauvet, & B. F. Dongen, van (Eds.), BPM Demo Sessions 2013 (Co-located with 11th International Conference on Business Process Management, BPM2013, Beijing, China, August 26-30, 2013) (pp. 1-5). (CEUR Workshop Proceedings; Vol. 1021).

Received 18.11.2022.

Accepted 26.11.2022.

Simulation modeling of systems with a complex stochastic data processing process using colored Petri nets

The article considers the process of building simulation models of systems with stochastic data processing based on colored Petri nets. A formal description of models based on colored Petri nets is presented. For simulation modeling of data processing tasks, the use of temporal Petri nets is substantiated, which allows to define and describe in detail the time intervals of the simulated process. The algorithm for building simulation models based on colored Petri nets is presented. The peculiarities of the use of temporal Petri nets in the construction of simulation models with complex stochastic data processing processes are determined. Special functions are used to assign random values. A list of functions with their detailed description and ranges of permissible values for input parameters is provided. As an example, the construction of a simulation model of the work process of the application processing center of a commercial firm is considered. The model was built in the CPN Tools environment. System parameters, variables,

functions and model parameters are defined and investigated. The method of accumulating information in positions was used to accumulate statistics on the results of the models. The analysis of the results of simulation modeling of the work process of the application processing center of a commercial firm is presented.

Калініна Ірина Олександрівна – доцент кафедри інтелектуальних інформаційних систем Чорноморського національного університету ім. Петра Могили, к.т.н., доцент.

Гожий Олександр Петрович – професор кафедри інтелектуальних інформаційних систем Чорноморського національного університету ім. Петра Могили, д.т.н., професор.

Нечахін Владіслав Володимирович – аспірант кафедри інтелектуальних інформаційних систем Чорноморського національного університету ім. Петра Могили.

Шиян Сергій Іванович – аспірант кафедри інтелектуальних інформаційних систем Чорноморського національного університету ім. Петра Могили.

Kalinina Iryna Oleksandrivna - Associate Professor of the Department of Intellectual Information Systems of the Black Sea National University named after Petra Mohyly, Ph.D., associate professor.

Gozhyj Oleksandr Petrovych - professor of the Department of Intellectual Information Systems of the Black Sea National University named after Petra Mohyly, Doc.of Ing.Sc., professor.

Nechahin Vladislav Volodymyrovych - PhD student of the Department of Intellectual Information Systems of the Black Sea National University named after Petra Mohyly.

Shiyan Serhii Ivanovych – PhD student of the Department of Intellectual Information Systems of the Black Sea National University named after Petera Mohyly.

МОДЕЛІ ТА МЕТОДИ НАВЧАННЯ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ З ДИФЕРЕНЦІЙОВАНИМИ ФУНКЦІЯМИ АКТИВАЦІЇ

Анотація. Пропонується нова постановка задачі навчання нейронних мереж з використанням розширеного вектору варійованих параметрів. Під розширеним вектором варійованих параметрів мається на увазі те, що він включає до себе окрім вагових коефіцієнтів ще і деякі параметри функцій активації. Введення додаткових варійованих параметрів не передбачає зміни архітектури нейронної мережі, але унеможлиблює застосування методу зворотного поширення похибки. Задача навчання формулюється як задача неперервної багатовимірної безумовної оптимізації. Для розв'язання оптимізаційних задач були використано низку градієнтних методів. Проведено дослідження різних постановок оптимізаційних задач та методів їх розв'язування за критеріями точності та ефективності.

Ключові слова: нейронні мережі, задача навчання нейронних мереж, багатовимірна оптимізація, вектор варійованих параметрів, градієнтні методи.

Постановка проблеми. Оскільки головною ідеєю штучної нейронної мережі (ШНМ) є відтворення принципу функціонування біологічного нейрону мозку, то заздалегідь ШНМ не знає як розв'язувати поставлені перед собою задачі. Таким чином, одним із ключових етапів роботи ШНМ – це процес її навчання. Алгоритм навчання – це метод або математична модель, яка підвищує продуктивність ШНМ. Як правило, цей алгоритм застосовується багаторазово до мережі [1]. Алгоритм навчання є одним із факторів, що визначають, наскільки швидко та наскільки точно може працювати ШНМ. Залежно від процесу розробки мережі є три основні моделі машинного навчання.

Навчання з вчителем – це парадигма машинного навчання для завдань, у якій доступні дані складаються з помічених прикладів, що означає, що кожна точка даних містить функції та пов'язану мітку. Метою алгоритмів навчання з учителем є вивчення функції, яка відображає вектори ознак (вхідні дані) до міток (вихідних даних) на основі прикладів пар вхід-вихід [2].

Навчання без вчителя – на відміну від навчання з вчителем цей метод демонструє самоорганізацію, яка фіксує закономірності у вигляді щільності ймо-

вірності або комбінації переваг нейронних функцій, закодованих у вагу зв'язку між нейронами [3].

Навчання з підкріпленням – таке навчання є окремим випадком навчання з вчителем, але не вимагає подання зазначених пар вхідних/вихідних даних і не вимагає явної корекції не оптимальних дій. У цієї моделі вчителем є середовище або його модель [4].

Задача навчання нейронної мережі формулюється як задача багатовимірної безумовної оптимізації, де варійованими параметрами є вагові коефіцієнти: $\bar{W} = [w_1, w_2, \dots, w_n]^T$. Функція похибки ШНМ має вигляд [1]:

$$E(\bar{W}) = \frac{1}{2} \sum_{s=1}^N \sum_{j=1}^k (t_j^s - y_j^s(\bar{W}))^2 \rightarrow \min ; \bar{W} \in E^n. \quad (1)$$

Тут N – кількість навчальних зразків; k – розмірність вихідного вектору; $\bar{y}^s(\bar{W})$ – вихідний вектор для s -го навчального зразку, якій залежить від усіх вагових коефіцієнтів; \bar{t}^s – еталонний вихідний вектор для s -го навчального зразку.

Для переважної більшості прикладних задач, методи розв'язування яких передбачають використання ШНМ, саме якість навчання має визначальне значення.

В задачах розрахунку довговічності та оптимального проектування конструкцій, що підлягають впливу агресивних середовищ ШНМ використовуються для управління точністю чисельного розв'язування систем диференціальних рівнянь (СДР) [5] або для обчислення поправочних функцій [6]. Низька якість навчання ШНМ ставить під сумнів доцільність розв'язання задачі в цілому. В роботі пропонується підхід до підвищення точності розв'язання ШНМ, оснований на збільшенні розмірності оптимізаційної задачі з збереженням первісної архітектури мережі.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Алгоритм управління точністю чисельного розв'язання СДР, які описують процес накопичення геометричних пошкоджень в конструкційних елементах, був запропонований, очевидно уперше, в [5]. ШНМ виступала як контролер, що дозволяв визначити параметр чисельного розв'язування при конкретному значенні припустимої похибки для даного вектора варійованих параметрів. Такий алгоритм використовував одразу декілька ШНМ. В подальших його модифікаціях використовувалась лише од-

на ШНМ, для якої одним з вхідних параметрів було значення припустимої похибки.

В методі поправочних функцій [6] на відміну від попереднього підходу враховувалась зміна за часом внутрішніх зусиль в конструкційних елементах, а ШНМ апроксимувала похибку наближеного розв'язку СДУ. Використання сигмоїдальних функцій активації обумовлювало використання для розв'язання задачі (1) методу зворотного поширення похибки (МЗПП).

При розв'язанні СДР чисельно-аналітичних методів для управління точністю була потрібна не відстань між вузлами часової сітки, а кількість вузлів на вісі напружень [7]. Отже, в ШНМ використовувалась дискретна функція активації вихідного нейрону, що виключало можливість застосування для її навчання градієнтних методів математичного програмування. Для розв'язання задачі у цьому випадку був задіяний генетичний метод.

Незалежно від обраного методу забезпечити потрібну якість навчання ШНМ не завжди вдавалося через проблему локальних мінімумів.

Мета дослідження полягає в пошуку нових моделей оптимізаційних задач щодо сформульованої проблеми та ефективних методів їх реалізації, які дозволили би підвищити якість навчання ШНМ, зокрема через подолання проблеми локальних мінімумів.

Викладання основного матеріалу дослідження. Метод зворотного поширення похибки передбачає корегування вагових коефіцієнтів за формулою:

$$w_{ij}^s = w_{ij}^{s-1} + \lambda \cdot \delta_j \cdot x_i, \quad (2)$$

де λ – крок навчання; δ_j – похибка нейрону.

Припустимо, що в процесі навчання нейронної мережі на $(s-1)$ -й ітерації досягнута точка локального мінімуму \bar{w}_{lok}^* , тобто значення функції похибки (1) у цієї точці менш, ніж у будь-якій іншій точці, що належить її околу (рис. 1):

$$\forall \bar{W} : \left| \bar{w}_{lok}^* - \bar{W} \right| \leq \varepsilon \Rightarrow E(\bar{w}_{lok}^*) < E(\bar{W}). \quad (3)$$

У цьому випадку зміна значень вагових коефіцієнтів згідно з формулою (2) приведе не до покращення функції похибки, а навпаки – до її погіршення, а необхідна точність навчання досягнута не буде.

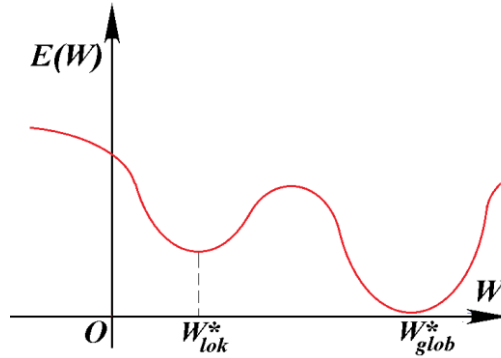


Рисунок 1 –Локальний та глобальний мінімуми функції

Для подолання таких ситуацій доцільно ввести в формулу (2) інерційний коефіцієнт η [8]:

$$w_{ij}^s = w_{ij}^{s-1} + \lambda \cdot \delta_j \cdot x_i + \eta \cdot \Delta w_{ij}^{s-1}. \quad (4)$$

Таким чином, при корегуванні вагових коефіцієнтів на s -й ітерації будуть враховані їх значення не тільки на $(s-1)$ -й, а і на $(s-2)$ -й ітераціях. Ефективність такого підходу виявлятиметься лише в околі локального екстремуму.

Авторами пропонується альтернативний підхід, який базується на збільшенні розмірності оптимізаційної задачі шляхом додання до вектору варійованих параметрів, які не впливатимуть на архітектуру ШНМ.

Розширення вектору варійованих параметрів пропонується за рахунок m параметрів функцій активації прихованих та вихідного шарів ШНМ: $\overline{W}_{new} = [w_1, w_2, \dots, w_n, \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m]^T$. Постановка задачі навчання ШНМ з розширеним вектором варійованих параметрів як задачі багатовимірної оптимізації має вид:

$$E(\overline{W}_{new}) = \frac{1}{2} \sum_{s=1}^N \sum_{j=1}^k (t_j^s - y_j^s(\overline{W}_{new}))^2 \rightarrow \min ; \overline{W}_{new} \in E^{n+m}. \quad (5)$$

У цьому випадку архітектура НМ залишається незмінною, але використання МЗПП в класичному виді для розв'язання задачі навчання стає проблематичним через ускладнення аналітичного диференціювання функції похибки по параметрам функцій активації.

В даній роботі авторами досліджуються деякі градієнтні методи: метод градієнтного спуску, метод найшвидшого спуску та методи спряжених градієнтів (алгоритми Флетчера-Рівза та Полака-Ріб'єра). Навчання ШНМ відбувалось в пакетному режимі, тобто корегування варійованих параметрів здійснювалось після обробки усієї множини навчальних зразків. На відміну від МЗПП градієн-

ти функції похибки обчислювались приблизно з використанням скінченно-різницевих апроксимацій диференціальних операторів. В методах найшвидшого спуску та спряжених градієнтів для визначення точки мінімуму на обраному напрямку використовувався метод парабол.

Для ілюстрації запропонованого підходу розглядається задача апроксимації функцій двох аргументів на обмеженому просторі. Дана постановка обумовлює вибір архітектури ШНМ (рис. 2). На підставі теореми Хехт-Нільсена кількість нейронів прихованого шару дорівнювала п'яти. Кількість варійованих параметрів (вагових коефіцієнтів) у постановці (1) з урахуванням нейронів зсуву дорівнювала 21.

Як функції активації прихованого та вихідного шарів використовувались логістичні функції:

$$f_i(z) = \frac{1}{1 + \exp(-\alpha_i \cdot z)}; \quad i = 1, 2. \quad (6)$$

Для постановки (1) значення параметрів функцій активації обирались $\alpha_1 = \alpha_2 = 1$. Логістична функція є асимптотичною, тобто область її значень обмежена інтервалом $f(x) \in (0; 1)$. Таким чином, параметри α_i впливають лише на довжину інтервалу ефективної зміни значень цих функцій (рис. 3, 4).

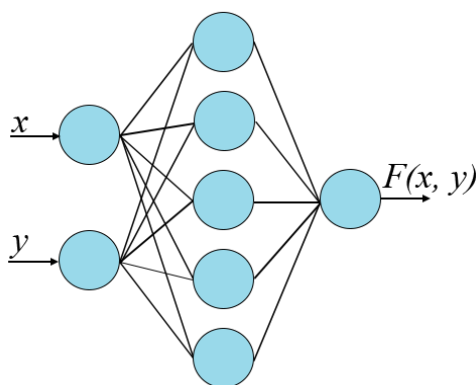


Рисунок 2 – Архітектура нейронної мережі

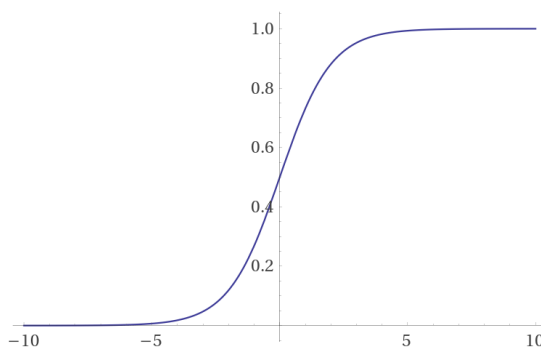


Рисунок 3 – Графік функції (6) при $\alpha = 1$

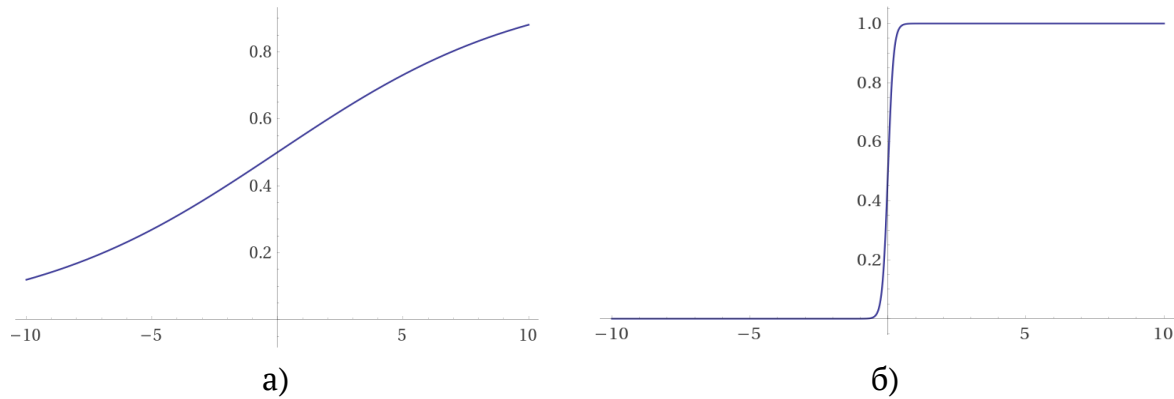


Рисунок 4 – Графік функції (6) при $\alpha = 0,2$ (а) та $\alpha = 10$ (б)

При збільшенні параметра α довжина інтервалу прагне до нуля и функція починає вести себе більш схоже на дискретну функцію Гевісайда (порогову функцію), яка може приймати лише два значення: 0 або 1 (рис. 4 а). При зменшенні цього параметру довжина інтервалу зростає, а на деякому підінтервалі в околі точки $(0; 0,5)$ функція починає вести себе схоже на звичайну лінійну функцію (рис. 4 б). При зміні знака параметра графік функції стає симетричним відносно вісі ординат.

Для постановки (5) значення додаткових варійованих параметрів α_1 та α_2 обмежувалися інтервалом $\alpha_i \in [-10; 10]$. Загальна кількість варійованих параметрів досягала 23.

Першою функцією, для якої розв'язувалась задача апроксимації, була обрана функція Розенброка – неопукла функція, що використовується для тестування продуктивності алгоритмів оптимізації:

$$F_1(x, y) = (a - x)^2 + b(y - x^2)^2 \quad (7)$$

На рис. 5 зображена поверхня функції (7) при $a = b = 1$ в області $x \in [0; 2]$, $y \in [0; 3]$. Область значень функції при обраних параметрах $F_1(x, y) \in [0; 17]$.

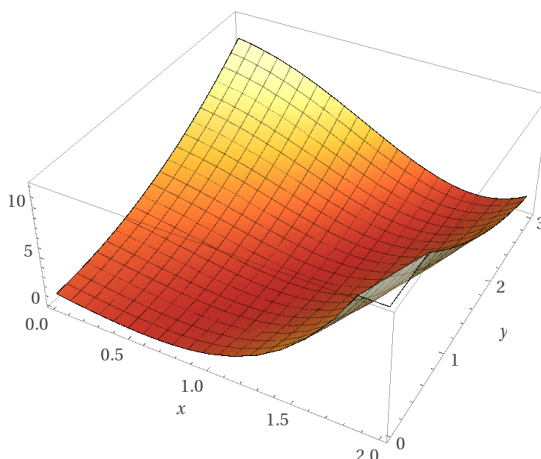


Рисунок 5 – Поверхня функції Розенброка

Останні дві функції мають вигляд:

$$F_2(x, y) = (x - 4)^2 + 2(y - 3)^2; x \in [2; 8], y \in [1; 5] \quad (8)$$

та

$$F_3(x, y) = 3xy - \sqrt{x^2 + y^2}; x \in [0; 3], y \in [1; 4]; \quad (9)$$

їх поверхні зображені на рисунках 6 та 7.

Область значень функцій: $F_2(x, y) \in [0; 24]$, $F_3(x, y) \in [-4; 31]$.

Виходячи з рекомендацій, наведених в [1, 6-8], кількість навчальних зразків – 25000; контрольних зразків – 5000; тестових зразків – 10000. Результати навчання ШНМ в постановці (1) наведені в таблицях: 1 для функції (7), 2 для функції (8) та 3 для функції (9). При проведенні обчислювальних експериментів значення припустимої похибки приймалось $\varepsilon^* = 0,0001$, а максимальна кількість епох – 3000.

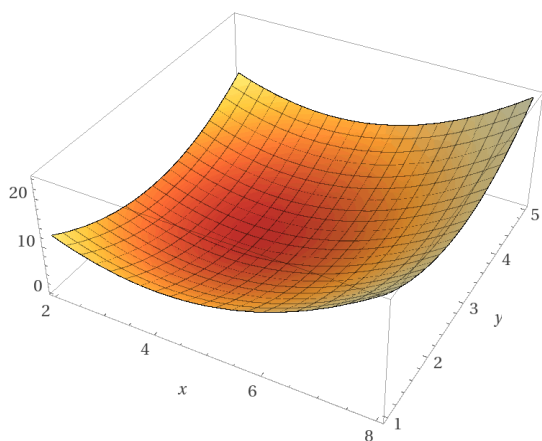


Рисунок 6 – Поверхня функції (8)

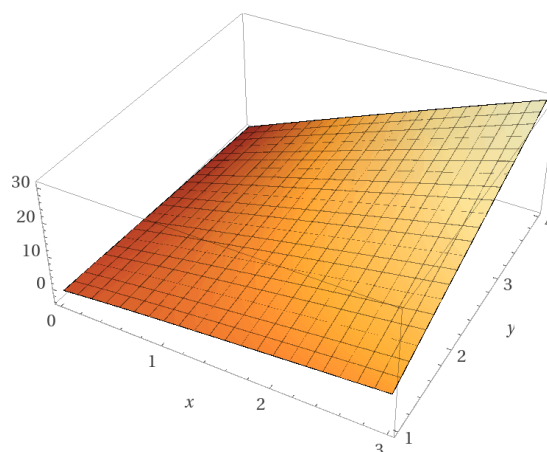


Рисунок 7 – Поверхня функції (9)

Для всіх використаних методів градієнт функції похибки в точці простору розв'язків E^n визначався чисельно, тобто функція похибки обчислювалась $(n+1)$ раз. Отже, найбільш значні обчислювальні витрати потребувала саме процедура визначення градієнту, тому як критерій ефективності приймалась загальна кількість його визначень.

Таблиця 1

Метод	Кількість обчислень градієнту функції похибки	Функція похибки
Метод градієнтного спуску	3000	0,000298
Метод найшвидшого спуску	535	0,000273
Метод Флетчера-Рівза	529	0,000124
Метод Полака-Ріб'єра	494	0,000153

На підставі даних таблиці 1 зроблено висновок про доцільність подальшого використання методів спряжених градієнтів для розв'язання задачі навчання ШНМ в різних постановках.

Для порівняння ефективності моделей (1) та (5) використовувались результати навчання ШНМ для задачі апроксимації функцій (7-9). Значення припустимої похибки приймалось $\varepsilon^* = 0,0001$; максимальна кількість епох – 10000. Для коректного зіставлення результатів розглядалися шість стартових точок, перші 21 координати яких співпадали для обох постановок. Як метод навчання використовувався метод Флетчера-Рівза так як він показав більш точний результат виходячи з отриманих результатів у таблиці 1.

Для даних задач обчислювальні витрати визначалися не тільки кількістю обчислень градієнту функції похибки, а і розмірністю оптимізаційної задачі: для одного обчислення градієнту функція похибки визначалась 22 рази для постановки (1) та 24 рази для постановки (5).

Результати обчислювального експерименту наведені таблицях: для функції (7) Розенброка з параметрами $a = b = 1$ у таблиці 2, для функції (8) у таблиці 3 та для функції (9) у таблиці 4. Кількісні показники розв'язків задачі (5) указані в дужках.

Таблиця 2

№ стартової точки	Кількість обчислень градієнту функції похибки	Кількість обчислень функції похибки
1	624 (340)	275184 (179860)
2	1571 (732)	692811 (387228)
3	839 (911)	401751 (443831)
4	1324 (488)	583884 (258152)
5	501 (565)	249165 (265029)
6	1357 (852)	598437 (450708)

Таблиця 3

№ стартової точки	Кількість обчислень градієнту функції похибки	Кількість обчислень функції похибки
1	487 (269)	214644 (142089)
2	696 (665)	333453 (352818)
3	1152 (420)	507979 (222011)
4	401 (408)	199332 (214673)
5	1099 (682)	484734 (360566)
6	1194 (549)	526536 (290421)

Таблиця 4

№ стартової точки	Кількість обчислень градієнту функції похибки	Кількість обчислень функції похибки
1	1351 (602)	595817 318144
2	684 (368)	306367 194826
3	451 (504)	224249 241176
4	835 (367)	368578 194137
5	780 (756)	373628 399924
6	549 (303)	242162 160075

Висновки. Аналіз результатів чисельних експериментів дозволив зробити висновок про доцільність розширення вектору варійованих параметрів в задачах навчання ШНМ з неперервними та диференційованими функціями активації. Незважаючи на збільшення розмірності задачі оптимізації, в цілому ефективність нової постановки значно більш висока, ніж традиційної. Пояснюється це, на думку авторів, тим, що значна частка обчислювальних витрат в традиційній постановці припадає на спроби покинути околиці локальних мінімумів,

в той час, коли збільшення розмірності простору розв'язків дозволяє здійснити це зі значно меншими витратами.

ЛІТЕРАТУРА

1. Haykin S. Neural Networks: A comprehensive foundation. Prentice Hall, 1999. – 842 p.
2. Russell S., Norvig P. Artificial Intelligence: A Modern Approach, fourth edition. London: Pearson, 2020. – 1136 p.
3. Freund Y., Hausler D. Unsupervised learning of distributions on binary vectors using two-layer networks // In Advances in Neural Information Processing Systems 4: Conference and Workshop on Neural Information Processing Systems. – 1992. – P. 912 – 919.
4. Kelbling, Leslie P., Littman, Michael L., Moore, Andrew W. Reinforcement Learning: A Survey // Journal of Artificial Intelligence Research. - Archived from the original on November 20, 2001. – P. 237 – 285.
5. Зеленцов Д.Г., Короткая Л.И. Использование нейронных сетей при решении задач долговечности корродирующих конструкций. // Вісник Кременчуцького національного університету ім. М. Остроградського. – Кременчук: КрНУ, 2011. – Вип. 3 (68), част. 1. – С. 24 – 27.
6. Zelentsov D.G., Denysiuk O.R., Korotka L.I. The Method of Correction Functions in Problems of Optimization of Corroding Structures. // Advances in Computer Science for Engineering and Education III (ICCSEE 2020), 2020. – pp. 132 – 142.
7. Зеленцов Д.Г., Новикова Л.В., Науменко Н.Ю. Алгоритм управления точностью численного решения некоторых классов систем дифференциальных уравнений. // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Вип. 5 (82). – Дніпропетровськ, 2012. – С. 71 – 79.
8. Каллан Р. Основные концепции нейронных сетей. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2001. – 287 с.

REFERENCE

1. Haykin S. Neural Networks: A comprehensive foundation. Prentice Hall, 1999. – 842 p.
2. Russell S., Norvig P. Artificial Intelligence: A Modern Approach, fourth edition. London: Pearson, 2020. – 1136 p.
3. Freund Y., Hausler D. Unsupervised learning of distributions on binary vectors using two-layer networks // In Advances in Neural Information Processing Systems 4: Conference and Workshop on Neural Information Processing Systems. – 1992. – P. 912 – 919.

4. Kelbling, Leslie P., Littman, Michael L., Moore, Andrew W. Reinforcement Learning: A Survey // Journal of Artificial Intelligence Research. - Archived from the original on November 20, 2001. – P. 237 – 285.
5. Zelentsov D.G., Korotka L.I. The use of neural networks in solving problems of the durability of corroding structures. // Bulletin of the Kremenchug National University named after M. Ostrogradskyi. – Kremenchug: KrNU, 2011. – Vol. 3 (68), part. 1. – P. 24 – 27.
6. Zelentsov D.G., Denysiuk O.R., Korotka L.I. The Method of Correction Functions in Problems of Optimization of Corroding Structures. // Advances in Computer Science for Engineering and Education III (ICCSEEA 2020), 2020. – pp. 132 – 142.
7. Zelentsov D.G., Korotka L.I., Naumenko N.U. Accuracy Control Algorithm for Numerical Solution of Certain Classes of Systems of Differential Equations // System technologies. Regional interuniversity collection of scientific works. – Issue 5 (82). – Dnipropetrovsk, 2012. – P. 71 – 79.
8. Callan R. Basic concepts of neural networks. – M.: Williams Publishing House, 2001. – 287 p.

Received 01.11.2022.
Accepted 07.11.2022.

Models and methods of learning neural networks with differentiated activation functions

Analysis of the literature made it clear that the problem associated with improving the performance and acceleration of ANN learning is quite actual, as ANNs are used every day in more and more industries. The concepts of finding more profitable activation functions have been outlined a lot, but changing their behavior as a result of learning is a fresh look at the problem.

The aim of the study is to find new models of optimization tasks for the formulated problem and effective methods for their implementation, which would improve the quality of ANN training, in particular by overcoming the problem of local minima.

A studied of models and methods for training neural networks using an extended vector of varying parameters is conducted. The training problem is formulated as a continuous multidimensional unconditional optimization problem. The extended vector of varying parameters implies that it includes some parameters of activation functions in addition to weight coefficients. The introduction of additional varying parameters does not change the architecture of a neural network, but makes it impossible to use the back propagation method. A number of gradient methods have been used to solve optimization problems. Different formulations of optimization problems and methods for their solution have been investigated according to accuracy and efficiency criteria.

The analysis of the results of numerical experiments allowed us to conclude that it is expedient to expand the vector of varying parameters in the tasks of training ANNs with continuous and differentiated activation functions. Despite the increase in the dimensionality of the optimization problem, the efficiency of the new formulation is higher than the generalized one. According to the authors, this is due to the fact that a significant share of computational costs in the generalized formulation falls on attempts to leave the neighborhood of local minima, while increasing the dimensionality of the solution space allows this to be done with much lower costs.

Dmytro Zelentsov – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department of Information Systems, Ukrainian State University of Chemical Technologies

Shaptala Taras – Postgraduate Student, Department of Information Systems, Ukrainian State University of Chemical Technologies.

Зеленцов Дмитро Гегемонович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри інформаційних систем, Український державний хіміко-технологічний університет.

Шаптала Тарас Максимович – аспірант кафедри інформаційних систем, Український державний хіміко-технологічний університет.

МЕТОД КОНСОЛІДАЦІЇ МУЛЬСЕМЕДІЙНИХ ДАНИХ

Анотація: У статті пропонується метод, який дозволяє виконувати поєднання та синхронізацію мультимедійних даних із застосуванням принципів багатопотоковості. Застосування запропонованого методу вирішує проблеми, пов'язані з поєднанням у одному часі соровому проміжку даних різних модальностей, що відрізняються форматами збереження. Цей метод призначений для застосування при розробленні нового класу програмного забезпечення – мультимедійних програмних систем.

Ключові слова: Програмне забезпечення, мультимедіа, темпоральні мультимодальні дані, метод синхронізації даних, багатопотоковість.

Постановка проблеми. Термін «мультимедіа» (англ. «multimedia» – MULTiple SEnsorial MEDIA) уперше був запропонований Георгітом Гінеєм у роботі [1]. Концепція мультимедіа передбачає реєстрацію, зберігання, обробку, передачу та відтворення комп'ютерними засобами мультимодальної інформації про фізичні об'єкти, яка може сприйматися людиною через органи чуття. До такої інформації відносять: аудіовізуальну інформацію (зовнішній вигляд об'єкта спостереження, акустичні властивості або прояви функціонування об'єкта), тактильну інформацію (текстура поверхні, температура об'єкта), кінестетичну інформацію (вага, центр тяжіння об'єкта), інформацію про смак, запах тощо. Особливістю процесу сприйняття мультимедійної інформації людиною є те, що цей процес відбувається у площині часу. Через це реєстрація мультимедійних даних має здійснюватися з фіксацією моментів часу, коли відповідна мультимедійна інформація існувала або її сприйняття мало сенс для людини-дослідника об'єкта спостереження, тобто мультимедійні дані є темпоральними.

Концепція мультимедіа є подальшим розвитком концепції мультимедіа, яка ґрунтується на записі, збереженні, обробці, передачі та відтворенні лише аудіовізуальної інформації. Принципи, підходи, формати, які дозволяють оброблювати мультимедійні дані, є уніфікованими та стандартизованими. Водночас, комп'ютерна обробка мультимедійних даних потребує формалізації та

подальшої стандартизації, що у свою чергу вимагає розроблення методів обробки мультимедійних даних та їхньої реалізації у вигляді мультимедійного програмного забезпечення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Більшість з відомих методів синхронізації мультимодальних даних розроблені для вузькопрофільних застосувань. Прикладом такого спеціалізованого застосування є дослідження щодо оцінки частоти серцевих скорочень і електрошкіряної активності як метод об'єктивної оцінки користувацького досвіду для середовищ віртуальної реальності з ефектом занурення [2].

Як розвиток технологій застосування найпоширеніших медіа даних, таких як аудіо та відео, створюються та активно розробляються специфічні формати і структури даних, за допомогою яких можна зберігати та обробляти у комп'ютерний спосіб інформацію про смак, запах, тактильні відчуття, тощо. Проте наявних методів недостатньо для аналізу та поєднання складних мультимодальних компонентів [3]. Крім того, аналіз існуючих методів синхронізації мультимодальних даних не дозволяє виділити один універсальний метод для консолідації даних з широкого спектру модальностей, які задіюють три та більше людських органів чуття [1].

Проте, одночасне використання кількох органів відчуття в інтерактивних додатках стає все більш можливим завдяки поширенню комерційних пристроїв для створення імерсивних систем [4]. Прикладом таких пристроїв є Aroma Player та Aroma shooter [5]. Розвиток методів та систем поєднання мультисенсорних даних змінить підхід до роботи в деяких галузях, а також сприятиме створенню нового користувацького досвіду у споживанні медіаконтенту шляхом розширення спектру класичного аудіовізуального мультимедійного вмісту іншими модальностями, що дозволять задіяти інші органи чуття людини [6].

Аналіз відомих методів обробки та синхронізації мультимедійних даних дозволяє сформулювати вимоги, яким має відповідати універсальний метод консолідації таких даних:

- можливість обробки даних різних модальностей;
- формування єдиної часової шкали для мультимодальних даних, що консолідуються;
- використання особливостей метаданих файлів мультимодальних даних для кращої синхронізації.

Програмна реалізація такого універсального методу консолідації мультимедійних даних має передбачати:

– багатопоточність (обробка даних кожної модальності в окремому потоці);

– можливість використання мультимодальних даних, що зберігаються у розподілених або хмарних сховищах.

Оскільки жоден відомий метод у повній мірі не відповідає цим вимогам, задача створення універсального методу консолідації мультимедійних даних є актуальною.

Метою дослідження, результати якого представлені у цій статті, є розроблення основних засад комп'ютерної обробки мультимедійної інформації, а саме, розроблення методу, який дає змогу консолідувати мультимедійні дані про об'єкт спостереження з урахуванням мультимодальності та темпоральності цих даних, що вимагає їхньої синхронізації у межах єдиного часового проміжку.

Основні етапи процесу консолідації мультимедійних даних. Консолідація мультимедійних даних про об'єкт спостереження є процесом, що складається з таких основних етапів.

1. Аналіз метаданих файлів даних різних модальностей.

2. Формування часової шкали процесу дослідження об'єкта спостереження.

3. Визначення структури даних та створення файлу консолідованих мультимедійних даних.

Розглянемо кожен з цих етапів детально.

Аналіз метаданих. Окрім власно даних про об'єкт спостереження, які потрібно синхронізувати, вхідні дані, що організовані у вигляді файлу, включають метадані, а саме: тип файлу, його розмір, дата створення, дата останнього редагування, місцезнаходження у момент створення, технічна інформація про пристрій, яким файл було створено. Для відео та аудіо файлів до складу метаданих також входять: тривалість, бітрейт, кодек, кількість каналів, розмір кадру, тощо. Додатковими метаданими є назва файлу, його опис, інформація про авторів тощо.

Для коректної консолідації мультимедійних даних необхідно виявити метадані, які називатимемо темпоральними метаданими: дата створення файлу, дата його останнього редагування та тривалість запису. Аналіз темпоральних метаданих дозволяє отримати інформацію, яка потрібна для подальшої обробки даних, а саме, їх сортування, поєднання та синхронізації з метою комплексного подання мультимедійних даних [7], що всебічно описують об'єкт

спостереження. Наприклад, якщо файли з даними різних модальностей були створені у приблизно однаковий момент часу, то аналіз темпоральних метаданих дозволяє виявити, які дані почали надходити першими та визначити тривалість їхнього надходження, що дає змогу виконати синхронізацію цих даних з даними інших модальностей в одному часовому проміжку. У файлах різного типу темпоральні метадані можуть зберігатися у різних форматах, а також бути відсутніми. Крім того, мітки часу можуть зберігатись не у заголовку файлу, а в основній частині файлу, тобто не у метаданих, а у даних.

Для прискорення процесу консолідації мультимедійних даних доцільно забезпечити багатопотоковість алгоритму виявлення темпоральних даних для одночасної обробки файлів різних модальностей. Алгоритм багатопотокової обробки файлів для виявлення темпоральних метаданих наведений на рис. 1.

Формування часової шкали. Результатом виконання першого етапу консолідації мультимедійних даних є виявлення темпоральних метаданих – часових значень, що визначають тривалість та час початку і закінчення відтворення даних певної модальності. Проте ці часові значення мають бути визначені у будь-яких одиницях виміру часу: мілісекундах, годинах, місяцях тощо, що залежить від частоти отримання відповідних даних з сенсорів, камер та інших пристроїв. Для консолідації мультимедійних даних необхідно привести всі значення в одну систему виміру часу та визначити єдиний спільний часовий проміжок для узгодженого представлення даних різних модальностей – часової шкали процесу дослідження об'єкта спостереження. Ця шкала (рис. 2) формується на основі отриманого набору темпоральних метаданих, який є масивом часових міток, що позначають ключові моменти дослідження об'єкта спостереження та сприйняття людиною-дослідником мультимедійної інформації про цей об'єкт.

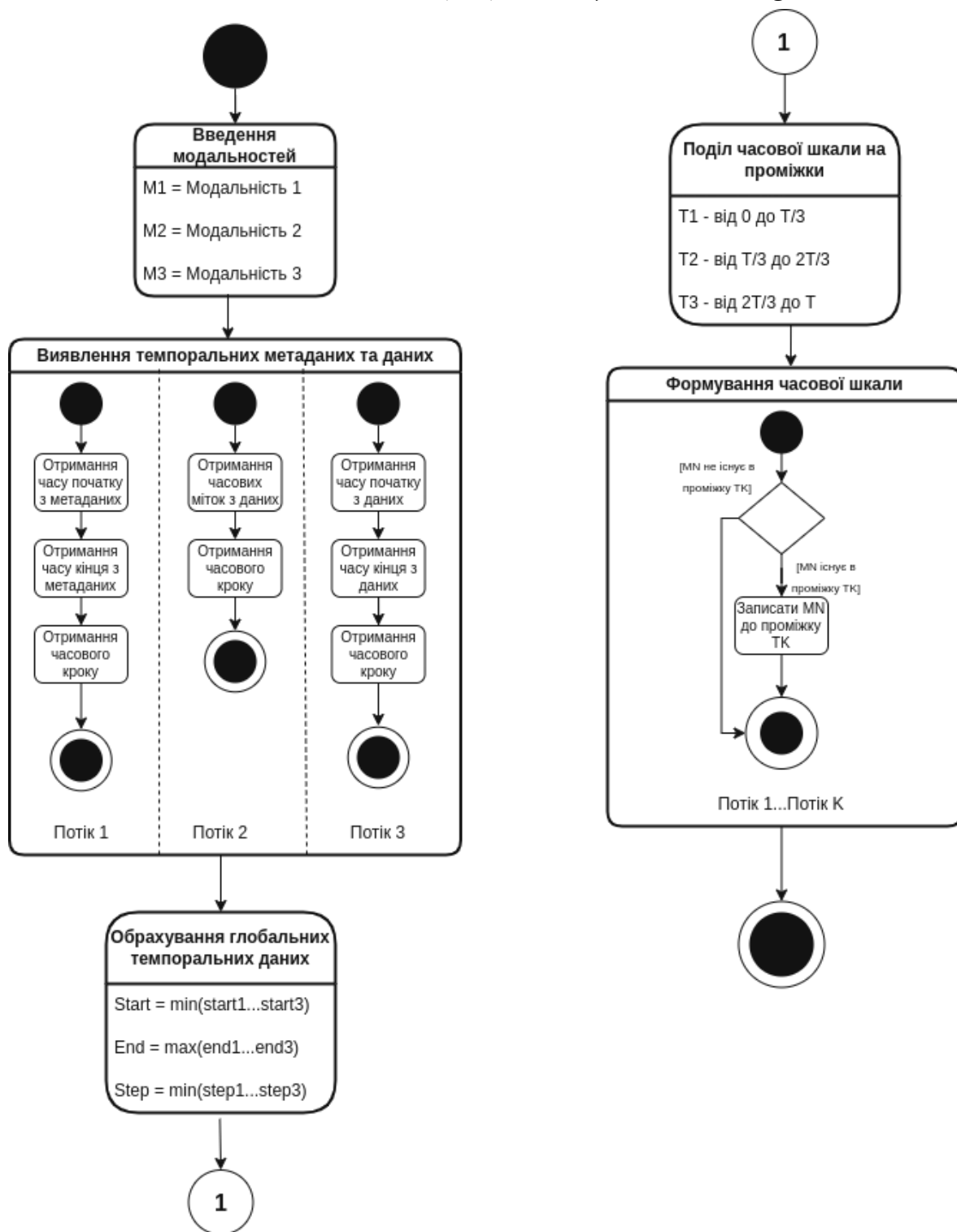


Рисунок 1 - Алгоритм багатопотокової обробки мультимедійних файлів для виявлення темпоральних метаданих

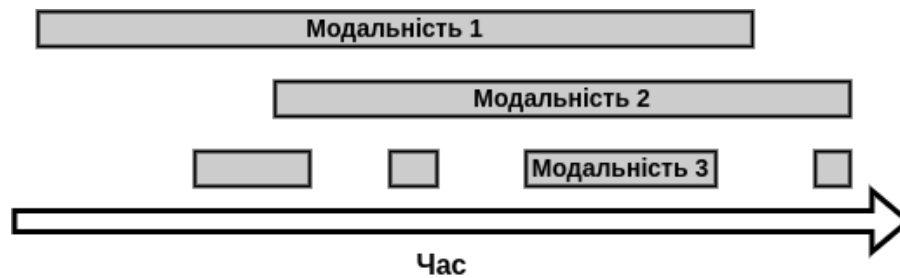


Рисунок 2 - Приклад часової шкали процесу дослідження об'єкта спостереження

Визначення структури даних та створення файлу консолідованих мультимедійних даних. Синхронізовані мультимедійні дані мають бути збережені у вигляді файлу. Можливим форматом такого файлу може бути JSON (JavaScript Object Notation) [8], оскільки він надає змогу структуровано зберігати мультимодальні дані. Проте мультимедійні дані є темпоральними, тому для забезпечення подальшого коректного оброблення файлу таких даних формат файлу має бути модифікований з урахуванням темпоральності даних. Назвемо такий модифікований формат Timeline JSON (TJSON). Приклад TJSON-об'єкту наведено у лістингу 1.

Лістинг 1. Приклад TJSON-об'єкту.

```
{
  "name": "назва мультимедійного файлу",
  "description": "опис мультимедійного файлу",
  "stepMeasurement": "формат вимірювання кроку (секунди, мілісекунди, тощо)",
  "step": розмір кроку (0.1, 0.01, тощо),
  "duration": загальна тривалість мультимедійного файлу в обраному форматі (секунди, мілісекунди, тощо)",
  "media_formats": [ масив використаних форматів (mp3, mp4, jpg, txt, тощо) ],
  "data": {
    "0.0": [ масив даних, що існують в проміжок часу 0.0 ],
    "0.1": [ масив даних, що існують в проміжок часу 0.1 ],
    ...
    "N": [ масив даних, що існують в проміжок часу N ],
  }
}
```

Після визначення TJSON-об'єкту, тобто структури даних для збереження мультимедійних даних, відбувається створення мультимедійного файлу. Тип файлу, що створюється, залежить від наявних модальностей і визначається виходячи з таких міркувань:

- якщо серед вхідних даних присутні відеодані, то вихідний файл має мати формат відео;
- якщо серед вхідних даних відсутні відеодані, проте присутні аудіодані та числові або текстові дані, то вихідний файл має мати формат відео;
- якщо серед вхідних даних відсутні відео- та аудіодані, проте присутні числові або текстові дані, то вихідний файл має мати формат .CSV, .PDF або спеціалізований формат, що визначається типом пристрою відтворення цих даних.

Вихідний файл консолідованих мультимедійних даних містить дані, впорядковані згідно з визначенням TJSON-об'єкту. Цей файл може бути відтворений за допомогою відповідного апаратного забезпечення [9, 10]. Також мультимедійні дані можуть бути попередньо оброблені відповідно до задачі дослідження. При цьому доцільно застосувати операції впорядкування або логічні операції на основі алгебраїчної системи агрегатів (ACA) [7], оскільки TJSON-об'єкт є програмною реалізацією агрегата – математичної абстракції, визначеної в ACA. Таким чином, консолідовані мультимедійні дані можна представити у вигляді набору агрегатів, над якими виконуються логічні операції та операції впорядкування. До логічних операцій над агрегатами відносять об'єднання, переріз, різниця, симетрична різниця та виключний переріз. До операцій впорядкування агрегатів відносять розміщення, сортування, проріджування, видалення та вставлення.

Якщо операції впорядкування можуть виконуватися в межах одного набору даних, то для логічних операцій наборів даних має бути два, тому логічні операції можуть виконуватися або між двома наборами із різних, можливо, сусідніх часових проміжків, або при наявності іншого такого TJSON-об'єкту. У тому випадку, якщо необхідно виконати операції по всьому TJSON-об'єкту або між двома TJSON-об'єктами, можна застосувати багатопотоковий підхід для збільшення ефективності обчислень. При цьому для забезпечення багатопотоковості часова шкала поділяється на фрагменти. Мультимедійні дані, що визначені у певному фрагменті шкали, оброблюються в окремому потоці.

Ефективність паралельних обчислень у запропонованому методі. Для дослідження доцільності багатопотоковості було виконано реалізацію запропонованого методу та протестовано розроблений програмний код на експериментальних даних. Метою експерименту було визначення швидкості виконання обробки мультимедійних даних при різних кількостях потоків.

Вхідними даними у цьому експерименті були файли наступних типів: відео, аудіо та CSV-файл. Тривалість відео складала 61 секунду. Тривалість аудіо – 84 секунди. CSV-файл містив таблицю двох значень «ключ»-«значення», де «ключем» є часова мітка, а «значенням» – числове значення, що надходить із сенсора, подане у текстовому форматі.

Експеримент був виконаний декілька разів зі застосуванням різної кількості потоків. Результати визначення швидкості виконання обробки мультимедійних даних при різних кількостях потоків наведені у табл. 1.

Таблиця 1

Результати експерименту з паралельних обчислень

	Один потік	Два потоки	Три потоки	Чотири потоки
Час, с	211,06	202,8377	191,3445	176,8694

Аналіз цих результатів дозволяє підтвердити припущення, що зі збільшенням кількості потоків швидкість оброблення мультимедійних даних зростає.

Висновки. Мультимедійні дані являють собою складну структуру даних, що може містити дані довільних модальностей. Наразі існує проблема коректного злиття даних різних модальностей для їхньої консолідованої обробки та зберігання. Запропонований у статті метод дає змогу вирішити проблему поєднання даних різних модальностей, а також їхньої синхронізації у межах єдиної часової шкали, що робить можливим створення мультимедійних файлів для подальшої програмної обробки. Для збільшення ефективності запропонованого методу доцільно використати багатопоточність на етапі аналізу метаданих та етапі створення вихідного файлу.

Запропонований метод може бути розширений іншими підходами та технологіями. Наприклад, на етапі опрацювання даних можна застосовувати методи штучного інтелекту для оцінки кореляції даних різних модальностей.

ЛІТЕРАТУРА

1. A User Perspective of Olfaction-Enhanced Mulsemmedia. Proceedings of the international conference on management of emergent digital ecosystems / Ghinea G., Ademoye O. // MEDES'10. – 2010. – P. 277–280.
2. Semi-automatic synchronization of sensory effects in mulsemmedia authoring tools / Abreu, R., Mattos, D., Santos, J. A. D., & Muchaluat-Saade, D. C. // In Proceedings of the 25th Brazillian Symposium on Multimedia and the Web. – 2019. – P. 201-208.
3. Beyond multimedia adaptation: Quality of experience-aware multi-sensorial media delivery / Yuan, Z., Ghinea, G., & Muntean, G. M. // IEEE Transactions on Multimedia. – 2014. – №17(1). – P. 104-117.
4. An evaluation of Heart Rate and ElectroDermal Activity as an objective QoE evaluation method for immersive virtual reality environments / Egan, D., Brennan, S., Barrett, J., Qiao, Y., Timmerer, C., & Murray, N. // In 2016 eighth international conference on quality of multimedia experience (QoMEX) IEEE. – 2016. – P. 1-6.
5. Towards a reference ontology on mulsemmedia system / Saleme, E. B., Santos, C. A., Falbo, R. A., Ghinea, G., & Andres, F. // In Proceedings of the 10th International Conference on Management of Digital EcoSystems. – 2018. – P. 23-30.
6. Development of directional olfactory display / Kim, D. W., & Ando, H. // In Proceedings of the 9th ACM SIGGRAPH Conference on Virtual-Reality Continuum and its Applications in Industry. – 2010 – P. 143-144.
7. Temporal Multimodal Data-Processing Algorithms Based on Algebraic System of Aggregates / Pester, A., Sulema, Y., Dychka, I., & Sulema, O. // Algorithms. – 2023. – №16(4). – P 186.
8. Foundations of JSON schema / PEZOA, Felipe, et al. // In: Proceedings of the 25th international conference on World Wide Web. – 2016. – P. 263-273.
9. Multiple Sensorial Media Advances and Applications / GHINEA, George; ANDRES, Frederic; GULLIVER, Stephen. // New Developments in. – 2012.
10. Mulsemmedia vs. Multimedia: State of the art and future trends / Y. Sulema // International Conference on Systems, Signals and Image Processing (IWSSIP), Bratislava, Slovakia. – 2016. – P. 1-5.

REFERENCES

1. A User Perspective of Olfaction-Enhanced Mulsemmedia. Proceedings of the international conference on management of emergent digital ecosystems / Ghinea G., Ademoye O. // MEDES'10. – 2010. – P. 277–280.

2. Semi-automatic synchronization of sensory effects in mulsemmedia authoring tools / Abreu, R., Mattos, D., Santos, J. A. D., & Muchaluat-Saade, D. C. // In Proceedings of the 25th Brazillian Symposium on Multimedia and the Web. – 2019. – P. 201-208.
3. Beyond multimedia adaptation: Quality of experience-aware multi-sensorial media delivery / Yuan, Z., Ghinea, G., & Muntean, G. M. // IEEE Transactions on Multimedia. – 2014. – №17(1). – P. 104-117.
4. An evaluation of Heart Rate and ElectroDermal Activity as an objective QoE evaluation method for immersive virtual reality environments / Egan, D., Brennan, S., Barrett, J., Qiao, Y., Timmerer, C., & Murray, N. // In 2016 eighth international conference on quality of multimedia experience (QoMEX) IEEE. – 2016. – P. 1-6.
5. Towards a reference ontology on mulsemmedia system / Saleme, E. B., Santos, C. A., Falbo, R. A., Ghinea, G., & Andres, F. // In Proceedings of the 10th International Conference on Management of Digital EcoSystems. – 2018. – P. 23-30.
6. Development of directional olfactory display / Kim, D. W., & Ando, H. // In Proceedings of the 9th ACM SIGGRAPH Conference on Virtual-Reality Continuum and its Applications in Industry. – 2010 – P. 143-144.
7. Temporal Multimodal Data-Processing Algorithms Based on Algebraic System of Aggregates / Pester, A., Sulema, Y., Dychka, I., & Sulema, O. // Algorithms. – 2023. – №16(4). – P 186.
8. Foundations of JSON schema / PEZOA, Felipe, et al. // In: Proceedings of the 25th international conference on World Wide Web. – 2016. – P. 263-273.
9. Multiple Sensorial Media Advances and Applications / GHINEA, George; ANDRES, Frederic; GULLIVER, Stephen. // New Developments in. – 2012.
10. Mulsemmedia vs. Multimedia: State of the art and future trends / Y. Sulema // International Conference on Systems, Signals and Image Processing (IWSSIP), Bratislava, Slovakia. – 2016. – P. 1-5.

Received 17.11.2022.

Accepted 22.11.2022.

Mulsemmedia data consolidation method

The synchronization of multimodal data is one of the essential tasks related to mulsemmedia data processing. The concept of mulsemmedia (MULTiple SEnsorial MEDIA) involves the registration, storage, processing, transmission and reproduction by computer-based tools of multimodal information about a physical object that humans can perceive through their senses. Such information includes audiovisual information (object's appearance, acoustic properties, etc.), tactile information (surface texture, temperature), kinesthetic information (weight, object's centre of gravity), information about

its taste, smell, etc. The perception of mulsemmedia information by a person is the process that exists over time. Because of this, the registration of mulsemmedia data should be carried out with the fixation of the moments of time when the relevant mulsemmedia information existed or its perception made sense for a human who supervises the object as mulsemmedia data is temporal.

This paper presents a method that enables the consolidation and synchronization of mulsemmedia data using the principles of multithreading. The universal method was designed to support combining data of different modalities in parallel threads. The application of the proposed method solves problems associated with integrating data of different modalities and formats in the same time interval. The effectiveness of applying this method increases by using multithreaded distributed computing. This method is designed for use in the development of mulsemmedia software systems. The modified JSON format (TJSON – Timeline JSON) was proposed in the paper, as well. TJSON-object is a complex data structure for representing the synchronized mulsemmedia data and their further processing.

The proposed method can be further extended with other approaches and technologies. For example, artificial intelligence methods can be applied to assess the correlation between data from different modalities. This can help improve the method's accuracy and the output files' quality.

Рвач Дмитро Вячеславович – аспірант кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем, rvach.d@gmail.com Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ.

Сулема Євгенія Станіславівна – д-р техн. наук, доцент, завідувач кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем. Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ.

Rvach Dmytro – Post-Graduate Student of Computer Systems Software Department, rvach.d@gmail.com National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv.

Yevgeniya Sulema – DSc, Associate Professor, Head of Computer Systems Software Department. National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv.

В.В. Стрельбіцький, Л.В. Бовнегра, А.В. Павлишко

МОДЕЛЮВАННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ НАДІЙНОСТІ ХОДОВИХ КОЛІС МОСТОВИХ КРАНІВ МОРСЬКИХ ПОРТІВ

Анотація. Мостові крани широко засовуються у морських та річкових портах для перевантаження вантажів на відкритих та закритих складських майданчиках. Оскільки вони є основною ланкою технологічних процесів, тому від їх надійної та безперервної роботи залежить продуктивність портових виробничих ліній. Відомо, що при експлуатації кранів 90% ходових коліс виходом з ладу і замінюється новими через інтенсивний знос реборд, а 60-70% підкранових рейок через знос їхніх бічних граней. Оскільки ресурс є основним показником довговічності деталей та вузлів, тому підвищення встановлення ресурсу коліс є актуальною задачею, що дозволить зменшити витрати на ремонт та експлуатацію кранів. Метою дослідження є визначення ресурсу ходових коліс механізмів мостових кранів з понаднормовими термінами експлуатації. Для досліджень було обрано 4 ідентичні мостові крани, вантажопідйомністю 10 тон, які працюють у крюковому режимі у морських портах. Кранові колеса виготовлені зі сталі 65Г методом литва. Механізми кранів обстежували візуально та вимірювали знос коліс через 3 місяці протягом 4 років роботи. За результатами досліджень розраховані параметри моделі зносу від часу у вигляді ступеневої функції. Отримані значення коефіцієнту кореляції вказують на те, що між зносом та часом роботи існує достатньо щільний зв'язок. Середнє значення похибки за запропонованою моделлю не перевищує 6,1%, що є цілком прийнятним для інженерних розрахунків. Встановлено, що ресурс кранових коліс не перевищує 3,3...3,4 років роботи, що менше 4 років зазначеного виробником.

Ключові слова: надійність, ресурс, знос, час роботи, ступенева функція, коефіцієнт кореляції, колесо крана, мостовий кран.

Постановка проблеми. Мостові крани широко застосовуються у морських і річкових портах для виконання перевантажувальних робіт на відкритих та закритих складах [1-6]. Оскільки вони є основною ланкою технологічних процесів, тому від їх надійної та безперервної роботи залежить продуктивність портових виробничих ліній.

Проте, сьогодні понад 88% кранів річкових і морських портів України відпрацювали нормативний ресурс і продовжують працювати [1-3,5-7].

Відомо, що при експлуатації кранів 90% ходових коліс виходом з ладу и замінюється новими через інтенсивний знос реборд, а 60-70% підкранових рейок через знос їхніх бічних граней. Значний рідше проводиться заміна коліс при виході з ладу підшипників і ще рідше - в силу руйнування від утомленості металу бігової доріжки колеса [3,8,9].

Слід зазначити, що понаднормова та тривала робота портових кранів у режимі інтенсивного циклічного навантаження призводить до передчасного виходу ходових коліс внаслідок зносу [1,5] та утворення втомних дефектів, що призведе до виходу з ладу вузлів та аварій [2,3,6,7]. Як показує досвід експлуатації, ходові колеса мають є найбільш зношуваними елементами механізмів переміщення. Так, строк їх експлуатації складає від кількох місяців до 2-3 років [1,8]. Це пов'язано з тим, що заміна коліс більш дешева у порівнянні з заміною підкранового шляху.

Оскільки ресурс є основним показником довговічності деталей та вузлів, тому підвищення встановлення ресурсу коліс є актуальною задачею, що дозволить зменшити витрати на ремонт та експлуатацію кранів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз досліджень складних технічних систем показує, що:

1) надійність механізмів мостових кранів, що експлуатується понад 30 років у морському порту, до кінця не вивчена [1,2,4,5-7];

2) напруження впливають неоднозначно на механічні характеристики матеріалів [5-7];

3) вихід їх з ладу ходових коліс зумовлений переважно зношуванням їх поверхонь [8], руйнування та зношування реборд [9,10];

4) в реальних умовах експлуатації при огляді ходових коліс спостерігається одночасно декілька з пошкоджень (знос реборд, знос поверхонь катання та ін) [1,8,9,10];

5) характер пошкоджень коліс залежить від умов експлуатації [1,8,9,10].

Метою дослідження є визначення ресурсу ходових коліс механізмів мостових кранів з понаднормовими термінами експлуатації.

Викладення основного матеріалу дослідження. Для досліджень було обрано 4 ідентичні мостові крани, вантажопідйомністю 10 тон, які працюють у крюковому режимі у морських портах.

Для аналізу використано інформацію яка міститься у відповідних журналах технічного обслуговування та ремонту відповідних кранів з 2018 по 2021 роки.

Розбіжність часу заміни робочих коліс, які були виготовлені зі сталі 65Г методом литва, механізмів переміщення кранів не перевищувала 1 місяць.

Механізми кранів обстежували візуально та вимірювали знос коліс через 3 місяці протягом 4 років роботи. Аналіз отриманих даних показав, що найбільш зношуваними є реборди привідних колесі, знос поверхонь кочення значно менше у порівнянні з ребордами. Слід відмітити, що процес зношування коліс відбувається в зоні зіткнення колеса з рейкою.

Результати вимірів зносу зведені у табл.1.

Аналіз отриманих (дивись табл.1) вказує на те, що залежність зносу від часу роботи є нелінійною.

Для подальших розрахунків результатів вимірювань зносу усереднювали.

Таблиця 1

Результати виміряних середніх значення зносу h коліс для мостових кранів

Час роботи t , год.	Знос колеса h у мм																
	№1	№2	№3	№4	№5	№6	№7	№8	№9	№10	№11	№12	№13	№14	№15	№16	усер. знач.
1200	1,2	1,1	1,1	1,1	1,0	1,1	1,2	1,1	1,1	1,1	1,0	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,10
2400	2,5	2,4	2,6	2,5	2,4	2,3	2,5	2,4	2,6	2,5	2,4	2,3	2,6	2,5	2,4	2,3	2,45
3600	3,9	3,7	4,0	3,9	3,9	3,9	3,9	3,9	3,85	3,85	3,95	3,9	4,0	4,0	4,0	4,0	3,91
4800	5,3	5,2	5,3	5,1	5,3	5,0	5,3	5,2	5,2	5,1	5,3	5,1	5,3	5,1	5,3	5,1	5,20
6000	6,5	6,4	6,7	6,5	6,8	6,7	6,5	6,4	6,7	6,5	6,7	6,7	6,7	6,5	6,8	6,5	6,60
7200	8,5	8,4	8,6	8,5	8,7	8,6	8,5	8,4	8,6	8,5	8,6	8,5	8,6	8,5	8,7	8,6	8,55
8400	10,8	10,7	11,0	10,9	11,1	11,0	10,8	10,7	11,0	11,0	10,8	11,0	10,9	10,9	11,1	11,0	10,92
9600	12,8	12,7	13,0	12,9	12,6	12,9	12,8	12,7	13,0	12,9	12,6	12,8	13,0	12,9	12,6	12,9	12,82
10800	15,7	15,6	15,9	15,7	15,8	15,6	15,7	15,6	15,9	15,7	15,8	15,6	15,9	15,7	15,7	15,6	15,72
12000	18,8	18,7	18,6	18,9	18,6	18,5	18,8	18,7	18,5	18,6	18,6	18,8	18,7	18,8	18,7	18,6	18,68
13200	21,9	21,8	21,9	21,7	21,7	21,8	21,9	21,8	21,9	21,7	21,8	21,8	21,9	21,7	21,7	21,8	21,80
14400	23,5	23,5	24,0	22,9	23,5	23,6	23,5	23,5	24,0	22,9	23,5	23,6	24,0	22,9	23,5	23,6	23,50

Оскільки, знос кранових коліс було виміряно через відомі проміжки часу, тому використовуємо кореляційний аналіз та вважаємо залежність зносу від часу у вигляді функції [11,12]:

$$h = Ct^m, \quad (1)$$

де h – знос реборд кранових коліс, мм;

t – період (час) роботи, год;

C – постійна матеріалу коліс;

m – показник ступеня.

Для визначення постійних C и m залежності (1) складемо систему рівнянь:

$$\left. \begin{aligned} Y_i &= \lg h_1, \lg h_2, \lg h_3, \dots, \lg h_n \\ X_i &= \lg t_1, \lg t_2, \lg t_3, \dots, \lg t_n \end{aligned} \right\}, \quad (2)$$

Після чого, розраховуємо середні значення X_{cp} та Y_{cp}

$$X_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n}, \quad (3)$$

$$Y_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i}{n}, \quad (4)$$

де n – кількість досліджень.

визначаємо допоміжні величини для визначення параметрів функції:

$$S_x = \sum_{i=1}^n X_i^2 - nX_{cp}^2, \quad (5)$$

$$S_y = \sum_{i=1}^n Y_i^2 - nY_{cp}^2, \quad (6)$$

$$S_{xy} = \sum_{i=1}^n X_i Y_i - nX_{cp} Y_{cp}. \quad (7)$$

Тоді, параметрів функції C и m :

$$m = \frac{S_{xy}}{S_x}, \quad (8)$$

$$a = Y_{cp} - mX_{cp}, \quad (9)$$

$$C = 10^a, \quad (10)$$

Коефіцієнт кореляції K_{xy} :

$$K_{xy} = \frac{S_{xy}}{\sqrt{S_x S_y}}. \quad (11)$$

За запропонованим алгоритмом у MS Excel визначені: параметрів функції $C = 0,00015$ та $m = 1,24$ коефіцієнт кореляції $K_{xy} = 0,98$. Т.т, залежність зносу коліс:

$$h = 0,00015 t^{1,24}, \quad (12)$$

Розраховані та виміряні значення зносу коліс наведені на рис.1.

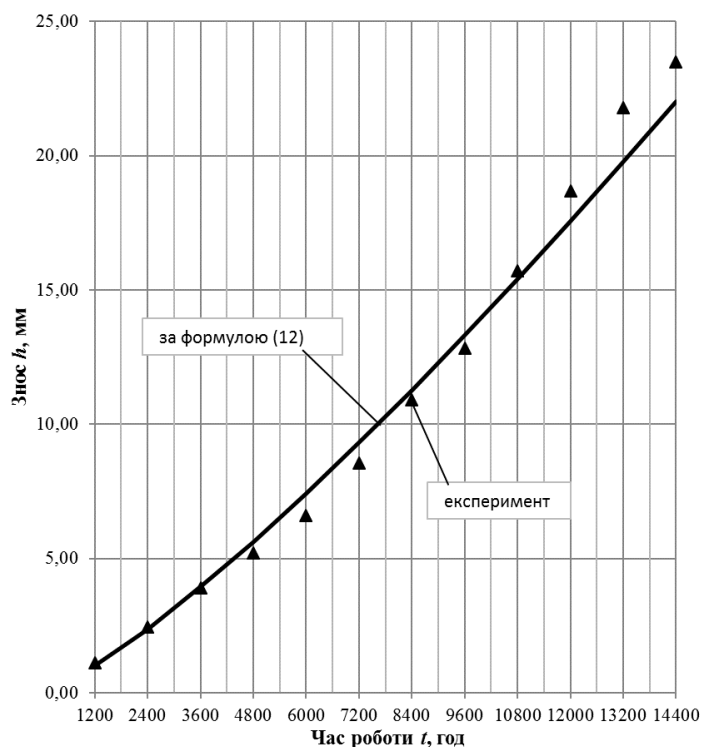


Рисунок 1 – Залежність зносу коліс від часу роботи крана

Отримані значення коефіцієнту кореляції вказують на те, що між зносом та часом роботи існує достатньо щільний зв'язок. Середнє значення похибки за запропонованою моделлю не перевищує 6,1%, що є цілком прийнятним для інженерних розрахунків.

Граничний знос визначається її шириною - 25 мм.

Для визначення ресурсу роботи колеса визначимо знос коліс за залежністю (12) протягом 19200 год роботи, т.т. 4 років роботи, як зазначено виробником. Результати розрахунку наведені на рис.2.

Оскільки, ресурс коліс, складає 16200 годин, значно менше закладеного виробником у 19200 год, то можна зробити висновок про недостатню їх надійність. Т.т. ресурс кранових коліс не перевищує 3,3...3,4 років роботи.

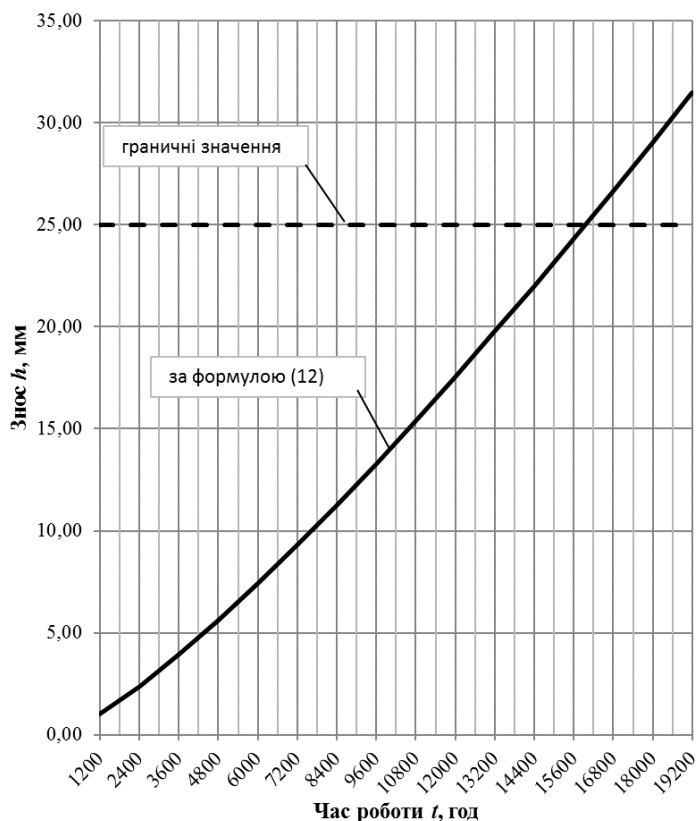


Рисунок 2 – Розрахункова залежність зносу колеса від часу роботи крана

Висновки. За результатами досліджень розраховані параметри модель зносу від часу у вигляді ступеневої функції.

Отримані значення коефіцієнту кореляції вказують на те, що між зносом та часом роботи існує достатньо щільний зв'язок. Середнє значення похибки за запропонованою моделлю не перевищує 6,1%, що є цілком прийнятним для інженерних розрахунків.

Встановлено, що ресурс кранових коліс не перевищує 3,3...3,4 років роботи, що менше 4 років зазначеного виробником.

ЛІТЕРАТУРА

1. Григоров О. В., Петренко Н. О. Вантажопідйомні машини: Навч. посібник. - Харків: НТУ «ХПІ», 2005. — 304 с.
2. Стрельбіцький В. В., Яременко В. О. Аналіз дефектів мостового крана вантажопідйомністю 10 тон // The V International Science Conference «Trends in science and practice of today. October 19 – 22, 2021, Ankara, Turkey. – 2021. – С. 453-454 .
3. Стрельбіцький В.В. Експериментальне дослідження впливу напрацювання на тріщиностійкість сталей мостових кранів/ В.В. Стрельбіцький // Вісник

Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2020. – № 4. – С. 138–142.

4. Qin, Li & Zhang, Bin & Li, Xinren & Huang, Zheng-qiu.. The Application Research on Safety performance Evaluation of Portal Crane based on Reliability Evaluation and risk Assessment. E3S Web of Conferences. Volume 257. - 2021. - pp.1-4.

5. 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.

6. Стрельбіцький В.В. Дослідження впливу механізму пересування на ресурс металоконструкції мостових кранів морських портів / В.В. Стрельбіцький // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2022. – № 3. – С. 249-253.

7. Стрельбіцький В.В. Експериментальне дослідження впливу напрацювання та асиметрії циклу на тріщиностійкість сталей порталних кранів / В.В. Стрельбіцький, О.О. Немчук // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2020. – № 1. – С. 245–248.

8. Слепужніков Є.Д. Механізми пересування мостових кранів: монографія / Є.Д.Слепужніков, Н.М. Фідровська, І.С. Варченко. –Харків: НУЦЗУ, 2019. – 124 с.

9. Цибульський В.А. Оптимізація властивостей матеріалів ходових коліс мостових кранів з метою підвищення їх довговічності // Дис. ... канд. техн. наук : 05.02.01 / Цибульський Вадим Анатолійович; Харківський автомобільно-дорожній інститут – Харків,1996. – 197 с.

10. Алейников В.А. Способ повышения износостойкости реборд крановых колес / В.А. Алейников, Л.П. Кондратьев // Подъемно-транспортная техника и склады. – 1992. – №2. – С. 25-27.

11. Горват А.А., Молнар О.О., Мінькович В.В. Методи обробки експериментальних даних з використанням MS Excel: Навчальний посібник. Ужгород: Видавництво УжНУ “Говерла”, 2019. – 160 с.

12. Надійність машин: Практикум. / О.С. Гринченко, В.Г. Кухтов, О.І. Алфьоров, В.Б. Савченко, Є.І. Калінін, В.І. Іванов, Г.П. Юр’єва; За ред. О.С. Гринченка, В.Г. Кухтова. – Х.: ТОВ «Планета-прінт», 2018. – 140 с.

REFERENCES

1. Hryhorov O.V., Petrenko N.O. Vantazhopidiomni mashyny: Navch. posibnyk. — Kharkiv: NTU «KhPI», 2005. — 304 s.

2. Strelbitskyi V.V., Yaremennko V.O. Analiz defektiv mostovoho kрана

vantazhopidiomnistiui 10 ton // The V International Science Conference «Trends in science and practice of today. October 19 – 22, 2021, Ankara, Turkey. – 2021. – S. 453-454.

3. Strelbitskyi V.V. Eksperymentalne doslidzhennia vplyvu napratsiuвання na trishchynostiikist stalei mostovykh kraniv/ V.V. Strelbitskyi // Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Tekhnichni nauky. – 2020. – № 4. – S. 138–142.4. Qin, Li & Zhang, Bin & Li, Xinren & Huang, Zheng-qiu.. The Application Research on Safety performance Evaluation of Portal Crane based on Reliability Evaluation and risk Assessment. E3S Web of Conferences. Volume 257. - 2021. - pp.1-4.

5. Strelbitskyi V.V. Doslidzhennia vplyvu napratsiuвання na dovhovichnist mekhanizmu peresuvannya 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.

6. Strelbitskyi V.V. Doslidzhennia vplyvu mekhanizmu peresuvannya na resurs metalokonstruksii mostovykh kraniv morskykh portiv / V.V. Strelbitskyi // Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Tekhnichni nauky. – 2022. – № 3. – S. 249-253.

7. Strelbitskyi V.V. Eksperymentalne doslidzhennia vplyvu napratsiuвання ta asymetrii tsykladu na trishchynostiikist stalei portalnykh kraniv / V.V. Strelbitskyi, O.O. Nemchuk // Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Tekhnichni nauky. – 2020. – № 1. – S. 245–248.

8. Slepuzhnikov Ye.D. Mekhanizmy peresuvannya mostovykh kraniv: monohrafiia / Ye.D.Slepuzhnikov, N.M. Fidrovskaya, I.S. Varchenko.– Kharkiv:NUTsZU,2019. – 124 s.

9. Tsybul'skyi V.A. Optyimizatsiia vlastyvostei materialiv khodovykh kolis mostovykh kraniv z metoiu pidvyshchennia yikh dovhovichnosti // Dys. ... kand. tekhn. nauk : 05.02.01 / Tsybul'skyi Vadym Anatoliiovych ; Kharkivskiy avtomobilno-dorozhniy instytut – Kharkiv,1996. – 197 s.

10. Aleinykov V.A. Sposob povыsheniya yznosostoikosty rebord kranovykh kolis / V.A. Aleinykov, L.P. Kondratev // Podъemno-transportnaya tekhnika y sklady. – 1992. – №2. – S. 25-27.

11. Horvat A.A., Molnar O.O., Minkovych V.V. Metody obrobky eksperymentalnykh danykh z vykorystanniam MS Excel: Navchalnyi posibnyk. Uzhhorod: Vydavnytstvo UzhNU "Hoverla", 2019. – 160 s.

12. Nadiinist mashyn: Praktykum. / O.S. Hrynchenko, V.H. Kukhtov, O.I. Alforov, V.B. Savchenko, Ye.I. Kalinin, V.I. Ivanov, H.P. Yurieva; Za red. O.S. Hrynchenka, V.H. Kukhtova. – Kh.: TOV «Planeta-print», 2018. – 140 s.

Received 22.11.2022.
Accepted 24.11.2022.

Modeling of operational reliability of running wheels of overhead cranes of seaports

Overhead cranes are widely in operation in sea and river ports for cargo transshipment in open and closed storage areas. Since they are the main link in technological processes, the productivity of Port production lines depends on their reliable and continuous operation. It is known that during the operation of cranes, 90% of the running wheels fail and are replaced with new ones due to intensive wear of the edges, and 60-70% of crane rails due to wear of their side faces. Since the service life is the main indicator of the durability of parts and assemblies, therefore, increasing the installation of wheel life is an urgent task, which will reduce the cost of repair and operation of cranes. As the experience of operation shows, running wheels have the most worn elements of movement mechanisms. Thus, their service life ranges from several months to 2-3 years. This is due to the fact that replacing the wheels is cheaper compared to replacing the crane track.

Since the service life is the main indicator of the durability of parts and assemblies, therefore, increasing the installation of wheel life is an urgent task, which will reduce the cost of repair and operation of cranes.

Analysis of studies of complex technical systems shows that the reliability of overhead crane mechanisms operated for more than 30 years in the Seaport is not fully understood, the nature of wheel damage depends on the operating conditions.

For research, 4 identical overhead cranes with a lifting capacity of 10 tons were selected, which operate in Hook mode in seaports. Crane wheels are made of 65g steel by casting. Crane mechanisms were visually examined and wheel wear was measured after 3 months during 4 years of operation. Based on the research results, the parameters of the Wear model from time to time in the form of a step function are calculated. The obtained values of the correlation coefficient indicate that there is a fairly tight relationship between wear and operating time. The average error value for the proposed model does not exceed 6.1%, which is quite acceptable for engineering calculations. It is established that the service life of Crane wheels does not exceed 3.3...3.4 years of operation, which is less than 4 years specified by the manufacturer.

Стрельбіцький Віктор Васильович – доцент, кандидат технічних наук, кафедра Підйомно-транспортні машини та інжиніринг портового технологічного обладнання, Одеський національний морський університет.

Бовнегра Любов Віталіївна - доцент, кандидат технічних наук, завідувач кафедри інформаційних технологій проектування та дизайну, Національний університет «Одеська політехніка».

Павлишко Андрій Володимирович - доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри інформаційних технологій проектування та дизайну, Національний університет «Одеська політехніка».

Strelbitskyi Viktor Vasylovych – PhD, associated professor, Hoisting and transport machines and engineering of port technological equipment, Odessa National Maritime University.

Bovnegra Liubov Vitaliivna - PhD, associated professor, Head of Department of Design Information Technologies and Design, Odessa Polytechnic National University.

Pavlyshko Andrii Volodymirovich - PhD, associated professor, Odessa Polytechnic National University.

Л.О. Кіріченко, П.П. Зінченко

ЗАСТОСУВАННЯ РЕКУРЕНТНОГО АНАЛІЗУ ДЛЯ КЛАСИФІКАЦІЇ РЕАЛІЗАЦІЙ ЕНЦЕФАЛОГРАМ

Анотація. У статті розглянуто використання машинного навчання для класифікації часових реалізацій які подано у вигляді рекурентних діаграм. Кожна часова реалізація перетворюється в матрицю рекурентних станів і представляється як чорно біле зображення. Отримані зображення реалізацій класифікуються за допомогою глибоких нейронних мереж. В якості класифікатора для зображень використовується глибока нейронна мережа залишкового типу. Проводиться бінарна класифікація реалізацій ЕЕГ. Результатом бінарної класифікації є виявлення епілептичного нападу. Результати дослідження показують, що розглянутий метод має високу точність класифікації. Запропонований підхід до класифікації може бути легко використаний на практиці.

Ключові слова: класифікація з використанням машинного навчання, класифікація часових рядів, рекурентні діаграми, реалізація ЕЕГ, глибокі залишкові мережі.

Актуальність і постановка задачі

Однією з найважчих завдань класифікації є класифікація часових рядів. Часовий ряд можна представити як часову реалізацію деякої динамічної системи, яка відображає багато внутрішніх і зовнішніх зв'язків цієї системи. Складні динамічні системи відповідають біологічним, інформаційним, технічним та соціальним процесам. Часові реалізації таких процесів є частково або повністю випадковими, мають зворотній нелінійний зв'язок та довгострокову кореляційну залежність. Добре відомим прикладом часових рядів, що мають вищеприписану структуру, є реалізації електроенцефалограми (ЕЕГ), які мають фрактальні властивості [1].

Людський мозок має електричне поле, яке характеризується електричними сигналами від декількох міліампер до кількох сотень міліампер. Кожен нейрон мозку генерує зміну електричного потенціалу, цей процес можна виміряти. Аналіз електричного поля мозку широко використовується для діагностики різних захворювань [2]. Таким чином, виникає завдання класифікації реалізацій ЕЕГ.

На сьогоднішній день для класифікації часових рядів широко використовується машинне навчання. Різні підходи до методів машинного навчання для класифікації часових рядів, включаючи алгоритми, вибір ознак та застосування, розглянуті в оглядових статтях [3-5]. Слід відзначити велику кількість алгоритмів, метрик та ознак, які можуть бути використані для порівняння та подальшої класифікації часових рядів.

Найчастіше, після передобробки часового ряду, з нього вилучається набір деяких ознак, які є вхідними для класифікатора. Вибір ознак залежить від завдання класифікації. Найпростішими ознаками для класифікації можуть бути значення самого часового ряду. В [6] було показано, що в разі виражених фрактальних властивостей достатньо розглядати значення ряду без розрахунку фрактальних характеристик. Популярним методом вилучення ознак є перетворення часового ряду в частотний домен за допомогою перетворення Фур'є або вейвлет-перетворення [7].

Вищезазначені підходи широко використовуються для класифікації реалізацій ЕЕГ. У огляді [8] представлено більшість сучасних методів машинного навчання, які використовуються для класифікації сигналів ЕЕГ. Огляд [9] акцентує увагу на використанні глибокого навчання для завдань класифікації ЕЕГ.

У той же час, в останні десятиліття, стали поширеними методи аналізу часових рядів на основі методів нелінійної динаміки. Вихідним пунктом у цьому випадку є факт, що одна часова реалізація дисипативної системи є достатньою для відновлення її атрактора, який містить усю інформацію про систему. Зокрема, мозок (або його частина) може бути розглянутим як нелінійна динамічна система, яка чутлива до початкових умов, і ЕЕГ є траєкторією цієї динамічної системи [2].

Один із методів, що виник у нелінійній динаміці, - аналіз рекурентності (метод рекурентних діаграм), спочатку запропонований в [10], а подальше розвинений в [11,12]. На сьогоднішній день аналіз рекурентності є поширеним і використовується для дослідження різних систем, включаючи ті, що мають фрактальні властивості [13]. Рекурентна діаграма містить інформацію про повторюваність станів дисипативної динамічної системи, що представлена часовим рядом. Рекурентні властивості можуть бути візуалізовані у формі геометричних структур і наочно продемонструвати динаміки часового ряду. Таким чином, техніка рекурентних діаграм перетворює часові ряди на зображення, які можуть бути класифіковані за допомогою методів комп'ютерного зору [14-16]. Проте такі дослідження досить нові і ще не стали широко поширеними.

Метою даної роботи є проведення класифікації ЕЕГ на основі рекурентних діаграм, які перетворюються на зображення і після цього класифікуються за допомогою нейромережі залишкового типу.

Класифікація часових рядів на основі графіків рекурентності

Метод рекурентних діаграм ґрунтується на відновленні атрактора системи з одиночної часової реалізації (процедура Паккарда-Такенса) [17]. У цьому випадку псевдофазовий простір станів X системи може бути отриманий шляхом реалізації значень u_i

$$x_i = (u_i, u_{i+\tau}, \dots, u_{i+(m-1)\tau}) \quad (1)$$

де x_i - значення псевдофазової траєкторії на i -му моменті часу, u_i - значення часової реалізації на i -му моменті часу, m - розмір псевдофазового простору, τ - затримка часу. Автори [11] запропонували метод, який дозволяє відобразити m -вимірну псевдофазову траєкторію x_i , $i = 1, \dots, N$, в бінарну матрицю розміром $N \times N$. Елемент з координатами (i, j) приймає значення 1, якщо стан \vec{x}_j є рекурентним до стану \vec{x}_i , тобто \vec{x}_j потрапляє в певний заданий окіл \vec{x}_i , і елемент (i, j) дорівнює 0 у зворотному випадку.

Така матриця (рекурентна діаграма) містить інформацію про поведінку часового ряду. Рекурентна діаграма RP - це матриця, де значення $RP_{i,j}$ дорівнює 1, коли відстань між \vec{x}_i і \vec{x}_j менше ε :

$$RP_{i,j} = \theta(\varepsilon \|x_i - x_j\|), \quad x_i, x_j \in R^m, \quad i, j = 1, \dots, N \quad (2)$$

де ε - радіус m -вимірного околу точки x_i , $\|x_i - x_j\|$ - відстань між точками, $\theta(\)$ - функція Хевісайда. Рекурентні діаграми легко візуалізуються в чорно-білому форматі. Тоді рекурентні стани відображаються чорним кольором, а решта - білим. В [1, 12, 18] було показано, що зміна кореляційної структури системи призводить до зміни топології рекурентної діаграми. Таким чином, аналіз рекурентних діаграм дозволяє класифікувати спостережувані часові ряди.

Вхідні дані

Для здійснення класифікації були обрані популярні дані записів мозкової активності [19]. Початковий набір даних містив записи мозкової активності для різних станів людини: епілептичний напад, зону пухлини, здорову частину мозку, коли людина має закриті очі, і коли вони відкриті. Таким чином, дані були розподілені на 5 класів. Кожен клас містив 100 файлів, де кожен файл відповідав одному об'єкту (людині). Кожен файл містив записи мозкової активності

протягом 23,5 секунди, що відповідало часовому ряду довжиною 4097 значень. У [2] було надано детальний опис цих даних мозкової активності та показано їхні нелінійні властивості. Незважаючи на те, що набір даних містив 5 класів часових рядів, більшість досліджень проводили бінарну класифікацію, де клас епілептичного нападу порівнювався з рештою. У [20] епілептичні напади діагностувалися за допомогою методів машинного навчання, таких як штучні нейронні мережі, наївний баєсівський класифікатор, k -найближчих сусідів, метод опорних векторів та k -середніх. Експеримент показав дуже добрі результати: для більшості алгоритмів точність бінарної класифікації записів тривалістю 23 секунди перевищувала 99%.

Складнішою задачею є визначення нападу в разі значно коротших даних. У наборі даних кожна часова реалізація з 4097 значень була розділена на 23 частини по 178 значень, що відповідало 1 секунді. У цій роботі ми використовували вищезгадані часові реалізації мозкової активності довжиною 178 значень. На рис. 1 показані часові реалізації ЕЕГ з 1-го класу (епілептичний напад) у верхній частині (а) та реалізації з інших класів у нижній частині (б). Рисунок 2 показує рекурентні діаграми, що відповідають часовим реалізаціям, представленим на рисунку 1. Варто відзначити, що практично неможливо візуально знайти різницю між класами ЕЕГ як у реалізаціях, так і в рекурентних діаграмах.

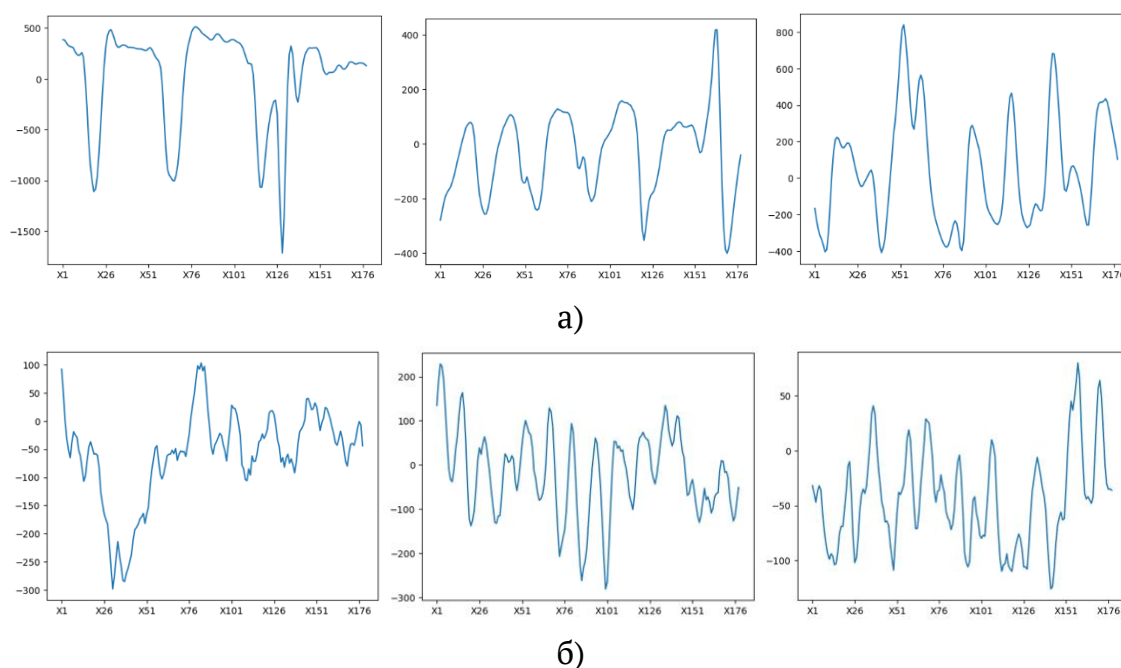


Рисунок 1 - Реалізації ЕЕГ епілептичного нападу а) та інших класів б)

Нейронні мережі для класифікації зображень

На сьогоднішній день, в зв'язку зі зростанням обчислювальної потужності та появою баз даних зображень, технології комп'ютерного зору стали дуже поширеними. Стало можливим застосовувати ці технології не лише в різних галузях науково-технічної діяльності, але й у повсякденному житті. Найкращі результати розпізнавання зображень показали глибокі нейронні мережі, зокрема згорткові нейронні мережі, які, відмінно від багат шарового перцептрона, враховують двовимірні топології зображень [21,22].

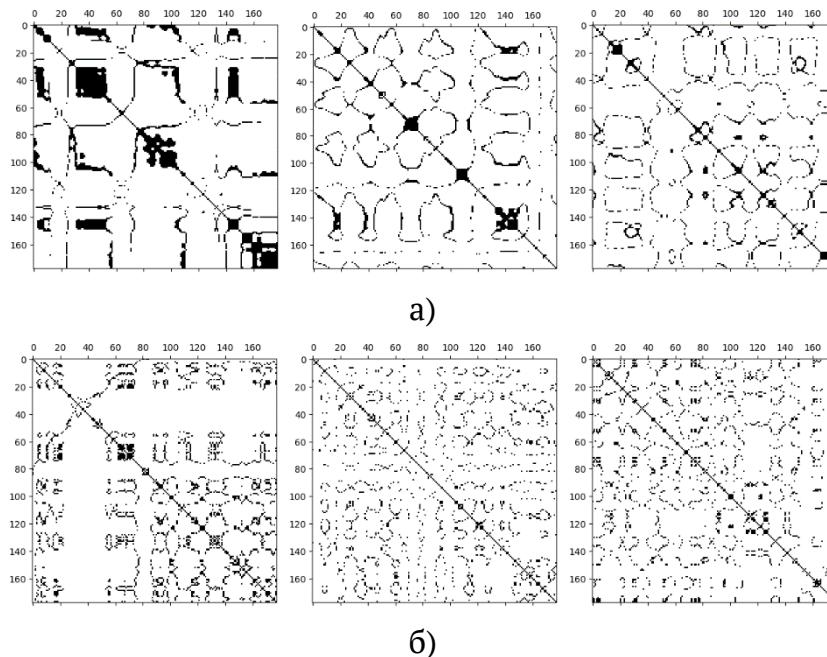


Рисунок 2 - Рекурентні діаграми епілептичного нападу а) та інших класів б)

Згорткові нейронні мережі отримують ознаки у багат шаровому режимі "від початку до кінця". Дослідження показали, що зі зростанням кількості шарів точність розпізнавання не збільшується значно: спочатку точність може зростати незначно, але чим глибше ми розширюємо мережу, тим гірше вона починає класифікувати. Це пов'язано з тим, що мережі навчаються методом зворотного поширення помилок, і внаслідок диференціювання за правилом ланцюга градієнт затухає для досить глибоких шарів. Для вирішення цієї проблеми була розроблена структура мережі зі залишковими блоками [23]. Особливістю залишкової мережі є те, що результат класифікації розширеної мережі не буде гіршим за базовий. Основна ідея полягає в заміні звичайного послідовного з'єднання шарів на скорочене з'єднання. Скорочені з'єднання обходять кілька шарів і передають значення відхилення. Їхні вихідні дані додаються до вихідних

даних групових шарів. Основною одиницею залишкової мережі є два шари з вагами, які не обов'язково є згортковими, та скорочене з'єднання, яке просто передає сигнал на вихід.

У рамках експерименту була використана залишкова нейронна мережа з 131 шаром з вагами. Мережа складалася з 11 окремих та 120 з'єднаних в блоки скорочених з'єднань. Перші 127 шарів призначені для виявлення характеристик (ознак), останні 4 використовуються для побудови функції класифікації. Глибока залишкова нейронна мережа містить десять блоків, три згорткових шари та один повністю з'єднаний шар. Вихід останнього повністю з'єданого шару подається на логістичну функцію, яка розподіляє на два класи. Нейрони в повністю з'єданому шарі з'єдані з усіма нейронами в попередньому шарі. Підвбіркові шари слідує після другого та третього згорткових шарів. Функція ReLU використовується для виходу кожного згорткового та повністю з'єданого шару. Для навчання на мережі використовувався адаптивний алгоритм оптимізації швидкості навчання Adam.

Експеримент, результати та обговорення

Експериментальні дані були взяті з [19]. Набір даних містить записи мозкової активності для близько 500 осіб протягом 23,5 секунди, які складаються з 4097 значень. В результаті було отримано 11500 часових рядів довжиною 178 значень для інтервалу 1 секунда.

Експеримент спочатку був проведений на вибірці з 7500 реалізацій (6000 без нападу / 1500 з нападом), де 6000 використовувалися для навчання, а 1500 - для тестування. Результати класифікації представлені у матриці помилок (Таблиця 1), де символ P означає, що об'єкт класифіковано як належний позитивному класу (напад), N - належність до негативного класу (без нападу), символ T показує, що клас був визначений правильно, а F - неправильне визначення.

Таблиця 1

Матриця помилок

	Значення	Справжній клас	
		Напад	Без нападу
Спрогнозований клас	Напад	279 (TP)	9 (FP)
	Без нападу	21 (FN)	1191 (TN)

На основі матриці помилок були обчислені класифікаційні метрики, які представлені в Таблиці 2. Варто зазначити, що результати класифікації, отримані в даній роботі на основі методу візуалізації рекурентних графіків, не пос-

тупаються за точністю результатам, отриманим у [21] за допомогою кількох різних класифікаторів.

Таблиця 2

Класифікаційні метрики

Вимір	Припадок(істина)
Точність (Accuracy)	0,98
Влучність (Precision)	0,96875
Повнота (Recall)	0,93
F1 міра (F1 score)	0,94898

Щоб визначити вплив розміру вибірки на якість класифікації, був використаний весь набір даних, де 8500 реалізацій було вибрано для навчання и 3000 - для тесту. Значення кваліфікаційних метрик не відрізнялися суттєво від результатів, поданих в табл.2.

Також на вибраному наборі даних була проведена багатокласова класифікація мозкової активності для різних станів людини, де номер класу відповідає відповідним ЕЕГ : 1-й - епілептичний напад, 2-й - зона пухлини, 3й - здорова частина мозку, 4 - закриті очі, 5- відкриті очі. Точність результатів класифікації, представлено в табл. 3.

Таблиця 3

Класифікаційні метрики

Класи	Точність
1, 2, 3, 4, 5	0,83
1, 3, 4	0,93
4, 5	0,87
3, 4	0,97

Висновки

У роботі було розглянуто досить новий підхід до вирішення завдання класифікації часових рядів на прикладі реалізацій ЕЕГ. Запропонований підхід, замість базується на перетворенні рядів в зображення та подальшій класифікації отриманих зображень за допомогою глибоких нейронних мереж. Для перетворення часових рядів у чорно-біле зображення використовувалася побудова рекурентних діаграм.

В якості класифікатора для зображень була вибрана мережа глибокого за-
лишкового зв'язку. Здійснювалася бінарна класифікація реалізацій ЕЕГ, що міс-
тили записи епілептичного нападу. Для експерименту використовувалися дані
з активності мозку з 178 значеннями, що відповідає 1 секунді. Результатом бі-
нарної класифікації було виявлення епілептичного нападу. Результати показа-
ли, що розглянутий метод класифікації має досить високу точність класифіка-
ції навіть при короткій довжині реалізацій ЕЕГ. Показники якості класифікації
- точність та F1-міра - дорівнювали відповідно 0,98 та 0,94898.

Проведений експеримент підтвердив успішність підходу до класифікації
часових рядів за їх візуалізацією. Подальше покращення якості класифікації
можливе двома способами. Перший - це покращення архітектури нейронної
мережі, а другий - розробка методів збільшення візуальної відмінності між ре-
курентними діаграмами різних класів часових рядів.

ЛІТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Kirichenko, L., Radivilova, T., Bulakh, V.: Binary classification of fractal time se-
ries by machine learning methods. In: Advances in Intelligent Systems and Comput-
ing, vol. 1020, pp. 701–711 (2019). https://doi.org/10.1007/978-3-030-26474-1_49
2. Andrzejak, R.G., Lehnertz, K., Mormann, F., Rieke, C., David, P., Elger, C.E.: Indi-
cations of nonlinear deterministic and finite-dimensional structures in time series of
brain electrical activity: dependence on recording region and brain state. Phys. Rev.
E 64(6), 061907 (2001)
3. Bagnall, A., Lines, J., Bostrom, A., Large, J., Keogh, E.: The great time series classi-
fication bake off: a review and experimental evaluation of recent algorithmic ad-
vances. Data Min. Knowl. Disc. 31(3), 606–660 (2017)
4. Buza, K.: Time series classification and its applications. In: Proceedings of the 8th
International Conference on Web Intelligence, Mining and Semantics, pp. 1–4 (2018)
5. Esling, P., Agon, C.: Time-series data mining. ACM Comput. Surv. (CSUR) 45(1),
1–34 (2012)
6. Bulakh, V., Kirichenko, L., Radivilova, T.: Time series classification based on frac-
tal properties. In: 2018 IEEE Second International Conference on Data Stream Min-
ing & Processing (DSMP), pp. 198–201 (2018). [https://doi.org/10.1109/
DSMP.2018.8478532](https://doi.org/10.1109/DSMP.2018.8478532)
7. Faraggi, M., Sayadi, K.: Time series features extraction using Fourier and Wavelet
transforms on ECG data (2019). [https://blog.octo.com/en/time-series-features-
extraction-using-fourier-and-wavelet-transforms-on-ecg-data/](https://blog.octo.com/en/time-series-features-
extraction-using-fourier-and-wavelet-transforms-on-ecg-data/)

8. Lotte, F., Bougrain, L., Cichocki, A., et al.: A review of classification algorithms for EEG-based brain-computer interfaces: a 10 year update. *J. Neural Eng.* 15(3), 031005 (2018)
9. Craik, A., He, Y., Contreras-Vidal, J.L.: Deep learning for electroencephalogram (EEG) classification tasks: a review. *J. Neural Eng.* 16(3), 031001 (2019). <https://doi.org/10.1088/1741-2552/ab0ab5>
10. Eckmann, J.P., Kamphorst, S.O., Ruelle, D.: Recurrence plots of dynamical systems. *World Sci. Ser. Nonlinear Sci. Ser. A* 16, 441–446 (1995)
11. Marwan, N., Romano, M.C., Thiel, M., Kurths, J.: Recurrence plots for the analysis of complex systems. *Phys. Rep.* 438(5–6), 237–329 (2007)
12. Marwan, N., Wessel, N., Meyerfeldt, U., Schirdewan, A., Kurths, J.: Recurrence plot-based measures of complexity and their application to heart-rate-variability data. *Phys. Rev. E* 66(2), 026702 (2002)
- 13 Kirichenko, L., Kobitskaya, Y., Habacheva, A.: Comparative analysis of the complexity of chaotic and stochastic time series. *Radioelectronics Inform. Manag.* 2(31), 126–134 (2014)
14. Hatami, N., Gavet, Y., Debayle, J.: Classification of time-series images using deep convolutional neural networks. In: Tenth International Conference on Machine Vision (ICMV 2017). International Society for Optics and Photonics (2018)
15. Hatami, N., Gavet, Y., Debayle, J.: Bag of recurrence patterns representation for time-series classification. *Pattern Anal. Appl.* 22(3), 877–887 (2019)
16. Michael, T., Spiegel, S., Albayrak, S.: Time series classification using compressed recurrence plots. In: Proceedings of ECML-PKDD (2015)
17. Kirichenko, L., Kobitskaya, Y., Habacheva, A.: Comparative analysis of the complexity of chaotic and stochastic time series. *Radioelectronics Inform. Manag.* 2(31), 126–134 (2014)
18. Takens, F.: Detecting strange attractors in turbulence. In: Rand, D., Young, L.S. (eds.) *Dynamical Systems and Turbulence*, Warwick 1980. Lecture Notes in Mathematics, vol. 898 (1980)
19. Wu, Q., Fokoue, E.: Epileptic Seizure Recognition Data Set. <https://archive.ics.uci.edu/ml/datasets/Epileptic+Seizure+Recognition>
20. Karlık, B., Hayta, B.: Comparison machine learning algorithms for recognition of epileptic seizures in EEG. In: Proceedings IWBBIO 2014 (2014)
- 21 Ciresan, D.C., Meier, U., Masci, J., Gambardella, L.M., Schmidhuber, J.: Flexible, high performance convolutional neural networks for image classification. In:

Twenty-Second International Joint Conference on Artificial Intelligence, pp. 1237–1242 (2011)

22. LeCun, Y., Bengio, Y.: Convolutional networks for images, speech, and time series. In: The Handbook of Brain Theory and Neural Networks, vol. 3361, no. 10 (1995)

23. Fung, V.: An overview of ResNet and its variants. Towards Data Science (2017)

Received 22.11.2022.

Accepted 29.11.2022.

Application of recurrent analysis to classify realizations of encephalograms

The current state of science and technology is characterized by a variety of methods and approaches to solving various tasks, including in the fields of time series analysis and computer vision. This abstract explores a novel approach to the classification of time series based on the analysis of brain activity using recurrent diagrams and deep neural networks.

The work begins with an overview of recent achievements in the field of time series analysis and the application of machine learning methods. The importance of time series classification in various domains, including medicine, finance, technology, and others, is emphasized. Next, the methodology is described, in which time series are transformed into grayscale images using recurrent diagrams. The key idea is to use recurrent diagrams to visualize the structure of time series and identify their nonlinear properties. This transformed information serves as input data for deep neural networks.

An important aspect of the work is the selection of deep neural networks as classifiers for the obtained images. Specifically, residual neural networks are applied, known for their ability to effectively learn and classify large volumes of data. The structure of such networks and their advantages over other architectures are discussed.

The experimental part of the work describes the use of a dataset of brain activity, which includes realizations from different states of a person, including epileptic seizures. The obtained visualization and classification methods are applied for binary classification of EEG realizations, where the class of epileptic seizure is compared with the rest. The main evaluation metrics for classification are accuracy, precision, recall, and F1-score. The experimental results demonstrate high classification accuracy even for short EEG realizations. The quality metrics of classification indicate the potential effectiveness of this method for automated diagnosis of epileptic seizures based on the analysis of brain signals.

The conclusions highlight the importance of the proposed approach and its potential usefulness in various domains where time series classification based on the analysis of brain activity and recurrent diagrams is required.

Кіріченко Людмила Олегівна – д.т.н., професор кафедри прикладної математики Харківського національного університету радіоелектроніки.

Зінченко Петро Петрович – аспірант кафедри прикладної математики Харківського національного університету радіоелектроніки.

Kirichenko Lyudmila Olehivna - Ph.D., professor of the Department of Applied Mathematics of the Kharkiv National University of Radio Electronics.

Zinchenko Petro Petrovych - graduate student of the Department of Applied Mathematics of the Kharkiv National University of Radio Electronics.

К.Ю. Островська, М.О. Шерстяних, І.В. Стовпченко, Ю.О. Каліберда
**ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПЛАТФОРМ УПРАВЛІННЯ
ОБЧИСЛЮВАЛЬНИМИ СЕРВІСАМИ ПРИ ОРГАНІЗАЦІЇ FOG COMPUTING**

Анотація. Робота присвячена дослідженню ефективності платформ управління обчислювальними сервісами при організації Fog computing.

В рамках роботи провадиться дослідження ефективності платформ контейнерної оркестрації з організацією Fog computing.

У ході проведення дослідження необхідно виконати такі завдання: 1) зробити підбір літератури, наукових публікацій та Інтернет статей, необхідних для проведення дослідження; 2) здійснити огляд платформ контейнерної оркестрації; 3) визначити ключові вимоги та критерії проведення дослідження; 4) спроектувати та реалізувати утиліту автоматичного проведення випробувань; 5) виконати дослідження ефективності платформ контейнерної оркестрації з організацією туманних обчислень; 6) проаналізувати отримані результати та зробити супутні висновки.

Організується розгортання Docker контейнерів. Для створення кластера використовується Docker Swarm. Вирішуються завдання вимірювання наступних параметрів: час розгортання одного контейнера, час розгортання групи контейнерів, час відгуку задачі горизонтального масштабування, час затримки передачі. Проводиться аналіз одержаних результатів випробувань.

Ключові слова: fog computing, утиліта, docker, docker контейнер, docker swarm, горизонтальне масштабування, контейнер, платформа, інтернет речей.

Актуальність та постановка проблеми. На сьогоднішній день, коли технології інтернету речей та надання хмарних обчислень як послуг впевнено знаходять своє застосування, розвиваються нові обчислювальні концепції, зокрема технології туманних обчислень. Даний вид обчислень досі є новою технологією, яка тільки починає набирати свою популярність.

Парадигма хмарних обчислень сприяла розвитку надання обчислювальних сервісів та інфраструктур як послуг, що дозволило заощадити кошти на створення та обслуговування власної обчислювальної інфраструктури. У цьому середовищі спрощено та автоматизовано масштабування додатків для задово-

лення потреб в умовах високого навантаження. Віртуалізація є ключовою технологією, що забезпечує ці можливості. В даний час контейнеризація стала популярною альтернативою віртуальним машинам і набула широкого застосування, у результаті інструменти оркестрації стали невід'ємною частиною хмарних обчислень. Незважаючи на успішне застосування технології контейнеризації, досі хмарні обчислення не забезпечують належного відповідності критеріям технологій Інтернету речей [1]. Управління службами, розгорнутими в туманному обчислювальному середовищі, є складним завданням, а інструменти контейнеризації та оркестрації реалізують її безпроблемне впровадження та використання [2].

Таким чином, дослідження ефективності платформ контейнерної оркестрації при організації туманних обчислень є актуальним завданням розвитку концепції туманних обчислень.

В рамках роботи організується розгортання Docker-контейнерів [3]. Для створення кластера використовується Docker Swarm. Вирішуються завдання вимірювання наступних параметрів: час розгортання одного контейнера, час розгортання групи контейнерів, час відгуку задачі горизонтального масштабування, час затримки передачі. Проводиться аналіз одержаних результатів випробувань.

Основні матеріали дослідження. Для достовірного дослідження для різних інструментів контейнерної оркестрації необхідно створити ідентичні умови виконання тестувань і провести ряд повторень кожного випробування для досягнення достовірних результатів. Для цього скористаємося віртуальними машинами, що надаються Amazon Web Services.

Для достовірності результатів проведення випробування необхідно розробити утиліту автоматичного проведення випробувань, яка має забезпечувати наступний функціонал:

- можливість налаштування, вибір та запуск випробування;
- моніторинг поточного випробування;
- демонстрація результатів випробування.

Для опису варіантів використання утиліти розроблено діаграму варіантів використання (див. рисунок 1) – діаграма, що відображає відносини між акторами та прецедентами.

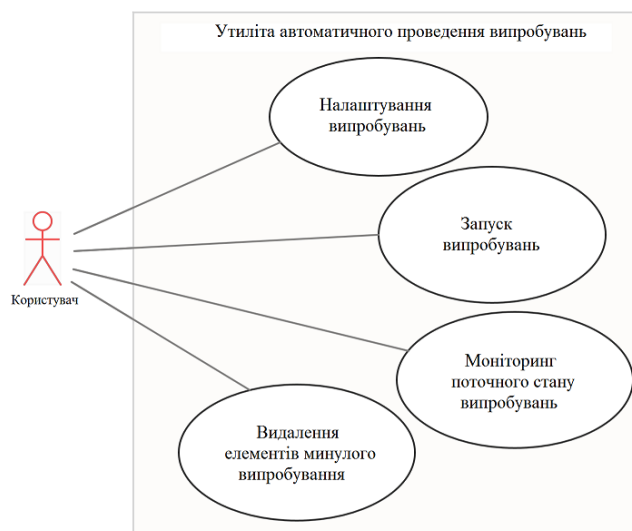


Рисунок 1 – Діаграма прецедентів утиліти автоматичного проведення випробувань

Для того, щоб виміряти час проведення випробувань, було обрано принцип зворотного відгуку кожного розгорнутого контейнера [4], який полягає в наступному:

- запускається слухач (сервер), який приймає повідомлення від контейнерів (клієнтів);
- слухач фіксує час початку випробування та приймає всі повідомлення, надіслані контейнерами під час розгортання, та показує час відгуку.

Щоб отримати час випробування, необхідно від часу останнього відгуку відняти час початку випробування.

Наочно принцип зворотного відгуку кожного контейнера можна побачити на рисунку 2.

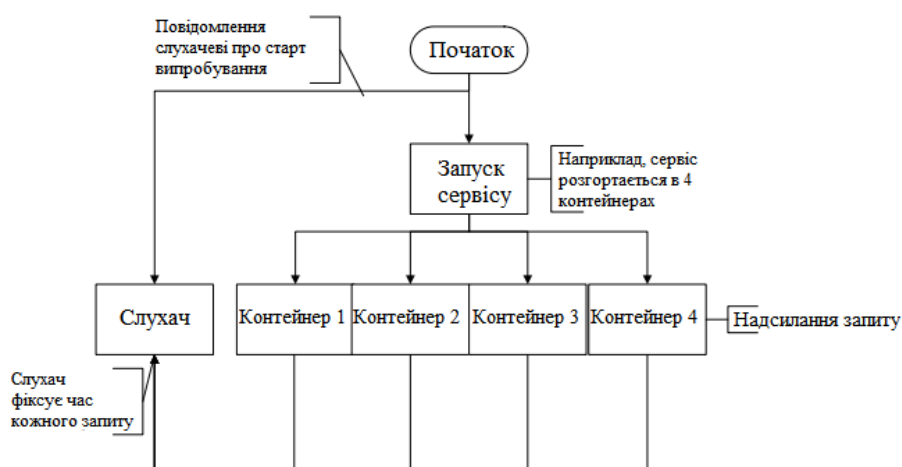


Рисунок 2 – Принцип зворотного відгуку кожного контейнера

Для автоматизації проведення випробувань було розроблено утиліту автоматичного розгортання та масштабування контейнерів мовою bash.

Блок-схему утиліти продемонстровано на рисунках 3– 4.

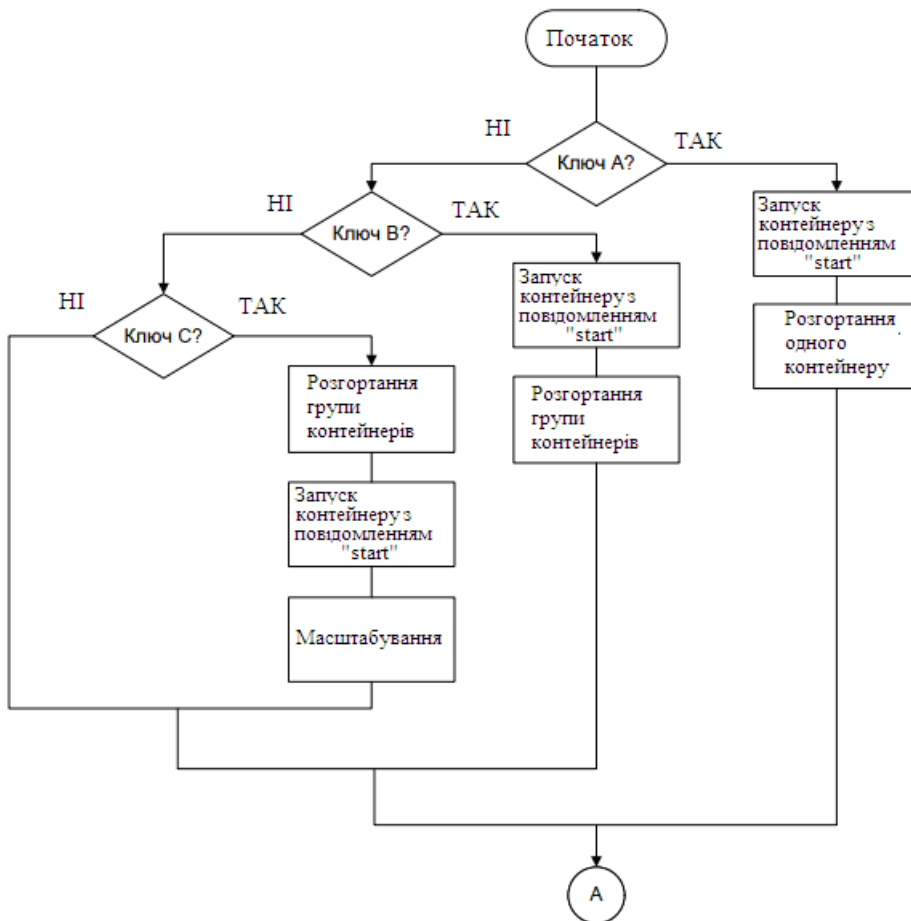


Рисунок 3 – Блок-схема утиліти (фрагмент 1)

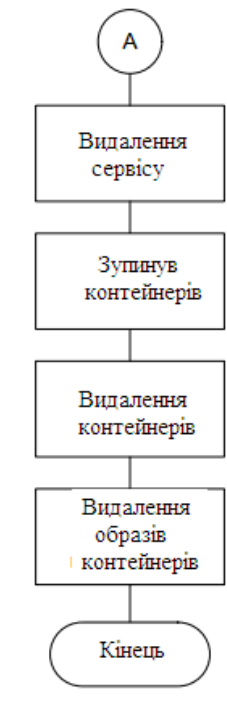


Рисунок 4 – Блок-схема утиліти (фрагмент 2)

Для проведення дослідження було обрано Amazon Web Service як сервісу, що пропонує послуги використання обчислювальних потужностей.

Для проведення випробувань нам знадобляться віртуальні машини рівня t2.medium (vCPU: 2, RAM: 4 Гб) у кількості 3 екземплярів з встановлену операційною системою Ubuntu Server 16.04 LTS.

Створимо та проініціалізуємо віртуальні машини (рисунок 5).

<input type="checkbox"/>	Manager	i-069d5e8c7553faa1f	t2.medium	us-east-1f	● running
<input type="checkbox"/>	Worker	i-0b193f189808f2a40	t2.medium	us-east-1f	● running
<input checked="" type="checkbox"/>	Worker	i-0ba5e08c1a28a7ab6	t2.medium	us-east-1f	● running

Рисунок 5 – Віртуальні машини в AWS

Так як віртуальні машини не містять необхідного попередньо встановленого програмного забезпечення (Docker), встановимо на кожній віртуальній машині його вручну.

Для встановлення Docker на віртуальні машини звернемося до офіційної документації за інструкцією із встановлення.

Виконаємо по черзі наступні команди кожної з віртуальних машин (рисунки 6 - 7):

```
$ sudo apt-get update

$ sudo apt-get install \
  apt-transport-https \
  ca-certificates \
  curl \
  gnupg-agent \
  software-properties-common
```

Рисунок 6 – Команди установки Docker (фрагмент 1)

```
$ curl -fsSL https://download.docker.com/linux/ubuntu/gpg | sudo apt-key add -

$ sudo add-apt-repository \
  "deb [arch=amd64] https://download.docker.com/linux/ubuntu \
  $(lsb_release -cs) \
  stable"

$ sudo apt-get update

$ sudo apt-get install docker-ce docker-ce-cli containerd.io
```

Рисунок 7 – Команди установки Docker (фрагмент 2)

Перевіримо стан встановленого програмного забезпечення на кожній віртуальній машині:

```
ubuntu@ip-172-31-67-190:~$ docker info
Profile: default
Kernel Version: 4.4.0-1105-aws
Operating System: Ubuntu 16.04.6 LTS
OSType: linux
Architecture: x86_64
CPUs: 2
Total Memory: 3.858GiB
Name: ip-172-31-67-190
```

Рисунок 8 – Виконання команди docker info на Manager (фрагмент)

```
ubuntu@ip-172-31-64-148:~$ docker info
Profile: default
Kernel Version: 4.4.0-1105-aws
Operating System: Ubuntu 16.04.6 LTS
OSType: linux
Architecture: x86_64
CPUs: 2
Total Memory: 3.858GiB
Name: ip-172-31-64-148
```

Рисунок 9 – Виконання команди docker info на Worker 1 (фрагмент)

```
ubuntu@ip-172-31-69-190:~$ docker info
Profile: default
Kernel Version: 4.4.0-1105-aws
Operating System: Ubuntu 16.04.6 LTS
OSType: linux
Architecture: x86_64
CPUs: 2
Total Memory: 3.858GiB
Name: ip-172-31-69-190
```

Рисунок 10 – Виконання команди docker info на Worker 2 (фрагмент)

Як ми бачимо з рисунків 8 – 10, програмне забезпечення Docker успішно встановлено на кожній віртуальній машині.

Щоб створити кластер, необхідно виконати команду `docker swarm init --advertise-addr [advertise-ip]:2377`, де `advertise-ip` – IP-адреса віртуальної машини, де передбачається запуск управляючої ноди.

```
ubuntu@ip-172-31-67-190:~$ docker swarm init --advertise-addr 172.31.67.190
Swarm initialized: current node (1axxwd7ck94i60dq8411t0vma) is now a manager.

To add a worker to this swarm, run the following command:

    docker swarm join --token SWMTKN-1-34oppkufdai92hzcmbpjfz75n7lnqwhngkxmvrlckx2kl7dtu-07npi2zct83il9smhqffzum63 172.31.67.190:2377

To add a manager to this swarm, run 'docker swarm join-token manager' and follow the instructions.
```

Рисунок 11 – Запуск кластера Docker Swarm

Керуюча нода запущена, кластер готовий до додавання робочих нод.

Щоб додати робочі ноди в кластер, виконуємо команду з висновку результату команди лістингу N: `docker swarm join --token [token] [manager ip]:[manager port]`.

```
ubuntu@ip-172-31-64-148:~$ docker swarm join --token SWMTKN-1-34oppkufdai92hzcmbpjfz75n7lnqwhngkmxvrlckx2kl7dtu-07npi2zct83il9smhqffzum63 172.31.67.190:2377
This node joined a swarm as a worker.
```

Рисунок 12 – Додавання робочої ноди 1

```
ubuntu@ip-172-31-69-190:~$ docker swarm join --token SWMTKN-1-34oppkufdai92hzcmbpjfz75n7lnqwhngkmxvrlckx2kl7dtu-07npi2zct83il9smhqffzum63 172.31.67.190:2377
This node joined a swarm as a worker.
```

Рисунок 13 – Додавання робочої ноди 2

Перевіримо ноди кластера командою: `docker node ls`.

```
ubuntu@ip-172-31-67-190:~$ docker node ls
ID                                HOSTNAME                STATUS AVAILABILITY MANAGER STATUS ENGINE VERSION
pcu682mf2mqwglrww2s482ib3      ip-172-31-64-148      Ready Active
1axkwd7ck94i60dq841it0vma *    ip-172-31-67-190     Ready Active Leader 19.03.9
sobub3a0ss7i8yginloyonlc5      ip-172-31-69-190     Ready Active
```

Рисунок 14 – Виконання команди `docker node ls`

З рисунків 11 – 14 видно, що кластер створено. Як ми можемо бачити на рисунку 14, нода `ip-172-31-67-190` є керуючою, а ноди `ip-172-31-64-148` та `ip-172-31-69-190` є робітниками.

Зрештою, ми можемо зробити висновок про те, що кластер запущений і готовий до проведення дослідження.

Для організації обміну повідомленнями використовуємо мережеву утиліту операційної системи Linux Netcat.

Створимо слухача, який прийматиме повідомлення і фіксуватиме час приходу повідомлення записом у файл `result.txt`. Код слухача продемонстровано на рисунку 15.

```
#!/bin/bash
ifconfig
while true; do ((nc -l 4789 >> result.txt | exit) && printf "$(date +%s%N | cut -b1-13) \n" >> result.txt); done
```

Рисунок 15 – Реалізація слухача (`server.sh`)

За допомогою Dockerfile створюється контейнер-клієнт (client:v2).

Контейнер-клієнт виконує дві функції:

- Встановлює з'єднання зі слухачем;
- Надсилає йому повідомлення «start».

Код контейнера-клієнта (client:v2) показано на рисунку 16.

```
FROM ubuntu
RUN apt update && apt-get install -y netcat
CMD ((echo "start") | (nc 172.31.67.190 4789 | exit)) && while true; do echo "msg"; sleep 1; done;
```

Рисунок 16 – Реалізація контейнера клієнта (client:v2)

За допомогою Dockerfile створюється контейнер-клієнт (client:v1).

Контейнер-клієнт виконує дві функції:

- Встановлює з'єднання з контейнером-слухачем;
- Надсилає йому повідомлення «message».

Код контейнера-клієнта (client:v1) продемонстровано на рисунку 17.

```
FROM ubuntu
RUN apt update && apt-get install -y netcat
CMD ((echo "message") | (nc 172.31.67.190 4789 | exit)) && while true; do echo "msg"; sleep 1; done;
```

Рисунок 17 – Реалізація контейнера клієнта (client:v1)

Для проведення досліджень використовуємо утиліту автоматичного проведення випробувань із ключами:

- А (випробування "Один контейнер");
- В (випробування "Група контейнерів");
- С (випробування "Горизонтальне масштабування").

Продемонструємо процес розгортання групи контейнерів на діаграмі розгортання (рисунок 18).

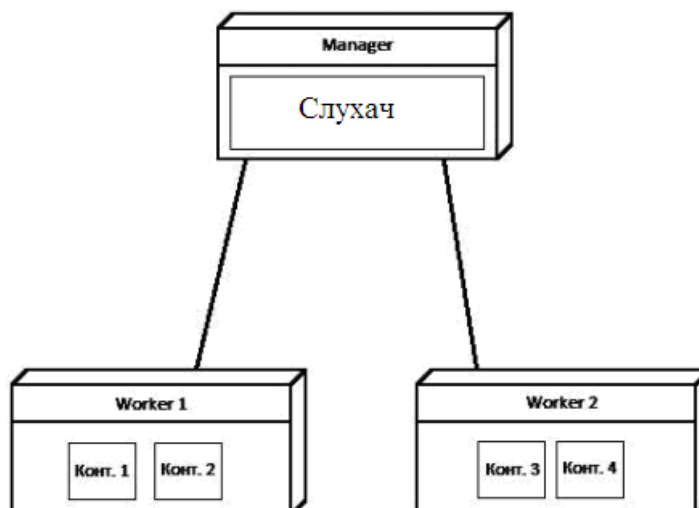


Рисунок 18 – Діаграма розгортання для випробування "Група контейнерів"

На рисунках 19 – 20 можемо бачити проведення випробування «Один контейнер» за допомогою утиліти автоматичного проведення випробувань.

```

ubuntu@ip-172-31-67-190:~$ bash auto-research.sh -A

overall progress: 1 out of 1 tasks
1/1: running
verify: Service converged
  
```

Рисунок 19 – Розгортання контейнера за допомогою утиліти

```

start
1591593712606
message
1591593714458
  
```

Рисунок 20 – Перегляд слухачів

Повторимо випробування 10 разів і представимо отримані дані табличному вигляді (див. таблицю 1).

Таблиця 1

Результати випробування "Один контейнер"

N	t₁	t₂	t₃	t₄	t₅	t₆	t₇	t₈	t₉	t₁₀
1	1852	1260	1866	2480	1072	1773	1130	2496	1857	2216

де N – кількість контейнерів, t₁₋₁₀ – час виконання випробування у мілісекундах.

На рисунках 21 – 22 можемо бачити проведення випробування "Група контейнерів" за допомогою утиліти автоматичного проведення випробувань.

```
ubuntu@ip-172-31-67-190:~$ bash auto-research.sh -B 4  
  
overall progress: 4 out of 4 tasks  
1/4: running  
2/4: running  
3/4: running  
4/4: running  
verify: Service converged
```

Рисунок 21 – Розгортання групи контейнерів за допомогою утиліти

```
start  
1591594448401  
message  
1591594449507  
message  
1591594449833  
message  
1591594449923  
message  
1591594450322
```

Рисунок 22 – Перегляд даних слухачів

Повторимо кожне випробування 10 разів і представимо отримані дані в табличному вигляді (див. таблицю 2).

Таблиця 2

Результати випробування "Група контейнерів"

N	t₁	t₂	t₃	t₄	t₅	t₆	t₇	t₈	t₉	t₁₀
2	1814	1793	1797	2384	2009	1800	1761	1139	1904	2168
4	1921	2386	2069	1914	1829	2875	1785	1822	2350	1736
8	2624	3385	2585	2531	3317	2575	2226	2960	2771	2538
16	4805	3728	5300	4217	3719	3906	4251	3973	4219	4793
32	6026	6288	6429	6191	6511	6813	6938	5894	6103	7178
48	8442	9132	7911	8437	8628	8071	7822	8365	7681	8411
64	9693	9903	10774	9766	10535	9943	10811	9836	9678	10234
128	18759	19690	19318	19266	19306	19416	18939	18859	19400	19056
150	23761	23284	23616	22577	23173	23256	23902	22913	23553	23640

де N – кількість контейнерів, t₁₋₁₀ – час виконання випробування у мілісекундах.

На рисунку 24 можемо бачити, що зі збільшенням кількості контейнерів, що розгортаються до 180, керуюча нода не справляється з даним завданням через навантаження на ядра процесора, яка досягає 100%, що призводить до примусового завершення команди розгортання.

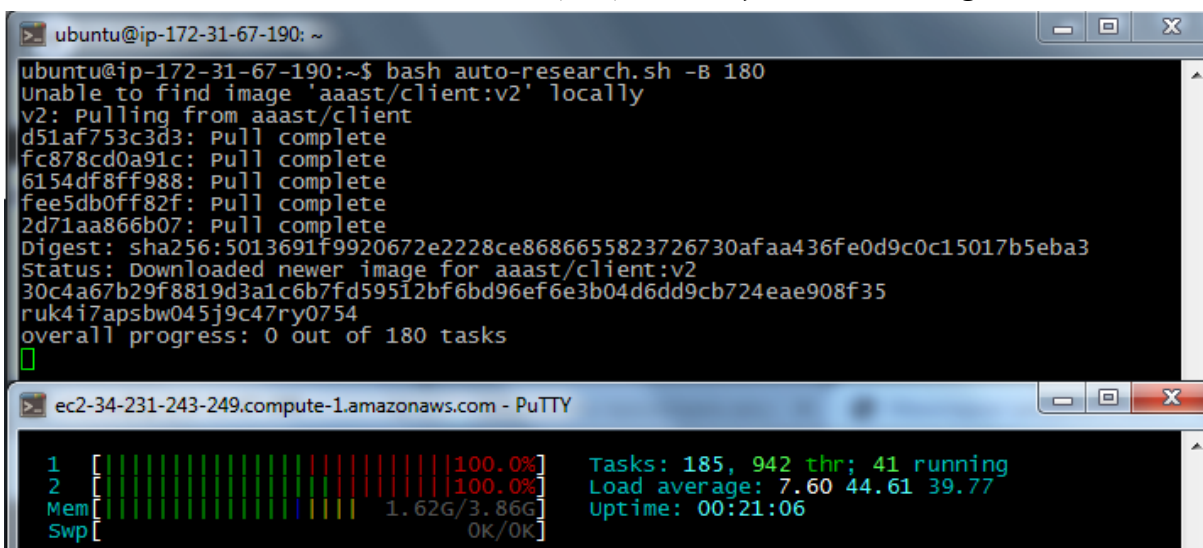


Рисунок 24 – Розгортання 180 контейнерів

На рисунках 25 – 26 можемо бачити проведення випробування «Горизонтальне масштабування» за допомогою утиліти автоматичного випробування.

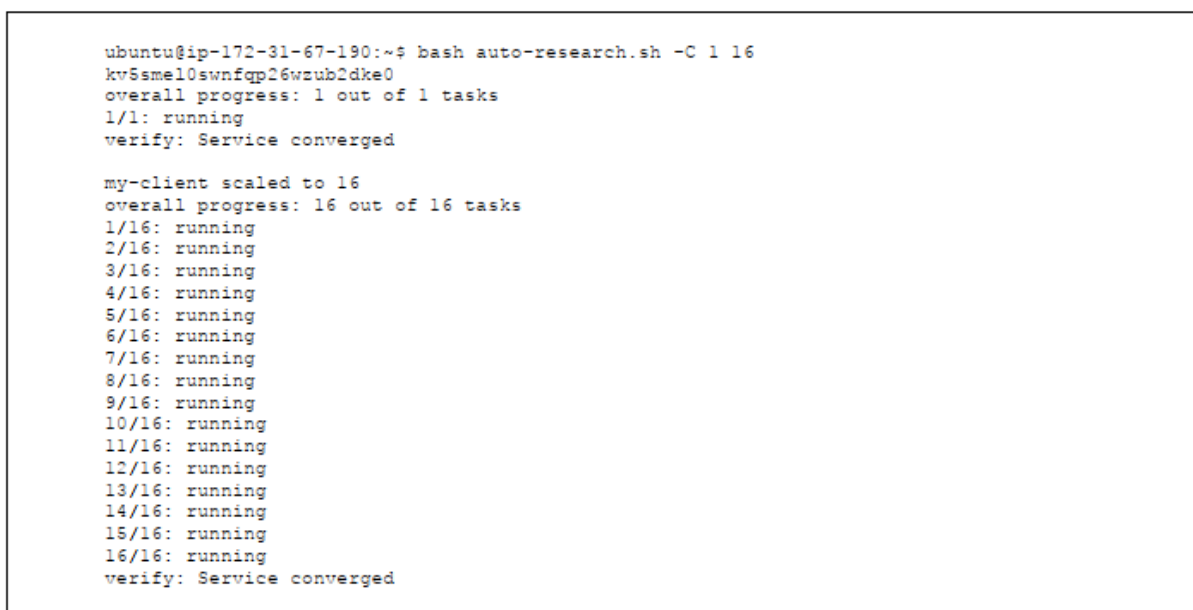


Рисунок 25 – Горизонтальне масштабування за допомогою утиліти

```
message
1591598241328

start
1591598247980
message
1591598249379
message
1591598249475
message
1591598249707
message
1591598249882
message
1591598249907
message
1591598249982
message
1591598250150
message
1591598250211
message
1591598250475
message
1591598250570
message
1591598250719
message
1591598250803
message
1591598251066
message
1591598251086
message
1591598251570
message
1591598251978
```

Рисунок 26 – Перегляд даних слухачів

Повторимо кожне випробування 10 разів і представимо отримані дані в табличному вигляді (див. таблицю 3).

Таблиця 3

Результати випробування "Горизонтальне масштабування"

N-M	t₁	t₂	t₃	t₄	t₅	t₆	t₇	t₈	t₉	t₁₀
1-16	4043	4028	3073	3922	3914	3693	4388	3089	3338	3590
16-64	7525	6972	7770	7636	7837	7079	8734	6912	6772	6279

де N – вихідна кількість контейнерів, M – кінцева кількість контейнерів, t₁₋₁₀ – час виконання випробування у мілісекундах.

На рисунках 27 – 35 можемо бачити проведення випробування «Latency».

```
ubuntu@ip-172-31-64-148:~$ docker network create \
> --driver overlay \
> --subnet 10.0.9.0/24 \
> --opt encrypted \
> my-network
toq9fcmcbwyyq2ollstjv9t47
```

Рисунок 27 – Створення мережі

```
ubuntu@ip-172-31-64-148:~$ docker network ls
NETWORK ID   NAME                DRIVER  SCOPE
0eba6ee9f6da bridge             bridge  local
cb519c9b6ceb docker_gwbridge    bridge  local
8abea94289d5 host                host    local
c0bi3i7g366b ingress            overlay  swarm
toq9fcmcbwyy my-network         overlay  swarm
e509e9407e6f none                null    local
```

Рисунок 28 – Перевірка мережі

```
ubuntu@ip-172-31-64-148:~$ docker service create \
> --replicas 3 \
> --name my-web \
> --network my-network \
> nginx
vkl22s0fq8gk8u2htkje8632s
overall progress: 3 out of 3 tasks
1/3: running
2/3: running
3/3: running
verify: Service converged
```

Рисунок 29 – Створення та підключення першого сервісу до мережі

```
ubuntu@ip-172-31-64-148:~$ docker service inspect \
> --format='{{json .Endpoint.VirtualIPs}}' \
> my-web
[{"NetworkID":"toq9fcmcbwyyq2ollstjv9t47","Addr":"10.0.9.2/24"}]
```

Рисунок 30 – Знаходження IP-адреси першого сервісу

```
ubuntu@ip-172-31-64-148:~$ docker service create --replicas 3 --name my-
web2 --network my-network nginx
adtfq4qvpt0r2c20yasc5ac0u
overall progress: 3 out of 3 tasks
1/3: running [=====>]
2/3: running [=====>]
3/3: running [=====>]
verify: Service converged
```

Рисунок 31 – Створення та підключення другого сервісу до мережі

```
ubuntu@ip-172-31-64-148:~$ docker service inspect --format='{{json
.Endpoint.VirtualIPs}}' my-web2
[{"NetworkID":"toq9fcmcbwyyq2ollstjv9t47","Addr":"10.0.9.8/24"}]
```

Рисунок 32 – Знаходження IP-адреси другого сервісу

```
ubuntu@ip-172-31-64-148:~$ docker exec -it 60e8d8b04bff bash
```

Рисунок 33 – Підключення до сервісу

```
root@60e8d8b04bff:/# apt-get install iputils-ping
```

Рисунок 34 – Встановлення iputils-ping

```
root@60e8d8b04bff:/# ping -c 10 -i 0.1 -v 10.0.9.2
PING 10.0.9.2 (10.0.9.2) 56(84) bytes of data.
64 bytes from 10.0.9.2: icmp_seq=1 ttl=64 time=0.127 ms
64 bytes from 10.0.9.2: icmp_seq=2 ttl=64 time=0.112 ms
64 bytes from 10.0.9.2: icmp_seq=3 ttl=64 time=0.108 ms
64 bytes from 10.0.9.2: icmp_seq=4 ttl=64 time=0.096 ms
64 bytes from 10.0.9.2: icmp_seq=5 ttl=64 time=0.109 ms
64 bytes from 10.0.9.2: icmp_seq=6 ttl=64 time=0.109 ms
64 bytes from 10.0.9.2: icmp_seq=7 ttl=64 time=0.111 ms
64 bytes from 10.0.9.2: icmp_seq=8 ttl=64 time=0.110 ms
64 bytes from 10.0.9.2: icmp_seq=9 ttl=64 time=0.108 ms
64 bytes from 10.0.9.2: icmp_seq=10 ttl=64 time=0.110 ms

--- 10.0.9.2 ping statistics ---
10 packets transmitted, 10 received, 0% packet loss, time 936ms
rtt min/avg/max/mdev = 0.096/0.110/0.127/0.007 ms
```

Рисунок 35 – Виконання команди ping -c 10 -i 0.1 -v 10.0.9.2

Таблиця 4

Результати випробування "Latency"

N	t ₁	t ₂	t ₃	t ₄	t ₅	t ₆	t ₇	t ₈	t ₉	t ₁₀
10	0.127	0.112	0.108	0.096	0.109	0.109	0.111	0.110	0.108	0.110

де N – кількість запитів, t₁₋₁₀ – час виконання запитів мілісекундах.

Проаналізуємо отримані дані з раніше проведених випробувань та представимо отримані значення у табличному вигляді (таблиця 5).

Таблиця 5

Підсумкові результати випробувань

Найменування випробувань	N	Середній час, мс	Середній час розгортання одного контейнера, мс
Час розгортання одного контейнера в кластері	1	1800,2	1800,20
	2	1856,9	928,45
	4	2 068,7	517,18
	8	2 751,2	343,90
	16	4 291,1	268,19
	32	6 437,1	201,16
	48	8 290,0	172,71

	64	10 117,3	158,08
	128	19 255,6	150,43
	150	23 533,6	157,02
	180	N/A	N/A
Час горизонтального масштабування існуючих контейнерів	1-16	3 707,8	247,19
	16-64	7 351,6	153,16
Тимчасові затримки передачі повідомлень між хостами в кластері	10	0,11	N/A

Графіки одержаних результатів.



Рисунок 36 – Середній час розгортання



Рисунок 37 – Середній час розгортання одного контейнера

З рисунка 36 можемо бачити, що зі збільшенням кількості розгортання контейнерів час розгортання збільшується.

Так, припустимо, зі збільшенням кількості контейнерів з 1 до 16, час розгортання збільшується в 2,4 рази, зі збільшенням кількості контейнерів з 16 до 64, час розгортання також збільшується в 2,4 рази, при збільшенні кількості з 64 до 150, час розгортання збільшується в 2,3 рази.

На рисунку 37 спостерігаємо, що зі збільшенням числа розгорнутих контейнерів середній час розгортання одного контейнера зменшується.

Так, для розгортання одного контейнера потрібно 1800,2 мс, коли для групи з 64 контейнерів, середній час розгортання одного контейнера займає лише 158,08 мс. Зниження часу розгортання одного контейнера зі збільшенням кількості контейнерів пов'язане з розпаралелюванням виконання завдань розгортання у кластері.

Також варто звернути увагу на те, що при розгортанні групи з 128 контейнерів час розгортання одного контейнера займає 150,01 мс, коли для групи зі 150 контейнерів час розгортання займає 155,78 мс, що говорить нам про те, знайдено точку насичення середнього часу розгортання одного контейнера під час виконання завдання розгортання групи контейнерів.

Окремо варто зазначити, що зі збільшенням кількості контейнерів, що розгортаються до 180, керуюча нода не справляється з даним завданням через навантаження на ядра процесора, що досягає 100%, що призводить до примусового завершення команди розгортання.

З таблиці 5 можемо помітити, що масштабувати контейнеризовані програми вигідніше, ніж розгортати необхідне кількість заново, тому що при еквівалентних задачах (розгортання 1642 контейнерів та горизонтальне масштабування з 1 до 16 контейнерів, а також розгортання 48 контейнерів та горизонтальне масштабування з 16 до 64 контейнерів) бачимо, що масштабування виконується швидше приблизно на 12-14% за рахунок того, що масштабований контейнеризований додаток не потребує додаткового скачування образів.

Середній час затримки при передачі запитів між кластеризованими вузлами склало 0.11 мс.

Тому що лідером у програмному забезпеченні для автоматизації розгортання та управління додатками в середовищах з підтримкою контейнеризації є Docker, а Docker Swarm є рідною системою кластеризації, яка перетворює набір Docker-хостів на один послідовний кластер, можемо відзначити безперешкодну взаємодію кластера Docker Swarm із Docker-контейнерами.

Також варто відзначити, що платформа контейнерної оркестрації Docker Swarm відрізняється простотою освоєння та розгортання кластера.

Висновок. В роботі було розроблено утиліту автоматичного проведення випробувань. Також було проведено випробування «Один контейнер», «Група контейнерів», «Горизонтальне масштабування», «Latency».

Для виконання поставленої мети було вирішено такі завдання:

- здійснено підбір літератури, наукових публікацій та інтернет статей, необхідних для проведення дослідження;
- виконано огляд платформ контейнерної оркестрації;
- визначено ключові вимоги та критерії проведення дослідження;
- спроектовано та реалізовано утиліту автоматичного проведення випробувань;
- виконано дослідження ефективності платформ контейнерної оркестрації з організацією туманних обчислень

ЛІТЕРАТУРА

1. Что такое интернет вещей и как он работает? [Електроний ресурс] URL: <https://server-shop.ua/the-internet-of-things-and-the-scope-of-its-use.html> (дата звернення 06.12.2022р.)
2. IoT, туман и облака: поговорим про технологии? [Електроний ресурс] URL: <https://habr.com/ru/company/cloud4y/blog/467711/> (дата звернення 06.12.2022р.)
3. Моуэт Э. Использование Docker / Э. Моуэт; пер. с англ. А.В. Снастина; науч. ред. А. А. Маркелов. – М.: ДМК Пресс, 2017. – 354 с.
4. Evaluating Container Platforms at Scale. [Електроний ресурс] URL: <https://medium.com/on-docker/evaluating-container-platforms-at-scale-5e7b44d93f2c> (дата звернення 06.12.2022р.)
5. Колісник Д.Р., Місевич К.С., Коваленко С.В. Системна архітектура IoT-Fog-Cloud для систем аналізу великих даних і кібербезпеки: огляд туманних обчислень, впровадження аудиту інтернету речей. Сучасний захист інформації. 2020. № 3. С. 34–38.

REFERENCE

1. Chto takoe ynternet veshchei y kak on rabotaet? [Elektronyi resurs] URL: <https://server-shop.ua/the-internet-of-things-and-the-scope-of-its-use.html> (data zvernennia 06.12.2022r.)
2. IoT, tuman y oblaka: pohovorym pro tekhnolohyy? [Elektronyi resurs] URL: <https://habr.com/ru/company/cloud4y/blog/467711/> (data zvernennia 06.12.2022r.)

3. Мовэт Э. Yspolzovanye Docker / Э. Мовэт; per. s anhl. A.V. Snastyna; nauch. red. A. A. Markelov. – М.: DMK Press, 2017. – 354 s.
4. Evaluating Container Platforms at Scale. [Elektroni resurs] URL: <https://medium.com/on-docker/evaluating-container-platforms-at-scale-5e7b44d93f2c> (data zvernennia 06.12.2022r.)
5. Kolisnyk D.R., Misevych K.S., Kovalenko S.V. Systemna arkhitektura IoT-Fog-Cloud dlia system analizu velykykh danykh i kiberbezpeky: ohliad tumannykh obchys-len, vprovadzhennia audytu internetu rechei. Suchasnyi zakhyst informatsii. 2020. № 3. S. 34–38.

Received 10.12.2022.

Accepted 15.12.2022.

***Research of the efficiency of computing services management platforms
in the organization of fog computing***

The work is devoted to studying the effectiveness of computing service management platforms in the organization of Fog Computing.

As part of the work, the effectiveness of container orchestration platforms with the Fog computing organization is being studied.

During the research, it is necessary to complete the following tasks: 1) select literature, scientific publications and Internet articles necessary for the research; 2) inspect container orchestration platforms; 3) determine the key requirements and criteria for conducting the study; 4) design and implement an automatic testing utility; 5) conduct a study of the effectiveness of container orchestration platforms with the organization of fog computing; 6) analyze the results obtained and draw related conclusions.

Deployment of Docker containers is organized. Docker Swarm is used to create a cluster. The problems of measuring the following parameters are solved: deployment time of one container, deployment time of a group of containers, response time of the horizontal zoom task, transmission delay time. The analysis of the obtained test results is carried out.

Keywords: fog computing, utility, docker, docker container, docker swarm, horizontal scaling, container, platform, Internet of Things.

Островська Катерина Юріївна – к.т.н., доц. кафедри інформаційних технологій і систем ІПБТ УДУНТ.

Шерстяних Микита Олександрович – магістр кафедри інформаційних технологій і систем ІПБТ УДУНТ.

Стовпченко Іван Володимирович – старший викладач кафедри інформаційних технологій і систем ІПБТ УДУНТ.

Каліберда Юрій Олегович – старший викладач кафедри інформаційних технологій і систем ІПБТ УДУНТ.

Ostrowska Kateryna - Ph.D., Assoc. Department of Information Technologies and Systems of Information Technology of USUNT.

Sherstyanih Mykita – Master of the Department of Information Technologies and Systems of Information Technology and Information Technology of UDUNT.

Stovchenko Ivan - senior lecturer at the Department of Information Technologies and Systems of Information Technology and Information Technology of UDUNT.

Kaliberda Yury - senior lecturer at the Department of Information Technologies and Systems of Information Technology and Information Technology of UDUNT.

М.В. Андрюхіна, Т.В. Селівьорстова

**АРХІТЕКТУРНЕ РІШЕННЯ ДЛЯ ВЕБ-ДОДАТКУ
DDP (DIPLOMA DEFENSE PROJECT)
ДЛЯ ДОКУМЕНТУВАННЯ ПРОЦЕСУ ЕКЗАМЕНУВАННЯ**

Анотація. Стаття присвячена розробці архітектури програмного забезпечення. Головним завданням запропонованої архітектури є цифровізація роботи членів екзаменаційної комісії, більш швидкої обробки документації в процесі захисту. Технічна можливість зменшити навантаження на секретаря комісії існує вже сьогодні. В міру збільшення кількості студентів випускників, важливості вчасного документування та перевірки інформації актуальним постало питання формування відповідної документації в процесі захисту за допомогою певного програмного забезпечення.

Як свідчить практика розвинених країн, саме широке використання цифрових технологій (у сферах виробництва, фінансів, державного управління, соціального обслуговування тощо) забезпечує суттєве підвищення ефективності економічної діяльності та якості суспільного життя. Україна також стала на шлях цифровізації, про що свідчить Прийняття у 2018 році Концепції розвитку цифрової економіки та суспільства України на 2018-2020 роки та затвердженому плані заходів щодо її реалізації.

Робота секретаря екзаменаційної комісії являє собою рутину з ведення документації: ведення протоколів, формуванню звітів, підрахунок статистичних даних. Щоб спростити роботу членів комісії є можливість практичного застосування такої інновації як проєкт DDP (diploma defense project). Проєкт у статті запропоновано розробити за допомогою фреймворка Ruby on Rails. Ruby входить до складу більшості дистрибутивів ОС Linux, поставляється з Mac OS X і доступна для користувачів інших операційних систем. Станом на серпень 2022 року Ruby входить до топ 20 найпопулярніших мов програмування за версією авторитетного спеціалізованого рейтингу Tiobe.

У статті також описаний процес створення архітектурного рішення для проєкту DDP, описані рекомендаційні технології для його створення, а також наведені UML діаграми, що більш детально описують архітектуру проєкту.

Ключові слова: Ruby on Rails, члени екзаменаційної комісії, UML діаграми, нефункціональні вимоги, MVC, веб сервіс.

Постановка проблеми. Цифровізація - насичення фізичного світу електронно-цифровими пристроями, засобами, системами та налагодження елект-

ронно-комунікаційного обміну між ними, що фактично уможлиблює інтегральну взаємодію віртуального та фізичного, тобто створює кіберфізичний простір.

При системному державному підході цифрові технології будуть значно стимулювати розвиток відкритого інформаційного суспільства як одного з істотних факторів розвитку демократії в країні, підвищення продуктивності, економічного зростання, а також підвищення якості життя громадян України [1].

Поставлено завдання розробити програмну архітектуру для цифровізації діяльності членів екзаменаційної комісії та прискорення обробки документації під час захисту. Проблема полягає в надмірному навантаженні на секретаря екзаменаційної комісії з документуванні процесу захисту, формуванні звітів та ін.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На просторах інтернету запропоновано багато статей із розробки веб-сервісів за допомогою Ruby on Rails. Але найголовнішим джерелом інформації є сайт з офіційною документацією RoR.

У третьому виданні Software Architecture in Practice Лен Басс, Пол Клементс та ін. знайомлять нас із концепціями та найкращими практиками архітектури програмного забезпечення — як структурована система програмного забезпечення та як елементи цієї системи мають взаємодіяти. У 2021 році вийшло четверте видання Software Architecture in Practice, яке оновлене одинадцятьма новими розділами, де детально пояснює, що таке архітектура програмного забезпечення, чому вона важлива та як її проектувати, створювати, аналізувати, розвивати та керувати нею дисциплінованими та ефективними способами.

Цікавою є робота [2], де представлено інформаційну систему документаційного забезпечення роботи секретаря екзаменаційної комісії Нац. ун-ту “Львівська політехніка”, обґрунтовано необхідність та доведено ефективність такого впровадження.

У вищезгаданих наукових працях та підручниках з архітектури детально описані теоретичні аспекти, які потрібно враховувати у розробці веб-сервісів. Автори приводять свої доводи, щодо доцільності використання тих, чи інших технологій після визначення функціональних та нефункціональних вимог клієнта. Але досі немає єдиного програмного рішення, щодо автоматизації робочого місця секретаря екзаменаційної комісії та членів комісії в цілому.

Мета роботи - дослідження наявних архітектурних рішень для автоматизації роботи екзаменаційної комісії та розробка архітектурного рішення для подальшого створення програмного продукту на його основі для збільшення ефективності та покращення якості процесу захисту. Це важливий практичний зв'язок з потребами сучасної освітньої системи.

Викладення основного матеріалу дослідження. Для кожного архітектурного стилю можна знайти еталонну архітектуру, яка описує основні частини конструювання, призначення та залежності між ними. Було обрано REST. Архітектурний стиль REST дуже популярний під час побудови веб-сервісів.

Важливим етапом є визначення Architecture Significant Requirements (ASRs), тобто обрання патернів для виконання вимог щодо якості, обмежень і деяких функціональних вимог [3].

Передусім треба визначити стейкхолдерів, тобто, дізнатись, хто зацікавлений у проєкті. Необхідно почути потреби всіх людей, які дотичні до системи, адже комусь будуть вкрай важливі квартальні звіти, а комусь - документація на систему тощо.

В нашому випадку визначені наступні - *секретар комісії, члени комісії, голова комісії, науковий керівний, студент, який проходить процедуру захисту*. Клієнт-замовник вважається кафедра.

Далі спробуємо провести аналіз нефункціональних вимог. Є багато способів збору нефункціональних вимог (вимог до якості): інтерв'ю та опитувальники для клієнтів, quality attributes workshops, реверс-інжиніринг систем, що вже існують.

Було сформовано анкету для викладачів, які мали досвід членства в комісії. Питання в анкеті спрямовані на отримання додаткової конкретної інформації про очікування та потреби членів комісії щодо документування та методів оцінювання (Рис. 1). Це дозволило краще врахувати їхні потреби та вимоги при розробці проєкту.

По завершенню збору вимог ми стикнулись із деякими розбіжностями у відповідях, які були враховані. Результати опитування будуть наведені в дисертаційній роботі.

Анкета (анонімна)

Продуктивність:

- a. Яку швидкість реакції системи ви вважаєте прийнятною?
- b. Які очікувані максимальні навантаження (кількість студентів) на систему у певний період часу?

Безпека:

- a. Які вимоги до забезпечення безпеки та конфіденційності даних ви маєте?
- b. Які методи аутентифікації вважаєте найбільш надійними для доступу до системи?

Доступність:

- a. Яка максимально прийнятна кількість відмов системи впродовж певного періоду?
- b. Які механізми ви хочете бачити для забезпечення найвищої доступності?

Масштабованість:

- a. Як швидко система має масштабуватися для відповіді на зростання обсягів використання?

!

Інтерфейс:

- a. Які очікувані вимоги до інтерфейсу користувача з точки зору зручності та інтуїтивності?
- b. Які бажані мови та технології для інтерфейсу ви надасте перевагу?

Підтримка та управління:

- a. Які очікувані вимоги до рівня підтримки та служби підтримки для користувачів системи?
- b. Які можливості адміністрування та управління системою вам необхідні?

Культура та соціальні аспекти:

- a. Як ви оцінюєте важливість забезпечення дружеского та етичного середовища в системі?
- b. Як система повинна сприяти спільноті та співпраці серед стейкхолдерів?

Документування захистів кваліфікаційних робіт:

- a. Які функції системи ви хочете, щоб спрощували процес документування захистів?

Використання методів системного аналізу:

- a. Які конкретні методи системного аналізу ви розглядаєте для оцінювання експериментальних робіт?
- b. Як очікується, що система сприятиме використанню цих методів та поліпшить процес оцінювання?

Рисунок 1 - Анонімна анкета для членів комісії

Проведений аналіз функціональних вимог (architecturally significant requirements). У вимогах визначені фактори, що суттєво впливають на вибір архітектурного стилю та інструментів (наведені нище).

Аналіз обмежень, які має клієнт. Розробка на часній ініціативі підтримується обмеженими людськими та технічними ресурсами. Це може вплинути на швидкість та масштабність реалізації проекту.

Отже, кафедра, яка визначена як клієнт проекту, має наступні обмеження:

- бюджетні обмеження;

- часові обмеження; це може вплинути на обсяг та складність функціоналу, який може бути реалізований;

- технічні обмеження; проєкт повинен відповідати можливостям та обмеженням Ruby on Rails. Прив'язка до обладнання - вузьке місце. Обмежений обсяг пам'яті, обмеження часу виконання операцій, обмежені можливості вводу/виводу, нетрадиційні інтерфейси користувача та ін. У випадку системи DDP прив'язка до обладнання користувачів відсутнє, бо для використання сайту користувач має змогу сам обирати технічне обладнання;

- людські ресурси; ініціатива на часну відповідальність також вимагає відчуття обмежених ресурсів у вигляді робочого часу та кількості команди. Це вплине на обсяг та темп розробки;

- масштабність; фінансові обмеження впливають на можливість масштабування проєкту в майбутньому. Розширення функціоналу або інтеграція додаткових можливостей можуть бути обмеженими.

Отже, обмеженнями є фінансові та ресурсні аспекти, а також технічні та організаційні обмеження, які можуть вплинути на обсяг, швидкість та можливість майбутнього розвитку проєкту.

Для системи DDP було обрано наступний стек технологій:

- для бекенду та фронтенду - Ruby on Rails;
- для бази даних використовується Postgres.

Також на сервісі HOSTIA було придбано домен - lildoc.hhos.net (трафік домену необмежений, наразі дійсний до 22.08.2025), надалі планується придбання місця для БД.

Для контролю версій було обрано Github.

В процесі роботи виконується своєчасне документування процесу розробки, імплементацій розробника. Здійснюється ретельна перевірка залежних сервісів та дотримання безпекових обмежень.

Прецеденти - це функціональні можливості або послуги, які надає система (у випадку системи DDP, цифрова система для секретаря комісії). Нище наведені ідентифіковані основні прецеденти та їх зв'язки.

Збереження інформації та обробка даних:

– Опис: Система зберігає та обробляє певний обсяг інформації про кваліфікаційні роботи та оцінки.

– Актори: Секретар комісії.

– Зв'язки: Секретар може вводити, редагувати та переглядати дані кваліфікаційних робіт та оцінок.

– Визначення оцінки за різними критеріями:

– Опис: Система надає можливість члену комісії точніше визначити оцінку кваліфікаційних робіт, використовуючи різні критерії.

– Актори: Член комісії.

– Зв'язки: Член комісії може переглядати критерії та виставляти оцінки.

– Формування протоколів захистів:

– Опис: Система дозволяє швидко формувати протоколи захисту кваліфікаційних робіт.

– Актори: Секретар комісії.

– Зв'язки: Секретар комісії може створювати та редагувати протоколи захистів.

На рисунку 2 представлена діаграма прецедентів для системи DDP. Ця діаграма представляє основні функціональні можливості системи та взаємодію з акторами, які будуть взаємодіяти з цією системою.

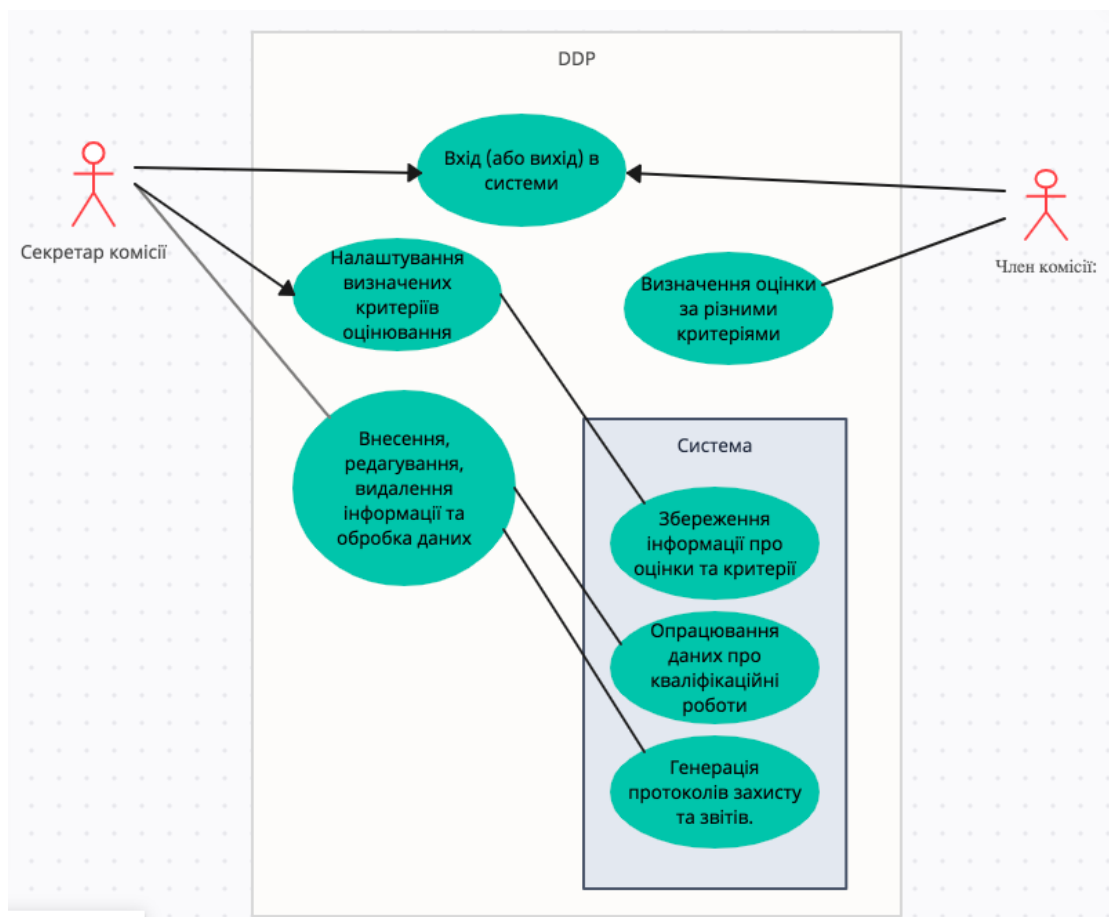


Рисунок 2 - Діаграма прецедентів системи DDP

Для проектування DDP проекту розроблено ще декілька типів діаграм, які допоможуть краще зрозуміти та візуалізувати різні аспекти системи та її функціональності. Нижче представлені:

- діаграма класів (рис. 3): дозволяє представити основні класи системи та їх взаємозв'язки; включає об'єкти, такі як кваліфікаційні роботи, оцінки, користувачі, протоколи тощо.

- діаграма послідовності (рис. 4.1-2): дозволяє відобразити послідовність виконання операцій та взаємодій між системними компонентами. В розробці буде використовуватись розширення AppMap для редактору коду VSCode, яке відображає дані AppMap як інтерактивні діаграми;

- діаграма активності (рис. 5): дозволяє відобразити потоки роботи та процеси у вашій системі;

- діаграма сутності-зв'язку (рис. 6): дозволяє змоделювати структуру бази даних, сутності та їх взаємозв'язки.

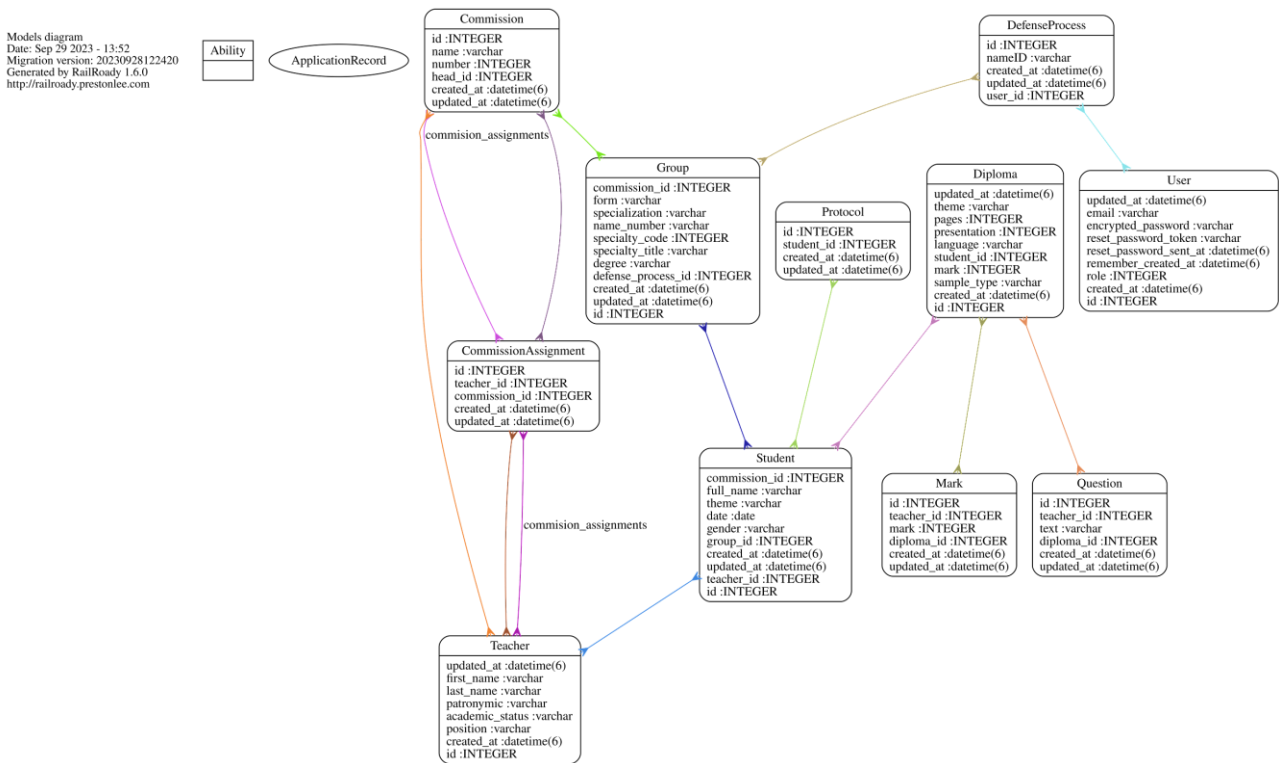


Рисунок 3 - Діаграма Класів (Class diagram) проекту DDP



Рисунок 4.1 - Фрагмент діаграми послідовності проєкта DDP, перегляд групи студентів (1)



Рисунок 4.2 - Фрагмент діаграми послідовності проєкта DDP, перегляд групи студентів (2)

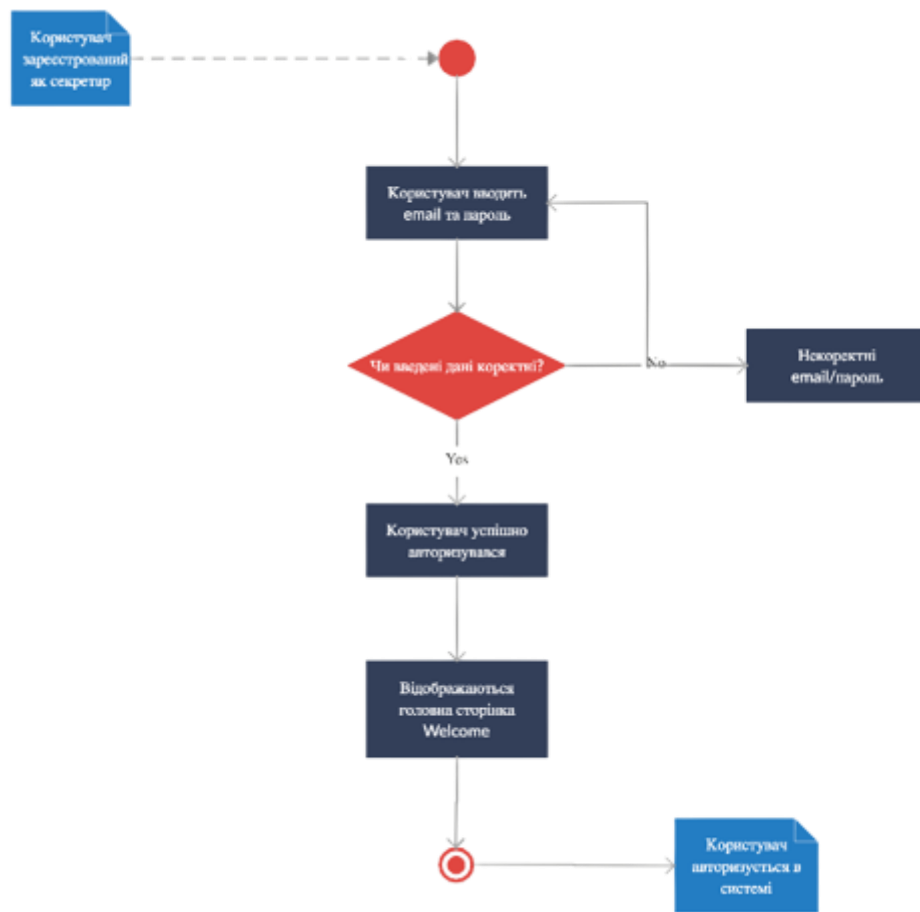


Рисунок 5 - Діаграма активності проекту DDP, авторизація користувача-секретаря

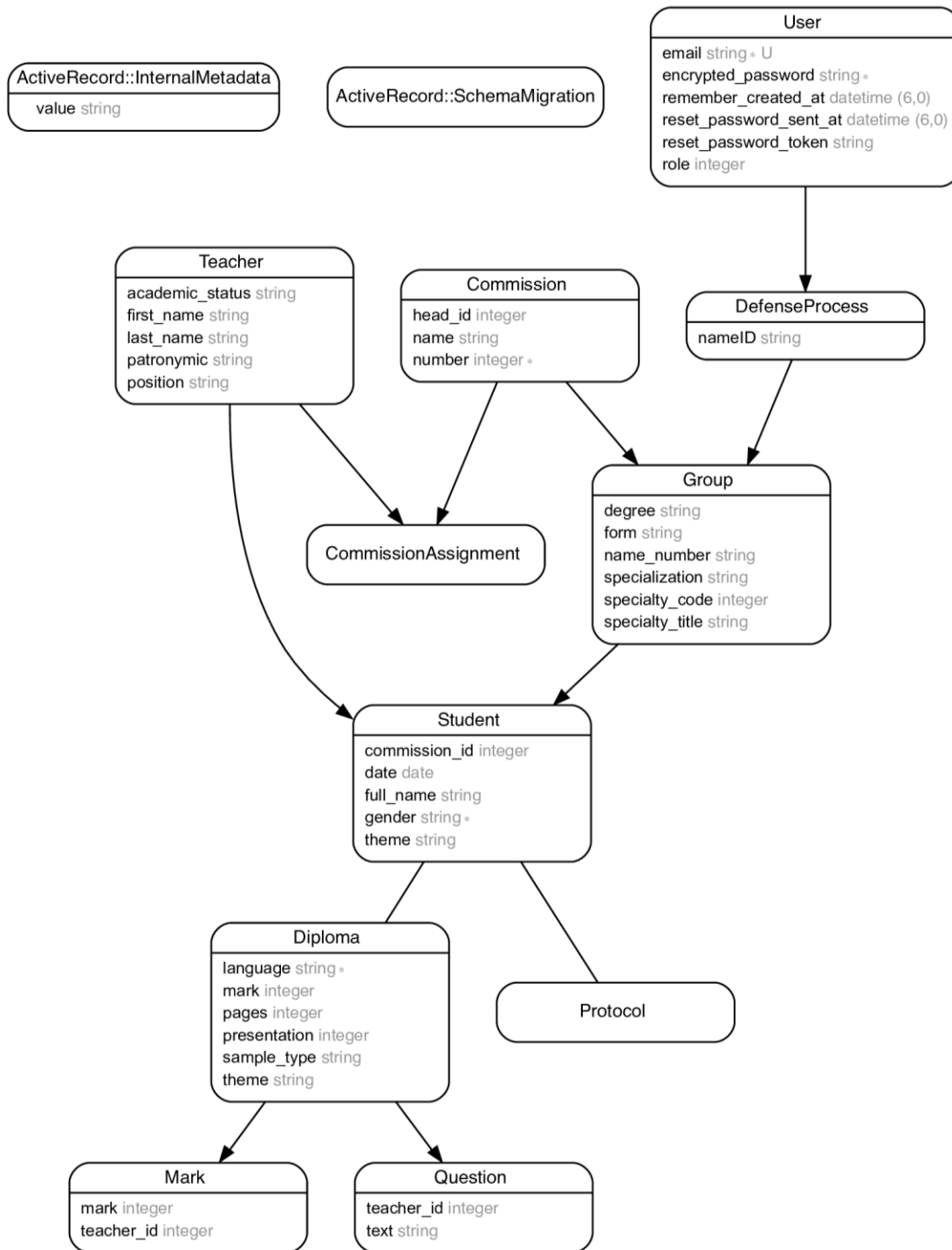


Рисунок 6 - Діаграма сутності-зв'язку (ER Diagram) проекту DDP

Варто зазначити, що розробка веб-додатку на Ruby on Rails має свої особливості, які варто врахувати при проектуванні архітектури [4]. Нижче наведено загальний опис архітектури веб-додатку DDP проекту, що буде побудований на Ruby on Rails.

Архітектура за моделлю-вид-контроллер (Model-View-Controller, MVC):

1. Моделі (Models):

- визначення логіки доступу до бази даних та обробки даних.

2. Види (Views):

- визначає представлення даних для користувача (HTML, CSS, JavaScript);

- видача даних користувачу в зручному для сприйняття вигляді.

3. Контролери (Controllers):

- керують взаємодією між моделями та видами;

- обробка HTTP-запитів від користувачів та визначають, яка дія повинна відбутися.

Інші ключові складові:

4. Маршрутизація (Routes):

- вказує, які URL-шляхи відображати на які контролери та дії;

- визначає маршрути для користувачів та URL-адреси додатку.

5. База даних (PostgreSQL):

- зберігання даних про кваліфікаційні роботи, оцінки, користувачів тощо.

6. Інтерфейс користувача:

- розробка інтерфейсу користувача з використанням HTML, CSS та JavaScript, можна використовувати фреймворки або бібліотеки, такі як Bootstrap або jQuery.

7. Система аутентифікації та авторизації:

- використання готових бібліотек для реалізації аутентифікації та авторизації (gem Devise) [5].

8. Тестування:

- реалізація тестування, включаючи модульні та інтеграційні тести, щоб переконатися у правильності роботи додатку та його компонентів.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розробок за даним напрямом. Отже, в статті досліджені існуючі рішення для автоматизації робочого місця секретаря комісії, показані результати розробки загальної архітектури DDP проєкту, яка базується на принципах Ruby on Rails та паттерну MVC.

Представлений новий варіант архітектурного рішення веб-сервісу для автоматизації роботи членів екзаменаційної комісії. Наведені діаграми допо-

можуть краще розібратися з архітектурою та функціональністю DDP проекту під час написання коду, спростять комунікацію в команді та сприятимуть ефективній розробці та впровадженню продукту.

ЛІТЕРАТУРА

1. Концепція розвитку цифрової економіки та суспільства України на 2018-2020 роки. – URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/67-2018-%D1%80#n14>
2. Романовська І. Автоматизація роботи секретаря екзаменаційної комісії національного університету “Львівська політехніка” / Романовська І., Пелешчин А. Вісник Національного університету “Львівська політехніка”, № 879, 2017. – с. 100.
3. Software Architecture in Practice 3th Edition Len Bass, Paul Clements, Rick Kazman Addison-Wesley, 25 вер. 2012 р. - 624 стор.
4. Using Rails for API-only Applications [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://guides.rubyonrails.org/api_app.html – 12.05.2022р
5. Ruby on Rails Technology Stack [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.railsarma.com/technology-stack/> – 05.05.2022р.

REFERENCES

1. Concept of development of the digital economy and society of Ukraine for 2018-2020. – URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/67-2018-%D1%80#n14>
2. Romanovska I. Automation of the work of the secretary of the examination board of the National University "Lviv Polytechnic" / Romanovska I., Peleshchyn A. Bulletin of the National University "Lviv Polytechnic", No. 879, 2017. - p. 100.
3. Software Architecture in Practice 3th Edition Len Bass, Paul Clements, Rick Kazman Addison-Wesley, 25 September 2012 p. - 624 pages.
4. Using Rails for API-only Applications [Electronic resource]. – Access mode: https://guides.rubyonrails.org/api_app.html – 12.05.2022p
5. Ruby on Rails Technology Stack [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.railsarma.com/technology-stack/> – 05.05.2022p.

Received 28.11.2022.

Accepted 30.11.2022.

Architectural solution for the ddp (diploma defense project) web application to document the examination process

Analysis of recent research and publications. The primary source of information about using Ruby on Rails is the official RoR documentation website.

After researching scientific papers and textbooks on architecture, theoretical aspects that should be taken into account when developing web services were collected.

Research objective. The aim of this work is to investigate existing architectural solutions for automating the work of the examination committee and to develop an architectural solution for creating a software product based on it to increase efficiency and improve the quality of the defense process.

Presentation of the main research material. The main stakeholders were identified - the secretary of the commission, commission members, commission chair, academic

supervisor, student undergoing defense procedures. The client-customer is considered the department.

A questionnaire was proposed for teachers to determine non-functional requirements. This allowed us to better consider their needs and requirements in project development.

Analysis of functional requirements (architecturally significant requirements) has been conducted. The requirements define factors that significantly influence the choice of architectural style and tools.

The constraints include financial and resource aspects, as well as technical and organizational constraints, which can impact the volume, speed, and possibility of future project development.

For the DDP system, the following technology stack was chosen: Ruby on Rails for backend and frontend; Postgres for the database.

Additionally, a domain was purchased on the HOSTIA service - lildoc.hhos.net (domain traffic is unlimited, currently valid until 08/22/2025), and plans are in place to purchase database hosting.

Github was chosen for version control. The design, class, sequence, activity, entity-relationship diagrams for the DDP system were formed and presented. The defined architecture of the DDP project:

- Follows Model-View-Controller (MVC) pattern.
- Components: Models, Views, Controllers, Routing, Database (PostgreSQL), User Interface, Authentication and Authorization System, Testing.

Conclusions from this study and prospects for further developments in this direction. The article examines existing solutions for automating the secretary of the commission's workplace, presents the results of developing the general architecture of the DDP project based on Ruby on Rails principles and the MVC pattern.

A new architectural solution for a web service to automate the work of the examination commission members is presented.

Селівьорстова Тетяна Віталіївна - кандидат технічних наук, доцент, Кафедра інформаційних технологій і систем, ННІ «Інститут промислових та бізнес технологій», Український державний університет науки і технологій.

Андрюхіна Маргарита Василівна - аспірант, асистент кафедри інформаційних технологій і систем, ННІ «Інститут промислових та бізнес технологій», Український державний університет науки і технологій.

Selivyorstova Tatjana - candidate of technical science, assistant professor, Department of information technology and systems, Scientific and educational institute «Institute of industrial and business technologies», Ukrainian state university of science and technologies.

Andriukhina Marharyta Vasylivna - Postgraduate student, Assistant of the Department of Information Technologies and Systems, Institute of Industrial and Business Technologies, Ukrainian State University of Science and Technology.

ЗМІСТ

CONTENTS

Сулема Є.С, Пеня О.Р. Застосування кластеризації для підвищення точності лінійних наближень	5	Sulema Ye., Penia O. The use of clustering to increase the accuracy of linear approximations	5
Борисенко П., Громова В. Використання шардингу для покращення масштабованості мереж	17	Borysenko P., Gromova V. Using Sharding to Improve Blockchain Network Scalability	17
Малайчук В.П., Клименко С.В., Лисенко Н.О. Інформативність статистичної обробки експериментальних вимірювань модифікованим критерієм Буша-Вінда	28	Malaichuk V.P., Klymenko S.V., Lysenko N.O. Informativeness of statistical processing of experimental measurements by the modified Bush-Wind criterion	28
Калініна І.О., Гожий О.П., Неча- хін В.В., Шиян С.І. Імітаційне моделювання систем зі складним стохастичним процесом обробки даних за допомогою кольорових мереж Петрі	42	Kalinina I.O., Gozhyj O.P., Nechakhin V.V., Shiyan S.I. Simulation modeling of systems with a complex stochastic data processing process using colored Petri nets	42
Зеленцов Д.Г., Шаптала Т.М. Моделі та методи навчання нейронних мереж з диференційованими функціями активації	57	Zelentsov D.G., Shaptala T.M. Models and methods for training neural networks with differentiated activation functions	57
Рвач Д.В., Сулема Є.С. Метод консолідації мультимедійних даних	69	Rvach D., Sulema Y. Multimedia data consolidation method	69

<p>Стрельбіцький В.В., Бовнегра Л.В., Павлишко А.В. Моделювання експлуатаційної надійності ходових коліс мостових кранів морських портів</p>	80	<p>Strelbitskyi V.V., Bovnegra L.V., Pavlyshko A.V. Modeling of operational reliability of running wheels of overhead cranes of seaports</p>	80
<p>Кіріченко Л.О., Зінченко П.П. Застосування рекурентного аналізу для класифікації реалізацій енцефалограм</p>	90	<p>Kirichenko L., Zinchenko P. Application of recurrent analysis to classify realizations of encephalograms</p>	90
<p>Островська К.Ю., Шерстяних М.О., Стовпченко І.В., Каліберда Ю.О. Дослідження ефективності платформ управління обчислювальними сервісами при організації fog computing</p>	101	<p>Ostrovskaya K.Yu., Sherstyanykh M.A., Stolpchenko I.V., Kaliberda Yu.O. Research of the efficiency of com- puting services management plat- forms in the organization of fog computing</p>	101
<p>Андрюхіна М.В., Селівьорстова Т.В. Архітектурне рішення для веб- додатку DDP (diploma defense project) для документування процесу екзаменування</p>	120	<p>Andriukhina M.V., Selivyorstova T.V. Architectural solution for the DDP (diploma defense project) web ap- plication to document the exami- nation process</p>	120

РЕФЕРАТИ

УДК 004.62

Сулема Є.С, Пеня О.Р. **Застосування кластеризації для підвищення точності лінійних наближень** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. Випуск 6(143). – Дніпро, 2022. – С.5 – 16.

Розглядається моделювання об'єкта за набором темпоральних мультимодальних даних. Запропоновано метод побудови моделі, що складається з декількох лінійних наближень на інтервалах простору даних. Для виділення інтервалів простору даних запропоновано алгоритм кластеризації. Описаний спосіб застосовано для моделювання електростанції за набором опосередкованих даних, точність отриманої моделі порівняно з іншими видами наближень.

Бібл. 10, іл. 3, табл. 3.

УДК 004.42

Борисенко П., Громова В. **Використання шардингу для покращення масштабованості мереж** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. Випуск 6(143). – Дніпро, 2022. – С.17 – 27.

Блокчейн – це розподілена та децентралізована база даних для зберігання інформації про транзакції. Вона підтримується членами мережі, що гарантують її операції використовуючи криптографічні засоби підтримки консенсусу, що дозволяють членам мережі домовитися щодо унікальної структури блокчейну. Однак, сучасні блокчейн рішення стикаються із проблемами масштабованості через різноманітні проблеми із їх протоколами. У цій статті ми розглядаємо використання шардингу як можливого рішення для подолання технічних обмежень існуючих блокчейн систем і різні форми його практичного втілення у сучасних дослідженнях, викликаних популярністю блокчейну.

Бібл. 21.

УДК 004.942: 519.711.3.

Малайчук В.П., Клименко С.В., Лисенко Н.О. **Інформативність статистичної обробки експериментальних вимірювань модифікованим критерієм Буша Вінда** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. Випуск 6(143). – Дніпро, 2022. – С.28 – 41.

Класична математична статистика пропонує перевіряти статистичну однорідність вибірок нормальних випадкових величин комбінованим критерієм Буша Вінда та оцінювати їх зсуви та масштаби формулами апроксимації законів та функцій розподілу Гауса. Пропонується більш простий аналог критерію Буша Вінда, який формується за формулами логістичних випадкових величин. Шляхом проведення комп'ютерних обчислювальних експериментів оцінюється їх ефективність та факторний аналіз впливу розмірів вибірок і видів статистичних закономірностей досліджуваних випадкових величин, їх асиметричності. Модифікований критерій Буша Вінда характеризується високою інформативністю та може бути рекомендований для статистичної обробки експериментальних вимірювань.

Бібл. 4, іл. 3, табл. 5.

УДК 004.942

Калініна І.О., Гожий О.П., Нечахін В.В., Шиян С.І. **Імітаційне моделювання систем зі складним стохастичним процесом обробки даних за допомогою кольорових мереж Петрі** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. Випуск 6(143). – Дніпро, 2022. – С.42 – 56.

В статті розглядається процес побудови імітаційних моделей систем з стохастичним процесом обробки даних на основі кольорових мереж Петрі. Представлено формальний опис моделей на основі кольорових мереж Петрі. Для імітаційного моделювання задач обробки даних обґрунтовано використання часових мереж Петрі, що дозволяє визначити і детально описати часові проміжки процесу, який моделюється. Приведено алгоритм побудови імітаційних моделей на основі кольорових мереж Петрі. Визначено особливості застосування часових мереж Петрі при побудові імітаційних моделей зі складними стохастичними процесами обробки даних. Для завдання випадкових величин використані спеціальні функції. Наведено перелік функцій з їх докладним описом і діапазонами допустимих значень для вхідних параметрів. В якості прикладу розглянуто побудова імітаційної моделі процесу роботи центру обробки заявок комерційної фірми. Модель була побудована в середовищі CPN Tools. Визначені та досліджені параметри системи, змінні, функції та параметри моделі. Для накопичення статистики про результати роботи моделей було застосовано метод накопичення інформації в позиціях. Представлено аналіз результатів імітаційного моделювання процесу роботи центру обробки заявок комерційної фірми.

Бібл. 17.

УДК 004.94

Зеленцов Д.Г., Шаптала Т.М. **Моделі та методи навчання нейронних мереж з диференційованими функціями активації** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. Випуск 6(143). – Дніпро, 2022. – С.57 – 68.

У цій роботі сформовано нову постановку задачі навчання нейронних мереж. Для цього пропонується розширити вектор параметрів, що варіюються, який крім вагових коефіцієнтів, також вмістить у собі ще й деякі параметри функції активації. На відміну від введення нейронів зсуву, дане розширення не передбачає зміну архітектури нейронної мережі і залишить її у початковому вигляді, проте це призведе до неможливості застосування класичного методу навчання – зворотного поширення похибки. Проведено дослідження різних постановок оптимізаційних завдань та методів їх вирішення за критеріями точності та ефективності.

Бібл. 8, іл. 5, табл. 4.

УДК 004.6

Рвач Д.В., Сулема Є.С. **Метод консолідації мультимедійних даних** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. Випуск 6(143). – Дніпро, 2022. – С.69 – 79.

У статті пропонується метод, який дозволяє виконувати поєднання та синхронізацію мультимедійних даних із застосуванням принципів багатопотоковості. Застосування запропонованого методу вирішує проблеми, пов'язані з поєднанням у одному часовому проміжку даних різних модальностей, що відрізняються форматами збереження. Цей метод призначений

для застосування при розробленні нового класу програмного забезпечення – мультимедійних програмних систем.

Бібл. 10.

УДК 621.873: 004.94

Стрельбіцький В.В, Бовнегра Л.В., Павлишко А.В. **Моделювання експлуатаційної надійності ходових коліс мостових кранів морських портів** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. Випуск 6(143). – Дніпро, 2022. – С.80 – 89.

Мостові крани широко застовуються у морських та річкових портах для перевантаження вантажів на відкритих та закритих складських майданчиках. Оскільки вони є основною ланкою технологічних процесів, тому від їх надійної та безперервної роботи залежить продуктивність портових виробничих ліній. Відомо, що при експлуатації кранів 90% ходових коліс виходом з ладу і замінюється новими через інтенсивний знос реборд, а 60-70% підкранових рейок через знос їхніх бічних граней. Оскільки ресурс є основним показником довговічності деталей та вузлів, тому підвищення встановлення ресурсу коліс є актуальною задачею, що дозволить зменшити витрати на ремонт та експлуатацію кранів. Метою дослідження є визначення ресурсу ходових коліс механізмів мостових кранів з понаднормовими термінами експлуатації. Для досліджень було обрано 4 ідентичні мостові крани, вантажопідйомністю 10 тон, які працюють у крюковому режимі у морських портах. Кранові колеса виготовлені зі сталі 65Г методом литва. Механізми кранів обстежували візуально та вимірювали знос коліс через 3 місяці протягом 4 років роботи. За результатами досліджень розраховані параметри моделі зносу від часу у вигляді ступеневої функції. Отримані значення коефіцієнту кореляції вказують на те, що між зносом та часом роботи існує достатньо щільний зв'язок. Середнє значення похибки за запропонованою моделлю не перевищує 6,1%, що є цілком прийнятним для інженерних розрахунків. Встановлено, що ресурс кранових коліс не перевищує 3,3...3,4 років роботи, що менше 4 років зазначеного виробником.

Бібл. 12. Іл. 2. Табл.1.

УДК 519.2:004.9

Кіріченко Л.О., Зінченко П.П. **Застосування рекурентного аналізу для класифікації реалізацій енцефалограм** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. Випуск 6(143). – Дніпро, 2022. – С.90 – 100.

У статті досліджено використання машинного навчання для класифікації часових реалізацій через рекурентні діаграми. Кожна реалізація перетворюється у матрицю рекурентних станів і подається як чорно біле зображення. Класифікація виконується глибокою нейронною мережею залишкового типу, спрямованою на бінарну класифікацію реалізацій EEG для виявлення епілептичних нападів. Використані дані включають 178 значень активності мозку. Дослідження показує високу точність цього методу, що дозволяє його ефективно використати на практиці.

Бібл.23, рис.2, табл.3.

УДК 004.75

Островська К.Ю., Шерстяних М.О., Стовпченко І.В., Каліберда Ю.О. **Дослідження ефективності платформ управління обчислювальними сервісами при організації fog computing** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. Випуск 6(143). – Дніпро, 2022. – С.101 – 119.

Робота присвячена дослідженню ефективності платформ управління обчислювальними сервісами при організації Fog computing.

В рамках роботи провадиться дослідження ефективності платформ контейнерної оркестрації з організацією Fog computing.

Організується розгортання Docker контейнерів. Для створення кластера використовується Docker Swarm. Вирішуються завдання вимірювання наступних параметрів: час розгортання одного контейнера, час розгортання групи контейнерів, час відгуку задачі горизонтального масштабування, час затримки передачі. Проводиться аналіз одержаних результатів випробувань.

Бібл.5, рис.37, табл.5.

УДК 004.9:303.732.4

Андрюхіна М.В., Селівьорстова Т.В. **Архітектурне рішення для веб додатку DDP (diploma defense project) для документування процесу екзаменування** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. Випуск 6(143). – Дніпро, 2022. – С.120 – 133.

Розглядаються наявні наукові доробки щодо цифровізації процесу екзаменування студентів. Описана необхідність автоматизації роботи секретаря екзаменаційної комісії. Представлене розроблене архітектурне рішення для проєкту DDP, описані рекомендаційні технології для його створення, а також наведені UML діаграми, що більш детально описують архітектуру проєкту.

Бібл. 5, іл. 7.

UDC 004.62

Sulema Ye., Penia O. **The use of clustering to increase the accuracy of linear approximations** // System technologies. N 6(143) Dnipro, 2022. P.5 – 16.

The work is devoted to object modeling based on a set of temporal multimodal data. A method of building a model that consists of several linear approximations on data space in intervals is proposed. A clustering algorithm for selection of data space intervals is proposed. The described method is used to model the power plant based on a set of data, the accuracy of the obtained model is compared to other types of approximations.

Ref. 10, fig. 3, tables 3

UDC 004.42

Borysenko P., Gromova V. **Using Sharding to Improve Blockchain Network Scalability** // System technologies. N 6(143) Dnipro, 2022. P.17 – 27.

Blockchain is a distributed and decentralized database for recording transactions. It is shared and maintained by network nodes, which ensures its operations using cryptography and consensus rules that allow all nodes to agree on a unique structure of the blockchain. However, modern blockchain solutions face network scalability issues due to different protocol design decisions.

In this paper, we discuss sharding as a possible solution to overcome the technical limitations of existing blockchain systems and different forms of its practical realization presented in recent research spurred by blockchain popularity.

Bibl. 21.

UDC 004.942: 519.711.3.

Malaichuk V.P., Klymenko S.V., Lysenko N.O. **Informativeness of statistical processing of experimental measurements by the modified Bush Wind criterion** // System technologies. N 6(143) Dnipro, 2022. P.28 – 41.

Classical mathematical statistics suggests checking the statistical homogeneity of samples of normal random variables by the combined Bush Wind test and estimating their shifts and scales by approximation formulas of Gaussian distribution laws and functions. A simpler analogue of the Bush Wind criterion is proposed, which is formed by the formulas of logistic random variables. By conducting computer computing experiments, their efficiency and factor analysis of the influence of sample sizes and types of statistical regularities of the investigated random variables, their asymmetry, are evaluated. The modified Bush Wind criterion is characterized by high informativeness and can be recommended for statistical processing of experimental measurements.

Bible 4, fig. 3, tab. 5.

UDK 004.942

Kalinina I.O., Gozhyj O.P., Nechakhin V.V., Shiyani S.I. **Simulation modeling of systems with a complex stochastic data processing process using colored Petri nets** // System technologies. N 6(143) Dnipro, 2022. P.42 – 56.

The article considers the process of building simulation models of systems with stochastic data processing based on colored Petri nets. A formal description of models based on colored Petri nets is presented. For simulation modeling of data processing tasks, the use of temporal Petri nets is substantiated, which allows to define and describe in detail the time intervals of the simulated process. The algorithm for building simulation models based on colored Petri nets is presented. The peculiarities of the use of temporal Petri nets in the construction of simulation models with complex stochastic data processing processes are determined. Special functions are used to assign random values. A list of functions with their detailed description and ranges of permissible values for input parameters is provided. As an example, the construction of a simulation model of the work process of the application processing center of a commercial firm is considered. The model was built in the CPN Tools environment. System parameters, variables, functions and model parameters are defined and investigated. The method of accumulating information in positions was used to accumulate statistics on the results of the models. The analysis of the results of simulation modeling of the work process of the application processing center of a commercial firm is presented.

Bibl. 17.

UDC 004.94

Zelentsov D.G., Shaptala T.M. **Models and methods for training neural networks with differentiated activation functions** // System technologies. N 6(143) Dnipro, 2022. P.57 – 68.

In this paper, a new formulation of the neural network training problem was developed. For this purpose, it is proposed to expand the vector of varying parameters, which, in addition to the weighting coefficients, will also contain some parameters of the activation function. Unlike the introduction of bias neurons, this extension does not involve changing the architecture of the neural network and will leave it in its original form, but this will lead to the impossibility of applying the classical method of training – backward propagation of errors. The study of various formulations of optimization problems and methods for solving them by the criteria of accuracy and efficiency is carried out.

Ref. 8, fig. 5, tabl. 4.

UDC 004.6

Rvach D., Sulema Y. **Mulsemmedia data consolidation method** // System technologies. N 6(143) Dnipro, 2022. P.69 – 79.

The research paper presents a method that enables the consolidation and synchronization of mulsemmedia data using the principles of multithreading. The universal method which supports combining data of different modalities in parallel threads was designed. The application of the proposed method solves problems associated with combining data of different modalities and formats in the same time interval. The effectiveness of applying this method increases by using a multithreaded distributed computing. This method is designed for use in the development of mulsemmedia software systems. The modified JSON format (TJSON – Time line JSON) was proposed in the paper, as well. TJSON object serves as a complex data structure for representation of the synchronized mulsemmedia data and their further processing.

Ref. 10

UDK 621.873: 004.94

Strelbitskyi V.V., Bovnegra L.V., Pavlyshko A.V. **Modeling of operational reliability of running wheels of overhead cranes of seaports** // System technologies. N 6(143) Dnipro, 2022. P.80 – 89.

Overhead cranes are widely in operation in sea and river ports for cargo transshipment in open and closed storage areas. Since they are the main link in technological processes, the productivity of Port production lines depends on their reliable and continuous operation. It is known that during the operation of cranes, 90% of the running wheels fail and are replaced with new ones due to intensive wear of the edges, and 60-70% of crane rails due to wear of their side faces. Since the service life is the main indicator of the durability of parts and assemblies, therefore, increasing the installation of wheel life is an urgent task, which will reduce the cost of repair and operation of cranes. As the experience of operation shows, running wheels have the most worn elements of movement mechanisms. Thus, their service life ranges from several months to 2-3 years. This is due to the fact that replacing the wheels is cheaper compared to replacing the crane track.

Since the service life is the main indicator of the durability of parts and assemblies, therefore, increasing the installation of wheel life is an urgent task, which will reduce the cost of repair and operation of cranes.

Analysis of studies of complex technical systems shows that the reliability of overhead crane mechanisms operated for more than 30 years in the Seaport is not fully understood, the nature of wheel damage depends on the operating conditions.

For research, 4 identical overhead cranes with a lifting capacity of 10 tons were selected, which operate in Hook mode in seaports. Crane wheels are made of 65g steel by casting. Crane mechanisms were visually examined and wheel wear was measured after 3 months during 4 years of operation. Based on the research results, the parameters of the Wear model from time to time in the form of a step function are calculated. The obtained values of the correlation coefficient indicate that there is a fairly tight relationship between wear and operating time. The average error value for the proposed model does not exceed 6.1%, which is quite acceptable for engineering calculations. It is established that the service life of Crane wheels does not exceed 3.3...3.4 years of operation, which is less than 4 years specified by the manufacturer.

Ref.12. Fig.2. Tabl.1.

UDC 519.2:004.9

Kirichenko L., Zinchenko P. **Application of recurrent analysis to classify realizations of encephalograms** // System technologies. N 6(143) Dnipro, 2022. P.90 – 100.

The article explores the use of machine learning for classifying temporal realizations presented in the form of recurrent diagrams. Each temporal realization is transformed into a matrix of recurrent states and represented as a black and white image. The obtained images of realizations are classified using deep neural networks. A deep residual neural network is

employed as the classifier for the images. Binary classification of EEG realizations is performed, with the result being the detection of epileptic seizures. The data for the experiment consists of recordings of brain activity containing 178 values. The research results demonstrate that the proposed method achieves high classification accuracy. The proposed classification approach can be easily applied in practice.

Ref.23, fig.2, tab.3.

UDC 004.75

Ostrovskaya K.Yu., Sherstyanykh M.A., Stolpchenko I.V., Kaliberda Yu.O. **Research of the efficiency of computing services management platforms in the organization of fog computing** // System technologies. N 6(143) Dnipro, 2022. P.101 – 119.

The work is devoted to studying the effectiveness of computing service management platforms in the organization of Fog Computing.

As part of the work, a study of the effectiveness of container orchestration platforms with the Fog computing organization is being conducted.

Deployment of Docker containers is organized. Docker Swarm is used to create a cluster. The tasks of measuring the following parameters are solved: deployment time of one container, deployment time of a group of containers, response time of a horizontal scaling task, transmission delay time. The analysis of the obtained test results is carried out.

Bible 5, Fig. 37, Table 5.

UDC 004.9:303.732.4

Andriukhina M.V., Selivyorstova T.V. **Architectural solution for the DDP (diploma defense project) web application to document the examination process** // System technologies. N 6(143) Dnipro, 2022. P.120 – 133.

Existing scientific advancements in digitizing the student examination process are discussed. The necessity of automating the work of the examination commission's secretary is described. The developed architectural solution for the DDP project is presented, recommended technologies for its creation are outlined, and UML diagrams detailing the project's architecture are provided.

Bible. 5, ill. 7.

Системні технології
ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ

Випуск 6 (143)

Головний редактор: к.т.н., доц. Т.В. Селівьорстова

Технічний редактор та секретар збірки: к.т.н., доц. К.Ю. Островська

Здано до набору 27.12.2022. Підписано до друку 30.12.2022.

Формат 60x84 1/16. Друк - різнограф. Папір типограф.

Умов. друк арк. – 10,2. Обл.–видавн. арк. – 8,938.

Тираж 300 прим. Замовл. –06/22

Український державний університет науки і технологій,
ННІ «Інститут промислових та бізнес технологій»,
кафедра Інформаційних технологій та систем: ІВК «Системні технології»
49600, Дніпро, а/с 493

<http://journals.nmetau.edu.ua/index.php/st>

Свідоцтво про державну реєстрацію друкованого засобу масової інформації:

Серія КВ № 8684 від 23 квітня 2004 рік

Редакційна колегія

Селівьорстова Тетяна Віталіївна
(*головний редактор*)

доцент, кандидат технічних наук

Алпатов Анатолій Петрович

Член-кореспондент НАН України,
професор, доктор технічних наук

Архипов Олександр Євгенійович

професор, доктор технічних наук

Бабічев Сергій Анатолійович

доцент, доктор технічних наук

Білозьоров Василь Євгенович

професор,

доктор фізико-математичних наук

Гече Федір Елемирович

професор, доктор технічних наук

Гуда Антон Ігорович

(*заст. головного редактора*)

професор, доктор технічних наук

Гнатушенко Вікторія Володимирівна

(*вчений секретар*)

професор, доктор технічних наук

Гнатушенко Володимир Володимирович

професор, доктор технічних наук

Гожий Олександр Петрович

професор, доктор технічних наук

Єрьомін Олександр Олегович

професор, доктор технічних наук

Кіріченко Людмила Олегівна

професор, доктор технічних наук

Світличний Дмитро Святозарович

професор, доктор технічних наук

Скалозуб Владислав Васильович

професор, доктор технічних наук

Хандецький Володимир Сергійович

професор, доктор технічних наук

Український державний університет науки і технологій, ННІ «Інститут промислових та бізнес технологій», Україна

Інститут технічної механіки

НАНУ і ДКАУ, Україна

Національний технічний університет

України «Київський політехнічний інститут» імені Ігоря Сікорського», Україна

Jan Evangelista Purkyně University
in Ústí nad Labem

Університет імені Яна Євангеліста Пуркіне,
Усті над Лабем, Чеська Республіка

Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, Україна

Ужгородський національний університет,
Україна

Український державний університет науки і технологій, ННІ «Інститут промислових та бізнес технологій», Україна

Український державний університет науки і технологій, ННІ «Інститут промислових та бізнес технологій», Україна

Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Україна

Чорноморський національний університет імені П.Могили, Україна

Український державний університет науки і технологій, ННІ «Інститут промислових та бізнес технологій», Україна

Харківський національний університет радіоелектроніки, Україна

Akademia Górniczo-Hutnicza

Краківська гірничо-металургійна академія ім. С. Сташціа, Польща

Український державний університет науки і технологій, ННІ «Дніпровський інститут інфраструктури і транспорту»Україна

Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, Україна