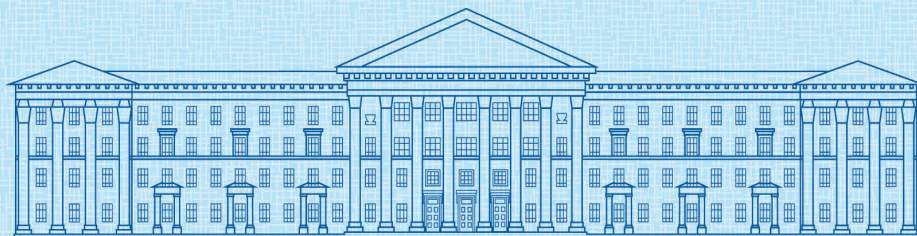




ISSN 2307-3489 (Print)

ISSN 2307-6666 (Online)



НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ

№ 1(105)

.. 2024 ..

Український державний університет науки і технологій

НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ

Науковий журнал

№ 1 (105) 2024

Виходить 4 рази на рік ♦ ♦ ♦ ♦ Заснований у серпні 2003 р.

Автоматизовані та телематичні системи на транспорті
Екологія та промислова безпека
Економіка та управління
Експлуатація та ремонт засобів транспорту
Електричний транспорт, енергетичні системи та комплекси
Залізнична колія та автомобільні дороги
Інформаційно-комунікаційні технології та математичне моделювання
Матеріалознавство
Машинобудування
Рухомий склад і тяга поїздів
Транспортне будівництво

Дніпро

2024

Засновник:
УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ НАУКИ І ТЕХНОЛОГІЙ

ГОЛОВНИЙ РЕДАКТОР ЖУРНАЛУ

Пічуров С. О., доктор фізико–математичних наук

ЗАСТУПНИК ГОЛОВНОГО РЕДАКТОРА

Козаченко Д. М., доктор технічних наук

ВИПУСКОВИЙ РЕДАКТОР

Колесникова Т. О., кандидат наук
із соціальних комунікацій

ЧЛЕНИ РЕДАКЦІЙНОЇ КОЛЕГІЇ:

Аврамовіс З. З., Белградський університет (Сербія); Бела І., Інститут логістики (Угорщина); Біляєв М. М., УДУНТ (Україна); Богдєвичус М., Вільнюський технічний університет імені Гедимінаса (Литва); Боднар Б. Є., УДУНТ (Україна); Вакуленко І. О., УДУНТ (Україна); Воронін С. В., УкрДУЗТ (Україна); Головкова Л. С., УДУНТ (Україна); Єфременко В. Г., Приазовський держаний технічний університет (Україна); Жуковицький І. В., УДУНТ (Україна); Калівода Я., Чеський технічний університет (Чехія); Капіца М. І., УДУНТ (Україна); Капустян В. О., НТТУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Україна); Кершіс Р., Каунаський технологічний університет (Литва); Кузнецов В. Г., Науково-дослідний інститут залізниць (Польща); Манашкин Л., Незалежний вчений (США); Марущак П. О., Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя (Україна); Мурадян Л. А., УДУНТ (Україна); Сохацький А. В., Університет митної справи та фінансів (Україна); Піттман Р., Антимонопольний відділ Департаменту юстиції (США); Ракша С. В., УДУНТ (Україна); Сладковскі А., Сілезький технологічний університет (Польща); Суглер Дж., Варшавська школа економіки (Польща); Тютюкін О. Л., УДУНТ (Україна); Шинкаренко В. І., УДУНТ (Україна).

Журнал зареєстровано Національною Радою України з питань телебачення і радіомовлення, рішення № 924 від 28.09.2023 р.
(До 28.09.2023 р.: Державною реєстраційною службою Міністерства юстиції України, свідоцтво про реєстрацію КВ № 19609-9409ПР від 29.12.2012 р.)
Видання внесено до категорії Б «Переліку наукових фахових видань України» наказом Міністерства освіти і науки України № 409 від 17.03.2020 р. (технічні науки).
Журнал зареєстровано в міжнародних наукових системах: Ulrichsweb™ Global Serials Directory, Crossref, Open Ukrainian Citation Index (OUCI), OCLC WorldCat, Google Scholar, DOAJ, Index Copernicus, Україніка наукова та ін.
Друкується за рішенням вченої ради університету від 03.04.2024 р., протокол № 8

Видавець Український державний університет науки і технологій (м. Дніпро)
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 7709 від 14.12.2022 р.

Адреса засновника вул. Лазаряна, 2, кім. 267, Дніпро, Україна, 49010
та редакції тел.: +38 (056) 371-51-05; e-mail: stp.journal@ust.edu.ua;
сайт журналу: <http://stp.diit.edu.ua/>

Видання публікується з 1936 р.:

1936–1993 рр. – «Труды Днепропетровского института инженеров железнодорожного транспорта»;
1993–2002 рр. – «Збірник наукових праць Дніпропетровського державного технічного університету залізничного транспорту» (за серіями);
2003–2012 рр. – «Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна», (ISSN 1993-9175);
2013–2022 рр. – «Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна»;
з 2023 р. – «Наука та прогрес транспорту»

Ukrainian State University of Science and Technologies

NAUKA TA PROGRES TRANSPORTU

=

SCIENCE AND TRANSPORT PROGRESS

Scientific journal

No. 1 (105) 2024

Once a quarter ♦ ♦ ♦ ♦ ♦ Founded in August 2003

Automated and Telematic Systems on Transport
Ecology and Industrial Safety
Economics and Management
Operation and Repair of Transport Means
Electric Transport, Power Systems and Complexes
Railroad and Roadway Network
Information and Communication Technologies and Mathematical Modelling
Material Science
Mechanical Engineering
Rolling Stock and Train Traction
Transport Construction

Dnipro

2024

Founder:
UKRAINIAN STATE UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGIES

Editor-in-Chief
Deputy Chief Editor
Executive Editor

Pichugov S. A., Doctor of Physics and Mathematics
Kozachenko D. M., Doctor of Technical Sciences
Kolesnykova T. O., PhD of Social Communications

EDITORIAL BOARD MEMBERS:

Avramovic Z. Ž., Faculty of Transport and Traffic Engineering (Serbia); Béla I., Logistics Institute (Hungary); Biliaiev M. M., USUST (Ukraine); Bodnar B. E., USUST (Ukraine); Bogdevičius M., Vilniaus Gedimino technikos universitetas (Lithuania); Cygler J., Szkoła Główna Handlowa w Warszawie (Poland); Efremenko V. G., Priazovsky State Technical University (Ukraine); Golovkova L. S., USUST (Ukraine); Kalivoda J., Czech Technical University in Prague (Czech Republic); Kapitsa M. I., USUST (Ukraine); Kapustyan V. O., National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», (Ukraine); Kersys R., Kaunas University of Technology (Lithuania); Kuznetsov V. G., The Railway Research Institute, (Poland); Manashkin L., Self-Employed (USA); Maruschak P. O., Ternopil Ivan Puluj National Technical University (Ukraine); Muradian L. A., USUST (Ukraine); Sokhatsky A. V., University of customs and finances (Ukraine); Pittman R., Antitrust Division of the USA. Department of Justice (USA); Raksha S. V., USUST (Ukraine); Shinkarenko V. I., USUST (Ukraine); Ślaskowski A., Politechnika Śląska w Gliwicach (Poland); Tiutkin O. L., USUST (Ukraine); Vakulenko I. O., USUST (Ukraine); Voronin S. V., UkrSURT (Ukraine); Zhukovitskiy I. V., USUST (Ukraine)

Journal
was registered

Decision of the National Council of Ukraine on Television and Radio Broadcasting No. 924 dated 28.09.2023
(Until 28.09.2023: State Registration Service of the Ministry of Justice of Ukraine, Certificate of registration KB no.19609-9409PR from 29.12.2012)
Edition is included in category B «List of scientific specialized publications of Ukraine» by the Order of the Ministry of Education and Science of Ukraine no. 409 from 17.03.2020 (technical sciences).
Journal is registered in the International Catalogue of periodicals: Ulrichsweb™ Global Serials Directory, Crossref, Open Ukrainian Citation Index (OUCI), OCLC WorldCat, Google Scholar, DOAJ, Index Copernicus, Україніка наукова, etc.
Published according to the Academic Council decision of the University from 03.04.2024, Protocol no. 8

Publisher Ukrainian State University of Science and Technologies (Dnipro)
Certificate of Publisher ДК no. 7709 from 14.12.2022

Address
of Founder

Lazaryana St., 2, room 267, Dnipro, Ukraine, 49010, tel.: +38 (056) 371-51-05;
e-mail: stp.journal@ust.edu.ua; journal site: <http://stp.diit.edu.ua/>

Edition is being published since 1936:

1936–1993 – «Труды Днепропетровского института инженеров железнодорожного транспорта»;
1993–2002 – «Збірник наукових праць Дніпропетровського державного технічного університету залізничного транспорту» (за серіями);
2003–2012 – «Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна», (ISSN 1993-9175);
2013–2022 – «Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна»;
since 2023 – «Наука та прогрес транспорту»

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

УДК 628.35:519.87

М. М. БІЛЯЄВ¹, П. Б. МАШИХІНА^{2*}, Р. П. ПОБЕДЬОННИЙ³, А. О. ЧІРКОВ⁴,
М. В. ЧИРВА⁵

¹Каф. «Гідравліка та водопостачання», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 09, ел. пошта biliaev.m@gmail.com, ORCID 0000-0002-1531-7882

^{2*}Каф. «Гідравліка та водопостачання», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 09, ел. пошта gidro_eko@ukr.net, ORCID 0000-0003-3057-9204

³Каф. «Гідравліка та водопостачання», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 09, ел. пошта water.supply.treatment@gmail.com, ORCID 0009-0009-6551-1630

⁴Каф. «Гідравліка та водопостачання», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 09, ел. пошта diit.hydro.eco@gmail.com, ORCID 0009-0005-4326-2881

⁵Каф. «Гідравліка та водопостачання», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 09, ел. пошта chyrva_m@gmail.com, ORCID 0009-0006-1416-9482

Математична модель аналізу кисневого режиму в біореакторі

Мета. Сьогодні аеротенки широко використовують для очищення стічних вод підприємств та комунальних стоків. Оцінювання ефективності очищення води в аеротенках за різних режимів експлуатації є важливою задачею. Для розв'язання такої задачі потрібно мати математичні моделі, що дозволяють оперативно отримати дані щодо ефекту очищення в аеротенках. Основною метою роботи є розробка чисельної моделі для визначення ефективності очищення стічних вод в аеротенку. **Методика.** Для математичного моделювання процесу біологічного очищення стічних вод у біореакторі використовують нульвимірні рівняння матеріального балансу, що записані відносно концентрації субстрату, активного мулу та розчиненого кисню в стічних водах. Для розрахунку процесу окислення субстрату використано модель Monod. Для інтегрування моделювальних рівнянь використовують метод Ейлера. Розглянуто спрощену модель біологічного очищення води в біореакторі, що дає можливість отримати аналітичне розв'язання задачі. Отриманий аналітичний вираз дає можливість швидко визначити зміну концентрації розчиненого кисню в стічних водах залежно від зміни концентрації активного мулу в біореакторі. Побудована чисельна модель дає можливість визначати динаміку зміни концентрації забруднень, активного мулу та кисню в стічних водах за час перебування їх у біореакторі. **Результати.** Запропоновано інструмент теоретичної оцінки ефективності біологічного очищення стічних вод в аеротенку. Побудовано чисельну модель, що дає можливість визначити концентрацію розчиненого кисню, субстрату та активного мулу на виході з аеротенка. **Наукова новизна.** Розроблено ефективну чисельну модель, що дозволяє швидко розраховувати динаміку очищення стічних вод у біореакторі та на базі цієї інформації оцінювати ефективність роботи реактора. **Практична значимість.** Побудована математична модель може бути корисна під час реконструкції споруд біологічного очищення стічних вод, а також на етапі проектування біореакторів для врахування їх роботи за різних умов експлуатації. Розроблено комп'ютерну програму, що реалізує побудовану чисельну модель. Наведено результати комп'ютерного експерименту.

Ключові слова: біореактор; очищення стічних вод; чисельне моделювання; водокористування

Вступ

Проблема очищення стічних вод є вкрай важливою в галузі водокористування. Для очищення стічних вод потрібні різні споруди, що працюють в умовах різного навантаження [2–

13]. За допомогою спеціальних методів теоретичного оцінювання з'ясовують ефективність роботи таких споруд для конкретних умов експлуатації. Для оцінювання ефективності очищення стічних вод широко використовують емпіричні та аналітичні моделі [2–5], значно

рідше – чисельні моделі [1, 8–10]. Слід підкреслити, що особливо важко розраховувати процеси біологічного очищення стічних вод. Таке очищення відбувається в спеціальних спорудах – біореакторах, що мають різну форму та різне «наповнення». Процеси, що відбуваються місце в біореакторі, дуже складні, і під час розрахунку біореактора потрібно розраховувати гідродинаміку течії [1], масоперенос та процес взаємодії активного мулу та субстрату. Саме це створює значні труднощі в розробці математичних моделей для аналізу ефективності роботи цих споруд. Попри це значну увагу приділяють саме розробці математичних моделей для аналізу роботи біореакторів. Це пов'язано з тим, що проведення фізичного експерименту потребує значного часу – близько кількох тижнів. Зрозуміло, що такі витрати часу на отримання результатів не задовольняють дослідників.

На основі системного аналізу літературних джерел автори визначили групи математичних моделей, які використовують для розрахунку біореакторів у системах очищення стічних вод. Наведемо цю інформацію відповідно до [1]:

1) математичні моделі, орієнтовані на оцінку ефективності роботи біореактора в умовах не лімітованої кількості кисню в споруді;

2) математичні моделі, орієнтовані на оцінку ефективності роботи біореактора з урахуванням нерівномірного розподілу кисню в споруді;

3) математичні моделі, орієнтовані на оцінку тільки кількості кисню в споруді за різних умов його подачі.

На практиці використовують різні класи моделей, а саме [1]:

1. Емпіричні моделі. Ці моделі створюють основу нормативних та інженерних методик розрахунку біореакторів. Моделі мають вигляд алгебраїчних співвідношень, які використовують для визначення тих або інших параметрів очисних споруд.

Емпіричні моделі дуже зручно використовувати для проєктування типових біореакторів, що працюють у «класичних» умовах експлуатації. Розрахунок на базі цих моделей не потребує значного часу та використання комп'ютера. Дуже важливо те, що в емпіричних моделях, використовують параметри, які прямо характеризують умови експлуатації споруди та які легко визначити: добова витрата стічних вод, па-

раметри стічних вод тощо; кількість таких параметрів – незначна. Але ці моделі мають недоліки [1]:

1) як усі емпіричні моделі, їх можна використовувати лише для тих умов, для яких визначені конкретні константи, що містить модель;

2) моделі фактично не враховують гідродинаміку всередині біореактора;

3) моделі не враховують геометричну форму біореактора;

4) моделі не враховують детально біологічні аспекти очищення води;

5) моделі не враховують нерівномірний розподіл субстрату, активного мулу, кисню в реакторі.

2. Нульвимірні моделі. Інша група моделей – моделі, в основу яких покладено звичайні диференціальні рівняння, що описують процес біологічного очищення стічних вод. Це нульвимірні моделі на основі балансового співвідношення: притік – вихід – приріст (або деструкція). Таким чином, нульвимірні моделі є багатofакторними, що важливо на практиці.

Необхідно підкреслити, що поряд із нестационарними балансовими рівняннями також використовують стаціонарні рівняння (коли похідні за часом дорівнюють нулю). Використання стаціонарних рівнянь дозволяє, в багатьох випадках знаходити аналітичний розв'язок задачі.

Важливим аспектом є те, що за допомогою моделей цієї групи визначають константи, які входять до моделі і які використовують для теоретичного опису біологічного очищення в реакторі (моделі Monod, моделі Haremoes, Stover – Kincannon та інші).

Слід зазначити, що наявні нульвимірні моделі для аналізу роботи біореакторів у цілому орієнтовані на розв'язання задач, коли параметри задачі – постійні. Наприклад, не враховують зміну з часом витрати стічних вод, а також зміну з часом концентрації субстрату, що надходить до реактора. Це є недоліком, тому що витрата стічних вод є суттєво нерівномірною, тобто вона є змінною з часом на реальних об'єктах. Також змінною з часом є концентрація субстрату в стічних водах, що потрапляють на очищення. Така зміна концентрації може бути пов'язана, наприклад, з аварією на об'єкті.

Широке використання моделей цієї групи пояснюється тим, що, як відзначено вище, моделювальні рівняння допускають аналітичний розв'язок. У деяких випадках можливе застосування чисельних методів (наприклад, методу Рунге–Кутта) для розв'язання звичайних диференціальних рівнянь. Нульвимірні моделі використовують за кордоном у кодах ASM1, ASM2 та інших. У цих моделях додатково використовують емпіричні «субмоделі», що дозволяють визначити необхідні для розрахунку реактора параметри (модель Monod, модель швидкості деструкції субстрату в біоплівці тощо). Додатковою «субмоделлю» є одновимірне рівняння дифузії, що описує, наприклад, потік субстрату в біоплівці. Розрахунок на базі моделей цієї групи триває декілька секунд, тобто моделі можна використовувати для проведення серійних розрахунків на практиці.

Практичність застосування нульвимірних моделей пов'язано з тим, що в їх основі лежить закон збереження маси для субстрату, активного мулу або кисню, тобто використано універсальне положення механіки суцільного середовища.

Але слід відзначити такі недоліки моделей цієї групи [1]:

1) не враховано гідродинаміку всередині реактора;

2) не враховано нерівномірність розподілу концентрації активного мулу та субстрату в реакторі та вплив такої нерівномірності на процес біологічних перетворень.

3. *CFD-моделі для розрахунку споруд біологічного очищення стічних вод* [1]. В основу цих моделей покладено послідовне розв'язання трьох задач – задачі гідродинаміки, задачі масопереносу та задачі біологічного «перетворення» субстрату. Для розв'язання гідродинамічної задачі використовують, найчастіше рівняння Нав'є–Стокса. Для розрахунку концентрації активного мулу та субстрату використовують багатовимірне рівняння масопереносу. Задачу біологічного перетворення субстрату розв'язують за допомогою «субмоделей» різної ієрархії. Ці моделі також використовують для розрахунку кисневого режиму в біореакторі. Тобто моделі цієї групи теж багатofакторні, крім цього, вони дозволяють враховувати вплив руху субстрату, кисню, актив-

ного мулу на ефективність біологічного очищення стічних вод.

Важливою перевагою моделей цієї групи є можливість розрахунку нерівномірного розподілу субстрату, активного мулу, кисню в біореакторі, врахування геометричної форми споруди, місць подачі кисню та ін. Як правило, за кордоном для CFD-моделювання використовують комерційні пакети програм, наприклад, пакет ANSYS. Тобто дослідники не розробляють свої CFD-моделі, а використовують уже наявні пакети програм.

Аналіз літературних джерел [1] показує, що частка наукових досліджень на базі CFD-моделей у цій галузі дуже обмежена. Попри наявність суттєвих та важливих переваг CFD-моделей над моделями інших груп вони мають ряд недоліків:

1) дуже висока вартість комерційних ліцензованих пакетів для CFD-моделювання;

2) необхідність спеціалізованих знань у галузі обчислювальної гідродинаміки, очищення стічних вод;

3) необхідність ліцензії у користувача для використання комерційних пакетів для наукових досліджень або прикладних розрахунків;

4) значні затрати комп'ютерного часу на розрахунок одного варіанта задачі (тривалість розрахунку – декілька діб);

5) потрібно використовувати потужні комп'ютери для проведення розрахунків, що суттєво перешкоджає щоденному практичному використанню моделей;

6) у разі використання комерційних пакетів CFD-моделювання роботи біореакторів можливе лише в «рамках», що дозволені розробниками пакета.

Як свідчить аналіз літературних джерел, в Україні є суттєвий дефіцит самостійно побудованих CFD-моделей.

Слід підкреслити, що сьогодні існує незначна кількість математичних моделей, що дозволяють б розраховувати біореактори із завислим або зваженим біоценозом [1].

Для практики необхідні моделі, які можна забезпечити вхідними даними для проведення розрахунків (наприклад, параметри для моделей Monod, Graumode).

Можна зазначити, що у зв'язку з великою кількістю біореакторів, які експлуатують сьо-

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

годні на різних об'єктах, залишається проблема створення ефективних математичних моделей для аналізу їх роботи.

Мета

Робота спрямована на розробку box-моделі, що дозволяє в режимі реального часу прогнозувати рівень розчиненого кисню в аеротенку та оцінити ефективність очищення стічних вод у біореакторі.

Методика

Для опису процесу біологічного очищення стічних вод в аеротенку використовують такі рівняння [1, 12]:

$$\frac{dX}{dt} = Q(t) \cdot X_{in}(t) - Q(t) \cdot X + \mu \cdot X - K_d \cdot X; \quad (1)$$

$$\frac{dDO}{dt} = Q(t) \cdot DO_{in}(t) - Q(t) \cdot DO(t) + K_{La}(DO_{max} - DO) - \frac{K_0 \mu X}{Y}; \quad (2)$$

$$\frac{dS}{dt} = Q(t) \cdot S_{in}(t) - Q(t) \cdot S(t) - \frac{\mu X}{Y}; \quad (3)$$

$$\mu = \mu_{max} \cdot \frac{S}{S + K_s} \cdot \frac{DO}{k_{DO} + DO}, \quad (4)$$

де t – час; $Q(t)$ – витрата стічних вод; $X_{in}(t)$ – концентрація активного мулу, що потрапляє до аеротенка; S_{in} – концентрація субстрату, що потрапляє до аеротенка; K_d – коефіцієнт, що враховує швидкість вимирання біомаси; DO – концентрація кисню в стічних водах; DO_{max} – максимальне значення концентрації кисню в стічних водах; DO_{in} – концентрація кисню в стічних водах, що потрапляють до реактора; $K_0, K_s, K_{La}, \mu_{max}, k_{DO}, Y$ – параметри [12].

Рівняння (1)–(3) виражають закон збереження маси для субстрату, розчиненого кисню та активного мулу в реакторі. Залежність (4) показує зв'язок швидкості приросту біомаси в біореакторі залежно від концентрації розчиненого кисню та концентрації субстрату.

Для системи рівнянь (1)–(3) потрібно задати початкові умови за $t = 0$:

$$X = X_0; \quad S = S_0; \quad DO = DO_0.$$

Моделювальні рівняння (1)–(3) дають можливість визначити, як із часом змінюється концентрація субстрату (домішки) в біореакторі, а також розчиненого кисню та активного мулу.

Система рівнянь (1)–(3) є нелінійною. Для аналітичного аналізу процесу біологічного очищення стічних вод в аеротенку розглянемо спрощену модель. Такі спрощені рівняння можна отримати із системи рівнянь (1)–(3), якщо знехтувати деякими членами. Спрощена модель біологічного очищення має вигляд:

$$\frac{dX}{dt} = \mu \cdot X; \quad (5)$$

$$\frac{dDO}{dt} = -\frac{K_0 \mu X}{Y}; \quad (6)$$

$$\frac{dS}{dt} = -\frac{\mu X}{Y}. \quad (7)$$

Тут беремо, що коефіцієнт μ не залежить від концентрації розчинного кисню, тобто

$$\mu = \mu_{max} \cdot \frac{S}{S + K_s}.$$

Далі запишемо рівняння (6) так:

$$\frac{dDO}{dX} \frac{dX}{dt} = -\frac{K_0 \mu X}{Y}. \quad (8)$$

З урахуванням (5) можемо привести рівняння (8) до вигляду:

$$\frac{dDO}{dX} \mu X = -\frac{K_0 \mu X}{Y}$$

або

$$\frac{dDO}{dX} = -\frac{K_0}{Y}. \quad (9)$$

Рівняння (9) можна записати так:

$$dDO = -\frac{K_0}{Y} dX. \quad (10)$$

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

Таким чином, згідно з (10) збільшення концентрації активного мулу в біореакторі на величину dX призводить до пропорційного зменшення концентрації розчиненого кисню в стічних водах, а коефіцієнт пропорційності дорівнює K_0/Y . Параметри K_0 , Y визначають експериментальним шляхом. Але якщо взяти $K_0 = 0,5$; $Y = 0,55$, то коефіцієнт пропорційності дорівнюватиме $K_0/Y = 0,91$.

Безумовно, залежність (10) можна використати лише для приблизної оцінки зменшення розчиненого кисню в стічних водах, що проходять очищення в біореакторі.

Чисельне інтегрування рівнянь (5) – (7) здійснюють за методом Ейлера. Розрахункові залежності мають вигляд:

$$X^{n+1} = X^n + dt \cdot \mu^n \cdot X^n; \quad (11)$$

$$DO^{n+1} = DO^n - dt \cdot \frac{K_o \mu^n}{Y} X^{n+1}; \quad (12)$$

$$S^{n+1} = S^n - dt \cdot \frac{K_o \mu^n}{Y} X^{n+1}. \quad (13)$$

Здійснено програмну реалізацію різницьових рівнянь (11) – (13). Створено комп'ютерну програму AER-T, мова програмування – FORTRAN.

Результати

Нижче наведено результати розв'язання моделювальної задачі: на базі рівнянь (5) – (7) здійснюємо чисельний розрахунок зміни концентрацій субстрату, активного мулу та розчиненого кисню в біореакторі. При цьому використовуємо метод Ейлера (і апроксимуємо залежності (11) – (13)). Паралельно здійснюємо розрахунок зміни кількості розчиненого кисню в біореакторі на базі спрощеної (аналітичної) моделі (10). Тобто порівнюємо визначення концентрації розчиненого кисню на базі чисельної моделі та аналітичного виразу. Розрахунок здійснюємо за початкової умови (якщо $t = 0$): $S_0 = 200$ мг/л, $X_0 = 3$ мг/л, $DO_0 = 3$ мг/л.

Нижче на рис. 1–3 показана зміна прогнозованих параметрів в біореакторі для різних моментів часу (час безрозмірний).

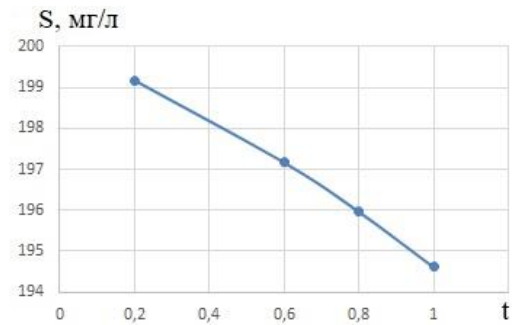


Рис. 1. Зміна концентрації субстрату в біореакторі з часом

Fig. 1. Changes in substrate concentration in a bioreactor over time

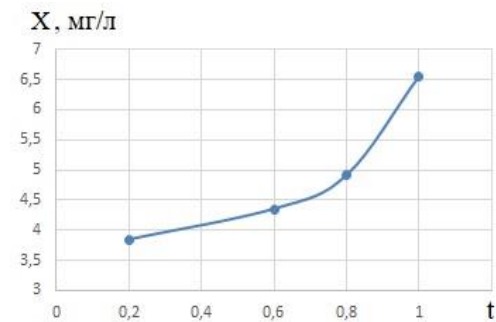


Рис. 2. Зміна концентрації активного мулу в біореакторі з часом

Fig. 2. Changes in the concentration of activated sludge in a bioreactor over time

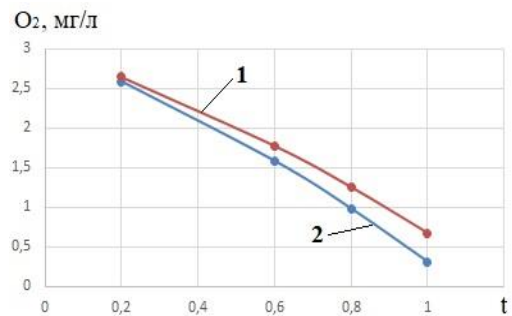


Рис. 3. Зміна концентрації розчиненого кисню в біореакторі з часом:

- 1 – розрахунок на базі аналітичної моделі;
2 – розрахунок на базі чисельної моделі

Fig. 3. Changes in the concentration of dissolved oxygen in a bioreactor over time:

- 1 – calculation based on the analytical model;
2 – calculation based on a numerical model

Як бачимо з наведених рисунків, за вибраних вхідних параметрів у біореакторі має місце зменшення кількості субстрату та зростання

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

концентрації активного мулу. Також можна побачити, що в рамках розглянутої спрощеної моделі наявна задовільна збіжність розрахунку розчиненого кисню в біореакторі на базі чисельної та аналітичної моделей. Але зі збільшенням часу зростає різниця між аналітичною моделлю та чисельним розв'язком.

Відзначимо, що час розрахунку дорівнював 1 с.

Наукова новизна та практична значимість

У статті розглянуто експрес-метод розрахунку кисневого режиму в аеротенку. Метод дозволяє швидко визначити концентрацію розчиненого кисню в біоспоруді. Це дає можливість

здійснити спрощене оцінювання процесу біохімічного окислення в очисній споруді.

Запропонований метод можна використовувати під час проєктування або реконструкції споруд біологічного очищення води для оцінювання кисневого режиму та його зміну з часом.

Висновки

1. У статті запропонована чисельна модель для аналізу ефективності очищення води в біореакторі. Результати комп'ютерного експерименту показують, що розроблена математична модель дає можливість в онлайн-режимі розраховувати основні параметри, що характеризують ефективність роботи біореактора.

2. У подальшому цей науковий напрям слід розвивати для розробки тривимірної чисельної моделі для аналізу ефективності роботи біореактора.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Біляєв М. М., Козачина В. А., Гунько О. Ю., Лемеш М. В. *Комп'ютерне моделювання процесів біологічної очистки стічних вод* : монографія. Дніпро : Журфонд, 2023. 186 с.
2. Василенко О. А., Грабовський П. О., Ларкіна Г. М., Поліщук О. В., Прогульний В. Й. *Реконструкція і інтенсифікація споруд водопостачання та водовідведення* : навч. посіб. Київ : ІВНВКП «Укреліотек», 2010. 272 с.
3. Карелин Я. А., Жуков Д. Д., Журов В. Н., Репин Б. Н. *Очистка производственных сточных вод в аэротенках*. Москва : Стройиздат, 1973. 223 с.
4. Ласков Ю. М., Воронов Ю. В., Калицун В. И. *Примеры расчетов канализационных сооружений*. Москва : Высшая школа, 1981. 237 с.
5. Олійник О. Я., Айрапетян Т. С. Моделювання очисних стічних вод від органічних забруднень в біореакторах-аеротенках зі зваженим (вільно плаваючим) і закріпленим біоценозом. *Доповідь НАН України*. 2015. № 5. С. 55–60. DOI: <https://doi.org/10.15407/dopovidi2015.05.055>
6. Alharbi A. O. M. The biological treatment of wastewater: mathematical models. *Bulletin of the Australian Mathematical Society*. 2016. Vol. 94. Iss. 2. P. 347–348. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0004972716000411>
7. Babaei A., Azadi R., Jaafarzadeh N., Alavi N. Application and Kinetic Evaluation of upflow Anaerobic bio-film Reactor for Nitrogen Removal from Wastewater. *Iranian Journal of Environmental Health Science and Engineering*. 2013. Vol. 10. Iss. 1. P. 1–8. DOI: <https://doi.org/10.1186/1735-2746-10-20>
8. Dapelo D., Bridgeman G. A CFD strategy to retrofit an anaerobic digester to improve mixing performance in wastewater treatment. *Water Science & Technology*. 2020. Vol. 81. Iss. 8. P. 1646–1657. DOI: <https://doi.org/10.2166/wst.2020.086>
9. Gao H., Stenstrom M. K. Development and applications in CFD modeling for secondary settling tanks over the last three decades: A review. *Water Environment Research*. 2019. Vol. 92. Iss. 6. P. 796–820. DOI: <https://doi.org/10.1002/wer.1279>
10. Gao H., Stenstrom M. K. Influence of Model Parameters and Inlet Turbulence Boundary Specification Methods in Secondary Settling Tanks: Computational Fluid Dynamics Study. *Journal of Environmental Engineering*. 2020. Vol. 146. Iss. 5. P. 04020028–1–04020028–12. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EE.1943-7870.0001689](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0001689)
11. Mocanu C. R., Mihailescu R. Numerical Simulation Wastewater Treatment Aeration Processes. *U. P. B. Sci. Bull., Series D*. 2012. Vol. 74. Iss. 2. P. 191–198.
12. Pereda M., Zamarreno J. M. Agent – based modeling of an activated sludge process in batch reactor. *19th Mediterranean Conference on Control and Automation Aquis* (Corfu, 20–23 June 2011). Corfu, 2011. P. 1128–1133. DOI: <https://doi.org/10.1109/med.2011.5983027>

13. Vilanova R., Rojas J. D., Alfaro V. M. Digital Control of a Waste Water Treatment Plant. *International Journal of Computers Communications & Control*. 2011. Vol. 6, № 2. P. 367–374.
DOI: <https://doi.org/10.15837/ijccc.2011.2.2184>

M. M. BILIAIEV¹, P. B. MASHYKHINA^{2*}, R. P. POBIEDONNYI³, A. O. CHIRKOV⁴,
M. V. CHYRVA⁵

¹Dep. of «Hydraulics and Water Supply», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 09, e-mail: biliaiev.m@gmail.com, ORCID: 0000-0002-1531-7882

^{2*}Dep. of «Hydraulics and Water Supply», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 09, e-mail: gidro_eko@ukr.net, ORCID: 0000-0003-3057-9204

³Dep. of «Hydraulics and Water Supply», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 09, e-mail: water.supply.treatment@gmail.com, ORCID: 0009-0009-6551-1630

⁴Dep. of «Hydraulics and Water Supply», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 09, e-mail: diit.hydro.eco@gmail.com, ORCID: 0009-0005-4326-2881

⁵Dep. of «Hydraulics and Water Supply», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 09, e-mail: chyrva_m@gmail.com, ORCID: 0009-0006-1416-9482

Mathematical Model of Oxygen Regime Analysis in a Bioreactor

Purpose. Today, aeration tanks are widely used to treat industrial and municipal wastewater. Assessing the efficiency of water treatment in aeration tanks under different operating conditions is an important task. To solve this problem, it is necessary to have mathematical models that allow to quickly obtain data on the effect of treatment in aeration tanks. The main objective of this work is to develop a numerical box model to determine the efficiency of wastewater treatment in an aeration tank. **Methodology.** For mathematical modeling of the biological wastewater treatment process in a bioreactor, zero-dimensional material balance equations are used, which are written in relation to the concentration of substrate, activated sludge, and dissolved oxygen in wastewater. The Monod model is used to calculate the substrate oxidation process. The Euler method is used to integrate the modeling equations. A simplified model of biological water treatment in a bioreactor is considered, which makes it possible to obtain an analytical solution to the problem. The obtained analytical expression makes it possible to quickly determine the change in the concentration of dissolved oxygen in wastewater depending on the change in the concentration of activated sludge in the bioreactor. The constructed numerical model makes it possible to determine the dynamics of changes in the concentration of contaminants, activated sludge and oxygen in wastewater during their stay in the bioreactor. **Findings.** A tool for theoretical evaluation of the efficiency of biological wastewater treatment in an aeration tank is proposed. A numerical model has been built that allows determining the concentration of dissolved oxygen, substrate and activated sludge at the outlet of the aeration tank. **Originality.** An effective numerical model has been developed that allows to quickly calculate the dynamics of wastewater treatment in a bioreactor and, based on this information, to evaluate the efficiency of the reactor. **Practical value.** The constructed mathematical model can be useful in the reconstruction of biological wastewater treatment facilities, as well as at the design stage of bioreactors to take into account their operation under different operating conditions. A computer program has been developed that implements the constructed numerical model. The results of a computer experiment are presented.

Key words: bioreactor; wastewater treatment; numerical modeling; water use

REFERENCES

1. Biliaiev, M. M., Kozachyna, V. A., Gunko, O. Yu., & Lemesh, M. V. (2023). *Kompiuterne modeliuвання protsesiv biolohichnoi ochystky stichnykh vod: monohrafiia*. Dnipro: Zhurfond. (in Ukrainian)
2. Vasylenko, O. A., Hrabovskyi, P. O., Larkina, H. M., Polishchuk, O. V., & Prohulnyi, V. Y. (2010). *Rekonstruktsiia i intensyfikatsiia sporud vodopostachannia ta vodovidvedennia: navchalnyi posibnyk*. Kyiv: IVNVKP «Ukrheliotek». (in Ukrainian)
3. Karelin, Ya. A., Zhukov, D. D., Zhurov, V. N., & Repin, B. N. (1973). *Ochistka proizvodstvennykh stochnykh vod v aerotenkah*. Moscow: Stroyizdat. (in Russian)
4. Laskov, Yu. M., Voronov, Yu. V., & Kalicun, V. I. (1981). *Primery raschetov kanalizatsionnykh sooruzheniy*. Moscow: Vysshaya Shkola. (in Russian)

5. Oliinyk, O. Ya., & Airapetyan, T. S. (2015). The modeling of the clearance of waste waters from organic pollutions in bioreactors-aerotanks with suspended (free flow) and fixed biocenoses. *Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine*, 5, 55-60. DOI: <https://doi.org/10.15407/dopovidi2015.05.055> (in Ukrainian)
6. Alharbi, A. O. M. (2016). The biological treatment of wastewater: mathematical models. *Bulletin of the Australian Mathematical Society*, 94(2), 347-348. DOI: <https://doi.org/10.1017/s0004972716000411> (in English)
7. Babaei, A., Azadi, R., Jaafarzadeh, N., & Alavi, N. (2013). Application and Kinetic Evaluation of upflow An-aerobic biofilm Reactor for Nitrogen Removal from Wastewater. *Iranian Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 10(1), 1-8. DOI: <https://doi.org/10.1186/1735-2746-10-20> (in English)
8. Dapelo, D., & Bridgeman, G. (2020). A CFD strategy to retrofit an anaerobic digester to improve mixing performance in wastewater treatment. *Water Science & Technology*, 81(8), 1646-1657. DOI: <https://doi.org/10.2166/wst.2020.086> (in English)
9. Gao, H., & Stenstrom, M. K. (2019). Development and applications in CFD modeling for secondary settling tanks over the last three decades: A review. *Water Environment Research*, 92(6), 796-820. DOI: <https://doi.org/10.1002/wer.1279> (in English)
10. Gao, H., & Stenstrom, M. K. (2020). Influence of Model Parameters and Inlet Turbulence Boundary Specification Methods in Secondary Settling Tanks: Computational Fluid Dynamics Study. *Journal of Environmental Engineering*, 146(5), 04020028-1-04020028-12. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EE.1943-7870.0001689](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0001689) (in English)
11. Mocanu, C. R., & Mihailescu, R. (2012). Numerical Simulation Wastewater Treatment Aeration Processes. *U. P. B. Sci. Bull., Series D*, 74(2), 191-198. (in English)
12. Pereda, M., & Zamarreno, J. M. (2011, June). Agent-based modeling of an activated sludge process in batch reactor. *19th Mediterranean Conference on Control and Automation Aquis* (pp. 1128-1133). Corfu, Greece. DOI: <https://doi.org/10.1109/med.2011.5983027> (in English)
13. Vilanova, R., Rojas, J. D., & Alfaro, V. M. (2011). Digital Control of a Waste Water Treatment Plant. *International Journal of Computers Communications & Control*, 6(2), 367-374. DOI: 10.15837/ijccc.2011.2.2184 (in English)

Надійшла до редколегії: 03.12.2023

Прийнята до друку: 29.03.2024

УДК 69.059.2:004.65-047.36

С. В. БОГАЧЕНКО¹, С. В. ШАТОВ^{2*}

¹Каф. «Технології будівельного виробництва», Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24а, Дніпро, Україна, 49600, тел. +38 (056) 756 34 76, ел. пошта bohachenko.serhii@pdaba.edu.ua, ORCID 0000-0003-4787-8737

^{2*}Каф. «Будівельні і дорожні машини», Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24а, Дніпро, Україна, 49600, тел. +38 (056) 756 33 73, ел. пошта shatov.serhii@pdaba.edu.ua, ORCID 0000-0002-1697-2547

База даних для моніторингу технічного стану споруд, як складова частина промислової безпеки

Мета. Автори передбачають розробку бази даних, призначену для систематизації та зберігання інформації про технічний стан промислових споруд на основі результатів періодичних візуальних та інструментальних обстежень. **Методика.** Інформаційна система містить базу даних, систему управління базою даних та прикладну програму. Під час вибору типу бази даних для моніторингу технічного стану споруд використання реляційної структури є найбільш доцільним. Модель бази даних охоплює власників споруди, конструкції, кількісні та якісні параметри дефектів і пошкоджень, показники міцності будівельних конструкцій та кренів промислових споруд. **Результати.** У процесі розробки бази даних для моніторингу технічного стану промислових споруд було використано мову структурних запитів. Створена база даних «Monitoring» містить взаємопов'язані таблиці, які забезпечують цілісне й ефективне зберігання інформації. Зв'язок таблиць виконано за допомогою зовнішніх ключів, що забезпечує легкий доступ та керування даними. Умовно таблиці поділено на такі, які заповнюють користувачі, та такі, які заповнені згідно із законодавчими та нормативними документами на етапі створення бази даних. Такий підхід до побудови бази даних забезпечує структуроване зберігання інформації про технічний стан споруд з урахуванням нормативів та законодавства. Інтеграція таблиць, які заповнюють користувачі, та попередньо заповнених створює систему, що підвищує ефективність ведення моніторингу технічного стану промислових споруд. **Наукова новизна.** Запропонована база даних відображає інноваційний підхід до структурування та інтеграції різних типів даних, пов'язаних із технічним станом промислових споруд. Система пропонує ефективне об'єднання даних різних форматів та джерел у єдиний інформаційний простір, що в подальшому забезпечить комплексний аналіз стану будівельних конструкцій, який є одним із ключових факторів промислової безпеки. **Практична значимість.** Результати роботи сприятимуть ефективності обслуговування промислових споруд та безпеки експлуатації, надають інструменти для зберігання результатів моніторингу стану будівельних конструкцій.

Ключові слова: промислова безпека; оцінка технічного стану; моніторинг технічного стану; експлуатація споруд; інформаційні системи; база даних

Вступ

Сучасна промислова інфраструктура, включаючи споруди, відіграє ключову роль у забезпеченні комфорту та безпеки людини. Однак, незважаючи на стандарти та нормативи, ефективне дотримання безпечної експлуатації об'єктів будівництва потребує системного та інноваційного підходу. Результати досліджень [10] свідчать, що під час аналізу вартості експлуатації потрібно використовувати результати моніторингу технічного стану об'єктів, навіть якщо параметри залишаються незмінними в часі.

Наразі основну увагу у сфері безпеки експлуатації споруд приділяють автоматизованим систем моніторингу. Ці системи дозволяють відслідковувати стан конструкцій за допомогою датчиків, які вмонтовані в конструкції або закріплені на них, у режимі реального часу. Відома [11] стаціонарна система моніторингу підвісного мосту довжиною 1 280 м, яка збирає інформацію про вітрове навантаження, температуру та вологість, транспортне навантаження, сейсмічну активність, деформації головної вежі, деформації основної балки, вібрацію конструкцій, переміщення (балки, опори). На основі зібраних даних встановлена кореляційна залежність між деформаціями балки та температу-

рою. Іншим прикладом є використання стаціонарних систем моніторингу в разі підйому споруди на 1,3 м відносно проектного положення [9]. Проте дані систем доцільно використовувати під час будівництва або реконструкції інженерно складних об'єктів [6].

Другий варіант дотримання безпечної експлуатації – це проведення моніторингу, основаного на періодичній оцінці технічного стану будівельних конструкцій.

Однією з головних проблем в цьому напрямі є відсутність цифрових інформаційних систем, у яких можна зберігати та в подальшому аналізувати інформацію про технічний стан промислових споруд. Наявні методи моніторингу в основному ґрунтуються на періодичних обстеженнях, результати яких залишаються у звітах на паперових носіях або у розрізних електронних документах.

Відсутність цифрової інформаційної системи, що поєднує дані моніторингу, створює прогалини в інформаційній базі для ухвалення управлінських рішень, які здатні підвищити промислову безпеку споруд. Необхідність в інформаційній цифровій платформі, що здатна накопичувати, систематизувати та візуалізувати інформацію щодо технічного стану об'єктів, стає все більш актуальною.

База даних як складова інформаційної системи не лише забезпечить централізований доступ до даних, а й відкриє можливості для прогнозування технічного стану, оптимізації витрат на регулярні обстеження, а отже, гарантуватиме безпеку в експлуатації та підвищить ефективність управління.

Таким чином, створення цифрової бази даних, яка дозволить зберігати та відображати результати моніторингу та періодичної оцінки технічного стану промислових споруд, є невідкладним завданням, спрямованим на підвищення рівня безпеки та ефективності управління.

Мета

Основною метою нашої роботи є розробка бази даних, яка дозволить зберігати інформацію про споруди і їх власників, виявлені дефекти (пошкодження) будівельних конструкцій, кількісні показники міцності конструкцій і кренів споруд упродовж усього терміну експлуатації.

Методика

Згідно з ДСТУ ISO/IEC 2382–15:2017 [3] «інформаційна система – це система опрацювання інформації, а також пов'язані організаційні ресурси, такі як людські, технічні та фінансові ресурси, що забезпечує та поширює інформацію». До складу інформаційної системи з технічної точки зору належать: база даних, система управління базою даних та прикладна програма. Бази даних бувають таких типів: NoSQL, ієрархічні, об'єктно-орієнтовані, реляційні.

Бази даних NoSQL дозволяють зберігати значний обсяг неструктурованих даних, проте можуть виявитися менш зручними для підтримки складних взаємозв'язків та множини таблиць, що характерно для моніторингу споруд. Ієрархічні бази даних ефективні для зберігання деревоподібних структур даних, але обмежені в обробці складних відношень між різними параметрами технічного стану споруд. Об'єктно-орієнтовані бази даних зручні для зберігання об'єктів з їх методами та властивостями, при цьому ускладняється структурування даних, оскільки технічний стан часто характеризується декількома параметрами.

З огляду на те, що база даних повинна містити інформацію про власників, споруди, конструкції, виявлені дефекти та пошкодження (їх кількісні та якісні показники), результати визначення міцності та крену, доцільно використовувати реляційну базу даних. Реляційна база даних дозволить зберігати структуровані дані, встановлювати зв'язки між даними, забезпечить виконання складних запитів, що є важливими елементами під час проведення моніторингу технічного стану споруд.

За систему управління базою даних обрано рішення від Microsoft, а саме SQL Server Management Studio. Модель бази даних можна описати формулою:

$$O \rightarrow B(o) \rightarrow C(b) \rightarrow (D(c), V(c)) \rightarrow \\ \rightarrow (T1(d, t), T2(v, t)),$$

де O – множина власників; $B(o)$ – множина споруд, які належать власнику o ; $C(b)$ – множина конструкцій в споруді b ; $D(c)$ – множина дефектів та пошкоджень у конструкції c ; $V(c)$ –

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

множина характеристик конструкції c ; $T1(d, t)$ – кількісне значення параметра дефекту d в момент часу t ; $T2(v, t)$ – кількісне значення характеристики v в момент часу t .

Ця модель взята за основу для розробки бази даних щодо моніторингу технічного стану споруд.

Результати

Реалізацію бази даних як складової частини інформаційної системи виконано мовою про-

грамування Structured Query Language (мова структурних запитів). Це дозволило створити науково обґрунтовану базу даних «Monitoring», яка передбачає поетапне внесення відомостей про технічний стан об'єкта. Це забезпечує комплексний підхід із відображення та редагування інформації бази даних споруд, що є науковою новизною дослідження.

Діаграму реалізованої бази даних засобами SQL Server Management Studio наведено на рис. 1.

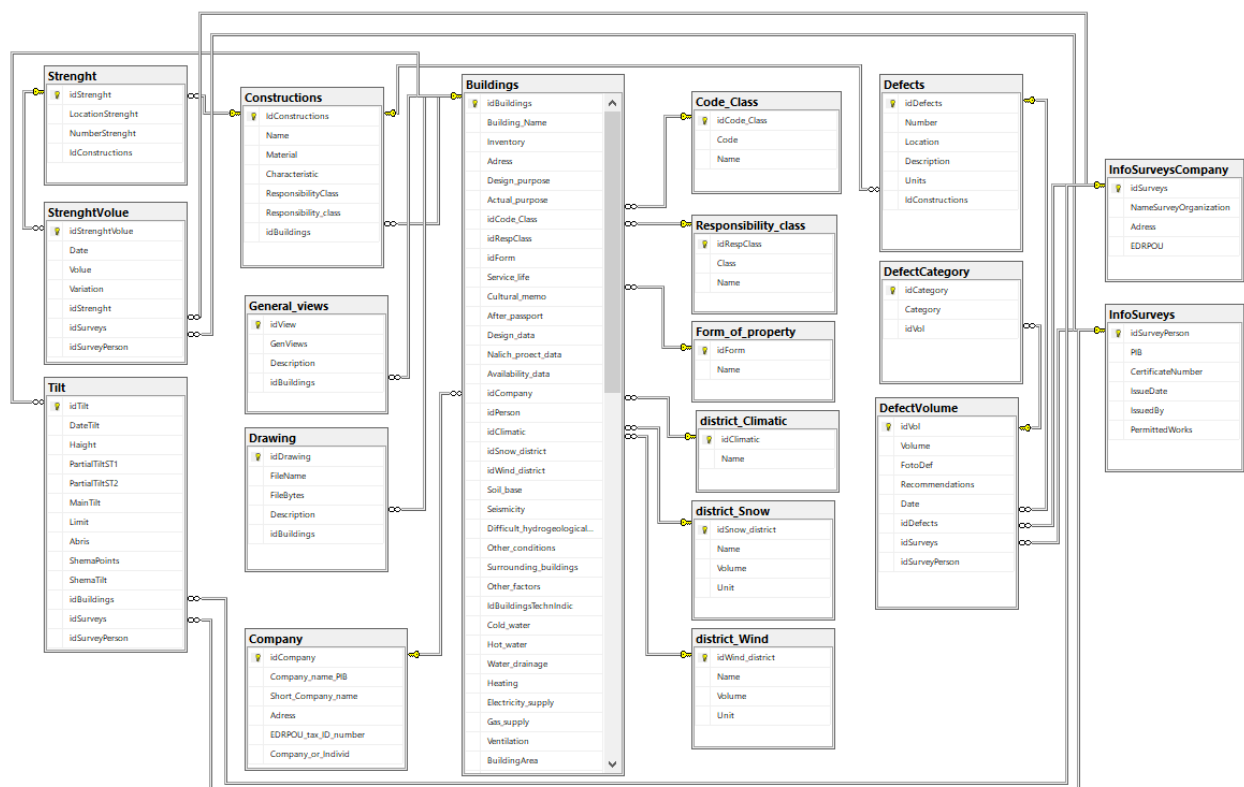


Рис. 1. Діаграма бази даних Monitoring

Fig. 1. Diagram of the Monitoring database

База даних містить такий перелік таблиць:

1. Таблиці, до яких в які інформацію вносить користувач (власник споруди; особа, відповідальна за безпечну експлуатацію, або кваліфікований експерт):

– **Company** – до таблиці вносять інформацію про власника споруди. Власниками можуть бути юридичні або фізичні особи. Відповідно як мінімально необхідну інформацію обрано прізвище, ім'я, по батькові та індивідуальний податковий номер – для фізичних осіб, і наймену-

вання, скорочене найменування (за наявності), код за ЄДРПОУ, юридичну адресу – для юридичних осіб;

– **Buildings** – таблиця містить поля для внесення загальних відомостей про об'єкти будівництва (назва, інвентарний номер, місцезнаходження, проєктне призначення, фактичне призначення, клас наслідків, код споруди, форма власності і т. под.), основних технічних показників об'єкта, характеристики внутрішніх інженерних мереж, характеристики території за-

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

будови та ускладнювальні умови території. Наведені параметри в цілому відповідають розділам III та IV форми паспорта об'єктів будівництва, затвердженої наказом [7];

– General_views – дозволяє зберігати загальні види (фотографічні матеріали) споруди та навколишньої території;

– Drawing – призначена для збереження наявних креслень та/або цифрових моделей (об'єм обмежений 2 ГБ);

– Constructions – до таблиці записують назви наявних у об'єкта конструкцій, їх стислу характеристику та категорію відповідальності;

– Defects – таблиця створена для внесення інформації про наявні дефекти та пошкодження конструкцій об'єкта. Кількісні та якісні показники дефекту або пошкодження розділені на три таблиці – Defects, DefectVolume та DefectCategory – для можливості відстеження параметрів у часі;

– DefectVolume – дозволяє зберігати інформацію про кількісні показники, фотофіксацію дефекту або пошкодження та рекомендації щодо усунення/стабілізації виявлених пошкоджень або зменшення їх впливу на технічний стан та виробничу безпеку;

– DefectCategory – зберігає інформацію про категорію технічного стану конструкції з огляду на розвиток дефекту або пошкодження;

– InfoSurveysCompany і InfoSurveys – таблиці, до яких записують інформацію про організацію, яка проводила обстеження, та відповідального виконавця (експерта) відповідно. До таблиці InfoSurveysCompany вносять назву організації, адресу та код за ЄДРПОУ. До таблиці InfoSurveys вносять прізвище, ім'я, по батькові, інформацію щодо кваліфікаційного сертифіката (номер, коли та ким виданий, а також перелік робіт (послуг), спроможність виконання яких визначено кваліфікаційним сертифікатом). Інформацію з цих таблиць використовують під час заповнення таблиці DefectVolume, вона допомагає відстежити, хто та коли виявив дефект або уточнив його кількісні показники;

– Strenght – зберігає інформацію про номер вимірювання та знаходження місця визначення міцності конкретної будівельної конструкції;

– StrenghtVolue – таблиця, яка пов'язана з таблицею Strenght та дозволяє зберігати дату,

кількісний показник та коефіцієнт варіації для кожного виміру міцності в різні періоди часу;

– Tilt – дозволяє зберігати інформацію про крен споруди.

2. Таблиці, які містять нормативні значення та які заповнені на етапі створення бази даних:

– Form_of_property – містить перелік форм власності згідно зі статтями 325–327 Цивільного кодексу України [8] (рис. 2);

idForm	Name
1	Державна форма власності
2	Комунальна форма власності
3	Приватна форма власності

Рис. 2. Заповнена таблиця Form_of_property

Fig. 2. Filled Form_of_property table

– Responsibility_class – містить перелік класів наслідків (відповідальності) згідно з ДБН В.1.2–14:2018 [1] (рис. 3);

idRespClass	Class	Name
1	CC1	Незначні наслідки
2	CC2	Середні наслідки
3	CC3	Значні наслідки

Рис. 3. Заповнена таблиця Responsibility_class

Fig. 3. Filled Responsibility_class table

– Code_Class – таблиця містить класифікацію споруд згідно з НК 018:2023 [5] (рис. 4);

idCode_Class	Code	Name
34	2213	Магістральні лінії електронних комунікаційних ме...
35	2214	Магістральні лінії електропередачі
36	2221	Місцеві трубопроводи газопостачання
37	2222	Місцеві трубопроводи водопостачання
38	2223	Споруди електростанцій
39	2224	Місцеві лінії електронних комунікаційних мереж т...
40	2301	Споруди гірничодобувні
41	2302	Споруди електростанцій
42	2303	Споруди підприємств хімічної промисловості
43	2304	Споруди підприємств промисловості не класифіковані

Рис. 4. Фрагмент заповненої таблиці Code_Class

Fig. 4. Fragment of the filled Code_Class table

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

– District_Climatic – містить перелік кліматичних районів України згідно з ДСТУ–Н Б В.1.1–27:2010 [4] (рис. 5);

	idClimatic	Name
1	1	Район I - Північно-західний
2	2	Район II - Південно-східний
3	3	Район IIIa - Карпатський
4	4	Район IIIб - Закарпатський
5	5	Район IV - Південний берег Криму
6	6	Район V - Кримські гори

Рис. 5. Заповнена таблиця District_Climatic

Fig. 5. Filled District_Climatic table

– District_Snow – містять перелік снігових районів України згідно з ДБН В.1.2–2:2006 [2] (рис. 6);

	idSnow_district	Name	Volume	Unit
1	1	1 район	800	Па
2	2	2 район	1000	Па
3	3	3 район	1200	Па
4	4	4 район	1400	Па
5	5	5 район	1600	Па
6	6	6 район	1800	Па

Рис. 6. Заповнена таблиця District_Snow

Fig. 6 Filled District_Snow table

– District_Wind – містять перелік вітрових районів України згідно з ДБН В.1.2–2:2006 [2] (рис. 7).

	idWind_district	Name	Volume	Unit
1	1	1 район	400	Па
2	2	2 район	450	Па
3	3	3 район	500	Па
4	4	4 район	550	Па
5	5	5 район	600	Па

Рис. 7. Заповнена таблиця District_Wind

Fig. 7. Filled District_Wind table

Таблиці, наведені в пункті 1, будуть заповнювати користувачі в міру появи інформації, і база буде наповнюватися інформацією про власників, споруди та технічний стан конструкцій.

Інформацію з таблиць, заповнених на етапі створення бази даних, використовує користувач для заповнення окремих пунктів таблиці Buildings за допомогою зовнішніх ключів. За такого підходу унеможливується введення користувачем значень, які не відповідають нормативним та законодавчим документам. Розроблений підхід забезпечує оптимізацію бази даних, оскільки в таблицях, які заповнює користувач, зберігатиметься тільки зовнішній ключ, а не ціле значення.

Наукова новизна та практична значимість

Запропонована база даних структурує та інтегрує різні типи даних, пов'язаних із технічним станом споруд, у єдиний інформаційний простір. Використання реляційних структур даних, специфічних для цього контексту, відображає науково обгрунтований підхід до організації інформації в галузі безпеки експлуатації будівельних конструкцій та споруд у цілому. Практична реалізація запропонованої бази даних сприятиме підвищенню безпеки експлуатації, ефективності управління та обслуговування споруд.

Висновки

У результаті дослідження встановлено, що найбільш доцільним є використання реляційної бази даних. Як систему управління базою даних вибрано рішення Microsoft SQL Server Management Studio, за допомогою якого створено базу даних «Monitoring». Створена база даних містить 19 взаємопов'язаних таблиць, із яких шість заповнені нормативно та законодавчо визначеними значеннями і термінами, що унеможливить уведення недостовірної інформації користувачами. Тринадцять таблиць будуть заповнювати користувачі (власники споруд, відповідальні виконавці за безпечну експлуатацію або кваліфіковані експерти) в міру накопичення інформації, пов'язаної з моніторингом технічного стану будівельних конструкцій та елементів. У подальшому необхідно створити прикладну програму для внесення, редагування та оновлення інформації в базі даних користувачами, які не володіють мовою структурних запитів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ДБН В.1.2-14:2018 Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель і споруд. Зі Зміною № 1. [Чинний від 2022-09-01]. Київ : Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 2018. 30 с.
2. ДБН В.1.2-2:2006 Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Навантаження і впливи. Норми проектування. Зі Зміною № 1. [Чинний від 2007-01-01]. Київ : Міністерство регіонального розвитку та будівництва України, 2006. 77 с.
3. ДСТУ ISO/IEC 2382-15:2017 (ISO/IEC 2382:2015, IDT). Інформаційні технології. Словник термінів. [Чинний від 2019-01-01]. Київ : ДП «Український науково-дослідний і навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації та якості», 2017. 464 с.
4. ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010 Захист від небезпечних геологічних процесів, шкідливих експлуатаційних впливів, від пожежі. Будівельна кліматологія. [Чинний від 2011-11-01]. Київ : Міністерство регіонального розвитку та будівництва України, 2011. 127 с.
5. НК 018:2023 Класифікатор будівель і споруд. [Чинний від 2024-01-01]. Київ : Міністерство регіонального розвитку та будівництва України, 2023. 17 с.
6. Попруга Д. В., Валовой О. І. Проблеми моніторингу технічного стану будівель і споруд. *Вісник Криворізького національного університету*. 2013. Вип. 34. С. 186–190.
7. Про затвердження форми паспорта об'єкта будівництва. Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України. 2017.
URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1460-17#Text>
8. Цивільний кодекс України. Київ. URL: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/435-15>
9. Li X., Liyu L., Lu W., Xue S., Hong C., Lan W., Shi Q. Structural health monitoring of a historic building during uplifting process: system design and data analysis. *Structural Health Monitoring*. 2023. Vol. 22. Iss. 5. P. 3165–3188. DOI: <https://doi.org/10.1177/14759217221135351>
10. Nielsen J. S. Value of information of structural health monitoring with temporally dependent observations. *Structural Health Monitoring*, 2021. Vol. 21. Iss. 1. P. 165–184.
DOI: <https://doi.org/10.1177/14759217211030605>
11. Zhu, Y.-F., Ren W.-X., Wang Y.-F. Structural health monitoring on Yangluo Yangtze River Bridge: Implementation and demonstration. *Advances in Structural Engineering*. 2022. Vol. 25. Iss. 7. P. 1431–1448.
DOI: <https://doi.org/10.1177/13694332211069508>

S. V. BOGACHENKO¹, S. V. SHATOV^{2*}

¹Department «Technologies of construction production», Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, Architect Oleg Petrov St., 24a, Dnipro, Ukraine, 49600, tel. +38 (056) 756 34 76, e-mail bohachenko.serhii@pdaba.edu.ua, ORCID 0000-0003-4787-8737

^{2*}Department «Construction and road vehicles», Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, Architect Oleg Petrov St., 24a, Dnipro, Ukraine, 49600, tel. 38 (056) 756 33 73, e-mail shatov.serhii@pdaba.edu.ua, ORCID 0000-0002-1697-2547

Database for Monitoring the Technical Condition of Structures as an Integral Part of Industrial Safety

Purpose. The authors envisage the development of a database designed to systematize and store information on the technical condition of industrial structures based on the results of periodic visual and instrumental inspections. **Methodology.** The information system includes a database, a database management system, and an application program. When choosing the type of database for monitoring the technical condition of structures, the use of a relational structure is most appropriate. The database model covers the owners of the structure, constructions, quantitative and qualitative parameters of defects and damages, strength indicators of building structures and rolls of industrial structures. **Findings.** In the process of developing a database for monitoring the technical condition of industrial buildings, the language of structural queries was used. The created Monitoring database contains interconnected tables that provide holistic and efficient storage of information. The tables are linked using foreign keys, which provides easy access and data management. Tables are conditionally divided into those filled in by users and those

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

filled in in accordance with legal and regulatory documents at the stage of database creation. This approach to building a database ensures structured storage of information on the technical condition of buildings in accordance with regulations and legislation. The integration of user-filled and pre-filled tables creates a system that increases the efficiency of monitoring the technical condition of industrial facilities. **Originality.** The proposed database reflects an innovative approach to structuring and integrating different types of data related to the technical condition of industrial facilities. The system offers an effective combination of data of different formats and sources into a single. **Practical value.** The results of the work will contribute to the efficiency of maintenance of industrial structures and operational safety, provide tools for storing the results of monitoring the condition of building structures.

Keywords: industrial safety; assessment of technical condition; monitoring of technical condition; operation of structures; information systems; database

REFERENCES

1. *Systema zabezpechennia nadiinosti ta bezpeky budivelnnykh ob'ektiv. Navantazhennia i vplyvy. Normy proektuvannia. Zi Zminoiu No 1, 77 DBN V.1.2-2:2006* (2006). (in Ukrainian)
2. *Systema zabezpechennia nadiinosti ta bezpeky budivelnnykh ob'ektiv. Zahalni pryntsypy zabezpechennia nadiinosti ta konstruktyvnoi bezpeky budivel i sporud. Zi Zminoiu No 1,30 DBN V.1.2-14:2018* (2018). (in Ukrainian)
3. *Zakhyst vid nebezpechnykh heolohichnykh protsesiv, shkidlyvykh ekspluatatsiinykh vplyviv, vid pozhezhi. Budivselna klimatolohiia, 127 DSTU-N B V.1.1-27:2010.* (2011). (in Ukrainian)
4. *Informatsiini tekhnolohii. Slovyk terminiv, 464 DSTU ISO/IEC 2382-15:2017 (ISO/IEC 2382:2015, IDT).* (2017). (in Ukrainian)
5. *Klasyfikator budivel i sporud, 17 NK 018:2023* (2023). (in Ukrainian)
6. Popruga, D. V., & Valovoi, O. I. (2013). Problems of monitoring the technical condition of buildings and structures. *Visnyk Kryvori-zkogho nacional'nogho universytetu*, 34, 186-190. (in Ukrainian)
7. *Pro zatverdzhennia formy pasporta ob'ekta budivnytstva.* Ministerstvo rehionalnoho rozvytku, budivnytstva ta zhytlovo-komunalnoho hospodarstva Ukrainy. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1460-17#Text> (in Ukrainian)
8. *Tsyvilnyi kodeks Ukrainy.* Kyiv. Retrieved from <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/435-15> (in Ukrainian)
9. Li, X., Xie, L., Lu, W., Xue, S., Hong, C., Lan, W., & Shi, Q. (2023). Structural health monitoring of a historic building during uplifting process: system design and data analysis. *Structural Health Monitoring*, 22(5), 3165-3188. DOI: <https://doi.org/10.1177/14759217221135351> (in English)
10. Nielsen, J. S. (2021). Value of information of structural health monitoring with temporally dependent observations. *Structural Health Monitoring*, 21(1), 165-184. DOI: <https://doi.org/10.1177/14759217211030605> (in English)
11. Zhu, Y.-F., Ren, W.-X., & Wang, Y.-F. (2022). Structural health monitoring on Yangluo Yangtze River Bridge: Implementation and demonstration. *Advances in Structural Engineering*, 25(7), 1431-1448. DOI: <https://doi.org/10.1177/13694332211069508> (in English)

Надійшла до редколегії: 27.11.2023

Прийнята до друку: 26.03.2024

УДК 355.7-049.65:614.841-027.274

В. В. ОНІЩЕНКО^{1*}, С. М. СУХАЙ^{2*}

^{1*}Державна спеціальна служба транспорту, вул. Якова Гніздовського, 5, Київ, Україна, 02094, тел. +38 (063) 212 54 01, ел. пошта jvbotyrj988@gmail.com, ORCID 0009-0004-9347-6821

^{2*}Каф. військової підготовки спеціалістів Державної спеціальної служби транспорту, Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (063) 838 65 63, ел. пошта suhays@i.ua, ORCID 0009-0000-2539-6839

Особливості організаційних і технічних заходів щодо підвищення рівня живучості і вибухопожежобезпеки потенційно небезпечних об'єктів

Мета. Робота спрямована на дослідження особливостей організаційних і технічних заходів підвищення рівня вибухопожежобезпеки потенційно небезпечних об'єктів. **Методика.** Для досягнення поставленої мети: 1) проведено дослідження з визначення можливих небезпек та ризиків на потенційно небезпечних об'єктах; 2) проаналізовано практичні організаційні і технічні заходи щодо підвищення рівня вибухопожежобезпеки небезпечних об'єктів; 3) оцінено склад і можливості системи раннього виявлення загрози виникнення надзвичайних ситуацій та оповіщення, а також можливості реалізації цієї системи на відповідних об'єктах Збройних сил України; 4) розглянуто основні види автоматизованого сповіщення та принципи їх роботи, також проаналізовано наявні технічні рішення. **Результати.** Узагальнено особливості організаційних і технічних заходів щодо підвищення рівня вибухопожежобезпеки об'єктів зберігання засобів ураження. З'ясовано ключові етапи реалізації технологічних рішень для забезпечення живучості потенційно небезпечних об'єктів. **Наукова новизна.** Уперше проведено аналітичне обґрунтування необхідності застосування на об'єктах зберігання засобів ураження, інших потенційно небезпечних об'єктах систем моніторингу безпеки та своєчасного оповіщення про можливі надзвичайні ситуації. Розглянуто особливості конструктивно-технологічних рішень щодо підвищення рівня вибухопожежобезпеки об'єктів зберігання засобів ураження шляхом проведення організаційних та технічних заходів. **Практична значимість.** Упровадження ефективних конструктивно-технологічних рішень щодо застосування систем моніторингу безпеки та своєчасного оповіщення про можливі надзвичайні ситуації дозволить перейти від заходів локалізації збитків до прогнозу і попередження катастроф і надійного захисту об'єктів зберігання засобів ураження Збройних сил України, інших потенційно небезпечних об'єктів та об'єктів критичної інфраструктури держави.

Ключові слова: живучість; вибухопожежобезпека; потенційно небезпечні військові об'єкти; безпечне розміщення засобів ураження; декомпозиція; складна технічна система; системи моніторингу безпеки та своєчасного оповіщення

Вступ

Живучість системи (об'єкта) в умовах війни – це здатність цієї системи виживати і продовжувати виконувати свої функції, незважаючи на негативний вплив воєнних дій, природних катастроф, технічних ушкоджень та інших викликів. Характерною рисою живучості системи (об'єкта) є її здатність відновлюватися, адаптуватися до змінних умов та продовжувати функціонувати з ефективністю згідно зі своїм призначенням [18]. Відповідно до вказаних характеристик живучості об'єктів підвищеної безпеки, саме забезпечення їх засобами постійного й оперативного технічного контролю є одним із ключових у здатності системи продовжувати функціонувати з ефективністю за призначенням.

Стан живучості об'єктів зберігання засобів ураження Збройних сил України значно впливає на боєздатність військ, а в разі виведення цих об'єктів зі сталого стану функціонування становить реальну загрозу населенню та національній економіці.

У теперішній воєнно-політичній обстановці, в умовах ведення бойових дій виникає велика вірогідність використання агресором різноманітних актів на об'єкти критичної інфраструктури, зберігання засобів ураження, стратегічних запасів та інші потенційно небезпечні об'єкти, із метою їх повного знищення, із застосуванням ударних авіаційних безпілотних комплексів. Як наслідок виникають надзвичайні ситуації, такі як вибухи, пожежі, витоки шкідливих речовин, руйнування будівель та споруд, що можуть при-

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

звести до людських втрат, знищення відповідних запасів, включаючи засоби ураження.

До того ж практика свідчить що недостатня реалізація заходів із живучості, охорони та захисту потенційно небезпечних об'єктів, разом із низьким рівнем підготовки відповідних фахівців, є факторами, які, безумовно, можуть спричинити надзвичайні ситуації (НС). Ці ситуації загрожують життю людей, призводять до втрат, знищення військового потенціалу та значних матеріальних збитків. З іншого боку, відсутність повної інтеграції до загальнодержавної системи автоматизованого оповіщення й центрального виклику, а також недоліки в цьому процесі, зокрема недостатність сучасних (цифрових багатофункційних) систем раннього виявлення загрози на військових об'єктах із підвищеним рівнем небезпеки, суттєво ускладнюють ефективну реакцію на потенційні кризові ситуації. Такі недоліки збільшують ризик серйозних наслідків у випадку виникнення небезпечних обставин на вказаних об'єктах з різних причин.

Зважаючи на зазначені фактори, важливо враховувати особливості функціонування зазначених об'єктів в умовах війни. Це, у свою чергу, вимагає проведення планування та реалізації невідкладних заходів із всебічного захисту об'єктів для підвищення рівня їх живучості та вибухопожежобезпеки.

Отже, сьогодні важливо проводити постійну попереджувальну роботу та впроваджувати комплексну систему раннього виявлення загроз, пов'язаних із можливими воєнними діями, а також виникненням надзвичайних ситуацій. Забезпечення ефективної передачі інформації на регіональному рівні є ключовим елементом для своєчасного реагування на надзвичайні ситуації та інші виклики і загрози.

Мета

Основна мета цієї статті полягає в огляді особливостей організаційних і технічних заходів, спрямованих на підвищення рівня живучості та вибухопожежобезпеки потенційно небезпечних об'єктів, аналізі сучасних підходів і технологій, спрямованих на впровадження комплексних систем раннього виявлення надзвичайних ситуацій на потенційно небезпечних об'єктах, до яких належать і місця зберігання засобів ураження Збройних сил України. Ці системи запобігають

виникненню надзвичайних ситуацій та екологічних катастроф на об'єктах. У разі настання таких ситуацій їх головною метою є мінімізація ризиків руйнування, втрати життів та інших негативних наслідків. У контексті визначеної мети слід розглянути застосування систем моніторингу джерел небезпеки, що передбачає перехід від заходів локалізації збитків до прогнозу і попередження катастроф та надійного захисту об'єктів зберігання засобів ураження Збройних сил України, інших потенційно небезпечних об'єктів критичної інфраструктури держави, а також висвітлити найефективніші стратегії для гарантування безпеки цих об'єктах.

Методика

Дослідження особливостей організаційних і технічних заходів щодо підвищення рівня живучості і вибухопожежобезпеки потенційно небезпечних об'єктів, у тому числі військових (арсеналів, баз, складів), передбачає комплексний аналіз факторів, які впливають на ефективність попереджувальної роботи, а також реалізації на відповідних об'єктах системи раннього виявлення загрози виникнення надзвичайних ситуацій. Основними етапами дослідження є такі:

- визначення сучасного рівня вибухопожежобезпеки на потенційно небезпечних об'єктах;
- оцінка дієвості застосовуваних організаційних і технічних заходів;
- визначення основних ризикових факторів та їх взаємодії на об'єкті;
- класифікація потенційних загроз з урахуванням їхнього впливу на вибухопожежобезпеку;
- аналіз роботи технічних систем, спрямованих на запобігання вибухів та пожеж;
- визначення прогалів та можливостей для вдосконалення технічних засобів;
- вивчення систем управління вибухопожежобезпекою на підприємстві;
- оцінка дії стандартів, інструкцій та процедур у сфері безпеки;
- оцінка ефективності нових технологій та матеріалів у контрольованих умовах;
- формулювання конкретних рекомендацій з удосконалення організаційних і технічних заходів.

Ця методика досліджень дозволяє систематично та комплексно вивчати особливості заходів для подальшого вдосконалення систем безпеки на потенційно небезпечних об'єктах.

Результати

Відповідно до поглядів авторів, для підтримання живучості, вибухопожежобезпеки на арсеналах, базах, складах ракет і боєприпасів Збройних сил України, інших потенційно небезпечних об'єктах держави потрібно, безумовно, впроваджувати такі системні організаційно-профілактичні заходи:

- розосередження відповідних запасів у найбільш захищені сховища (місця зберігання);
- проведення технічних, технологічних, інших дій, спрямованих на попередження виникнення можливих екстремальних ситуацій і недопущення людських та матеріальних втрат;
- вдосконалення системи детекції та реагування на загрози;
- застосування інноваційних матеріалів, що зменшують ризик поширення вогню та об'єму вибуху;
- спеціальна підготовка особового складу об'єктів до роботи в екстремальних умовах, забезпечення його засобами охорони і захисту, спеціальною технікою та спорядженням, системами захисту від безпілотних літальних апаратів (БПЛА);
- уведення до штатної структури арсеналів, баз та складів ракет і боєприпасів (далі АБС) Збройних сил України підрозділів протиповітряної оборони й радіоелектронної боротьби (РЕБ) [1, 3].

Актуальність проблеми живучості та вибухопожежобезпеки об'єктів зберігання засобів ураження Збройних сил України та інших потенційно небезпечних об'єктів, які можуть становити загрозу для населення і території, викликає необхідність у глибокій модернізації діючих систем контролю за технічними об'єктами, а також у створенні комплексної автоматизованої системи моніторингу джерел безпеки і раннього виявлення загрози виникнення надзвичайних ситуацій, пов'язаних із військовими діями, людським фактором або природними явищами та катаклізмами на зазначених об'єктах.

У цьому контексті актуальним є не лише створення та застосування системи раннього виявлення і протидії техногенним загрозам на потенційно небезпечних військових об'єктах, але й інтеграція цієї системи до загальнодержавної та регіональної в межах Єдиної державної системи цивільного захисту.

Створення й інтеграція сучасних систем моніторингу джерел безпеки на АБС та інших потенційно небезпечних військових об'єктах до Єдиної державної системи цивільного захисту є ключовим кроком, що передбачає перехід від заходів локалізації збитків до прогнозу та попередження катастроф.

У зв'язку з порушеною проблематикою розглянемо основні аспекти систем раннього виявлення загрози виникнення надзвичайних ситуацій та моніторингу джерел безпеки, а також їх потенційні переваги для ефективного прогнозу та попередження катастроф, включаючи ті, що можуть трапитися на АБС.

Системи прогнозу та попередження надзвичайних ситуацій, катастроф містять різноманітні технічні та наукові методи, спрямовані на передбачення небезпек та мінімізацію їх наслідків. Розглянемо декілька ключових аспектів цих засобів:

1. Системи раннього виявлення та протидії техногенним загрозам передбачають:

- використання сучасних технологій для виявлення можливих надзвичайних ситуацій, катастроф на потенційно небезпечних об'єктах, пов'язаних у тому числі з воєнними діями;
- розвиток систем автоматизованого контролю за технічними об'єктами збереження засобів ураження, небезпечних речовин (ракетного палива), радіоактивних матеріалів та іншими аспектами безпеки.

2. Технології штучного інтелекту та аналізу даних спрямовані на використання алгоритмів машинного навчання для аналізу великих обсягів даних та виявлення патернів, що можуть передбачати кризові ситуації на об'єктах та навколо них.

3. Евакуаційні та рятувальні заходи передбачають розвиток планів евакуації та ефективних систем для надання допомоги та проведення рятувальних дій у разі надзвичайних ситуацій, катастроф.

4. *Захист, оборона об'єктів АБС.*

Ці засоби працюють у взаємодії для максимально ефективного прогнозування, попередження та управління небезпеками на потенційно небезпечних об'єктах національної економіки, і з такою ж ефективністю можуть працювати на арсеналах, базах і складах Збройних сил України.

Необхідно зазначити, що ідея впровадження систем раннього виявлення надзвичайних ситуацій, катастроф та моніторингу джерел небезпеки базується на необхідності постійного оперативного визначення потенційних загроз і ефективного контролю на потенційно небезпечних об'єктах. Головне їх призначення – раннє виявлення, моніторинг небезпеки та своєчасне оповіщення про можливі надзвичайні ситуації на об'єктах.

У разі запровадження вказаних систем на військових об'єктах збереження засобів ураження й інтеграції до їх Єдиної державної системи цивільного захисту будуть створені технічні умови, які дозволять вийти з будь-якої надзвичайної ситуації з найменшими втратами або ж взагалі їх уникнути.

Маємо підкреслити, що застосування системи раннього виявлення надзвичайних ситуацій, моніторингу джерел небезпеки на потенційно небезпечних військових об'єктах є важливим елементом національної безпеки для багатьох країн, включаючи ті, що є членами НАТО. Результати досліджень свідчать, що загальні принципи і тенденції, які використовують в організаційних і технічних заходах для підвищення рівня живучості та вибухопожежобезпеки на потенційно небезпечних об'єктах, у тому числі на військових об'єктах держав – членів НАТО, складають єдину систему раннього виявлення надзвичайних ситуацій і відповідають пріоритетам і державним вимогам у галузі безпеки. Основними з них є:

Стандарти та нормативи. Країни – члени НАТО постійно дотримуються міжнародних стандартів та нормативів у галузі безпеки, включаючи ті, що стосуються вибухопожежобезпеки та живучості об'єктів, зокрема військових.

2. Використання сучасних систем раннього виявлення загроз та інтегрованих систем моніторингу для швидкого виявлення потенційних небезпек.

3. Застосування передових технологій для забезпечення ефективної реакції та попередження аварій, таких як системи штучного інтелекту, датчики та аналітичні засоби.

4. Проведення регулярних тренувань та симуляцій, щоб перевірити готовність персоналу до дій у надзвичайних ситуаціях.

5. Упровадження систем інтеграції та координації для забезпечення спільної реакції в разі надзвичайних ситуацій.

6. Особливу увагу приділяють заходам із забезпечення захисту критичної інфраструктури, зокрема енергетичних об'єктів, важливих комунікацій, транспортних систем, військових об'єктів.

7. Співпраця та обмін досвідом.

Отже, на думку авторів, забезпечення безпеки та захисту АБС, а також інших небезпечних об'єктів повинно базуватися на вивченні та застосуванні досвіду країн – членів НАТО, моніторингу джерел небезпеки комплексному використанні сучасних систем раннього виявлення надзвичайних ситуацій та автоматизованих систем раннього виявлення надзвичайних ситуацій та оповіщення (далі – СРВНСО; АСРВО), які успішно працюють на потенційно небезпечних об'єктах національної економіки держави навіть під час воєнного стану.

У контексті вирішення завдання дослідження розглянемо призначення, основні складові АСРВО, а також її переваги над іншими системами виявлення надзвичайних ситуацій.

Автоматизовану систему раннього виявлення загрози виникнення надзвичайних ситуацій та оповіщення персоналу (особового складу об'єкта) впроваджують для виявлення ознак загрози на об'єкті шляхом контролю значень параметрів джерел первинної інформації та визначення можливих сценаріїв її розвитку, а також у разі необхідності оповіщення працівників та керівників об'єкту, відповідальних за стан техногенної безпеки, посадових осіб відповідного командування Збройних сил України, відповідних органів виконавчої влади та місцевого самоврядування і населення. Склад та наповнення СРВНСО може бути різним і залежить від її технологічного призначення, але обов'язково повинен відповідати вимогам відповідних Державних будівельних норм (далі ДБН), іншим нормативним і законодавчим актам у цій сфері.

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

З метою вивчення складу і можливостей системи розглянемо варіант загальної, типової ідеології побудови і роботи СРВНСО (рис. 1).

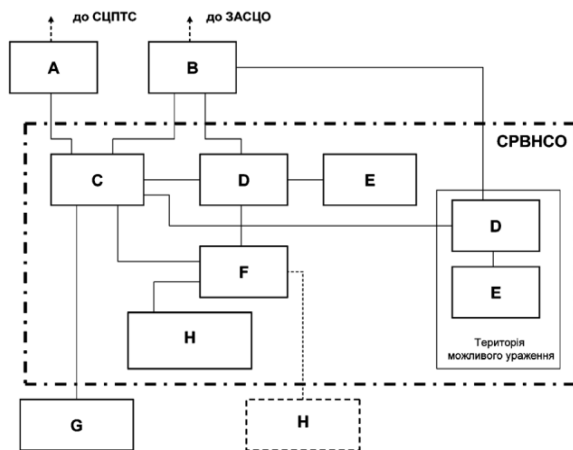


Рис. 1. Структурна схема СРВНСО:

СЦПТС – система централізованого пожежного та техногенного спостереження;

ЗАСЦО – загальнодержавна автоматизована система централізованого оповіщення;

A – ПЦС – пульт централізованого спостереження;

B – ТАСЦО – територіальна автоматизована система централізованого оповіщення;

C – ПК – пульт керування СРВНСО;

D – ПО – пристрій оповіщення;

E – КТЗІО – кінцеві технічні засоби інформування та оповіщення;

F – КП – комунікаційний пристрій;

H – джерела первинної інформації;

G – суміжні системи гарантування безпеки

Fig. 1. Block diagram of the SEDEW:

SCFMO – system of centralized fire and man-made observation;

NACAS – nationwide automated centralized alert system;

A – CMS – centralized monitoring station;

B – TASCOS – territorial automated system of centralized warning;

C – CP – control panel of the SRVNSO;

D – WD – warning device;

E – TTMIW – terminal technical means of information and warning;

F – CP – communication device;

H – sources of primary information;

G – related safety assurance systems

АСРВО повинна виконувати з необхідною надійністю, оперативністю, точністю, достовірністю та рівнем автоматизації такі функції:

а) безперервно автоматично вимірювати поточні значення параметрів джерел техногенної та/або природної небезпеки на об'єкті, а в разі

задання додаткових функцій навколо об'єкта – на завданнях відстанях;

б) контролювати в реальному вимірі часу відповідність поточних (граничних) значень параметрів стану об'єкта (об'єктів) проєктним технологічним режимам;

в) автоматично й оперативно інформувати персонал, осіб відповідальних за функціонування об'єкта і технологічного обладнання на ньому, а також посадових осіб, які відповідають за стан техногенної безпеки на об'єкті, щодо фактів досягнення докритичних та критичних значень контрольованих параметрів;

г) у випадках, які передбачені технічним завданням на проєктування АСРВО, у тому числі в разі спрацювання ручних сповіщувачів, автоматично вмикати зональне оповіщення персоналу, що працює на об'єкті, де зафіксовані ознаки виникнення аварійної ситуації;

д) автоматично передавати на пульт керування системою та до адміністрації об'єкта інформацію щодо факту досягнення критичних або докритичних значень контрольованих параметрів, а також щодо спрацювання ручних сповіщувачів із фіксацією в архівному журналі дати і часу надходження цієї інформації та підтвердження оператором її отримання;

е) автоматично діагностувати працездатність основних складових системи;

є) автоматично контролювати канали зв'язку та стан електроживлення;

ж) за командою оператора пульта керування чи автоматично (у разі відсутності реагування оператора на інформацію щодо факту досягнення критичних значень контрольованих параметрів або спрацювання ручних сповіщувачів формувати сповіщення для передавання до АСЦС щодо виявлення загрози виникнення або виникнення НС разом з ідентифікатором формалізованого в електронних картках аварії прогнозованого сценарію розвитку цієї ситуації (у разі відсутності реагування оператора – відповідного найгіршого сценарію розвитку НС), а також з ідентифікатором картки ПНО, яка містить дані з паспорта об'єкта з Державного реєстру ПНО;

з) оповіщати керівників та працівників ПНО, чергових служб територіальних органів управління та сил цивільного захисту;

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

и) оповіщати відповідальних посадових осіб підприємств, установ і організацій, що розташовані в зоні можливого ураження, а також населення, що проживає або знаходиться в прогнозованих зонах ураження (здійснюється виключно за командою оператора пульта) [2, 8, 18].

Варто зазначити, що ефективна робота системи раннього виявлення загроз виникнення надзвичайних ситуацій та оповіщення базується на можливостях виявляти потенційні небезпеки як на окремих ділянках небезпечних об'єктів, так і загалом на об'єкті, а за необхідності і навколо об'єкта. Вказані функціональні можливості системи досягаються шляхом автоматичного контролю параметрів джерел і факторів небезпеки з реєстрацією фактів перевищення граничних (докритичних та критичних) значень, що свідчать про загрозу виникнення надзвичайної ситуації.

Первинною (вихідною) інформацією для виявлення ознак загрози виникнення надзвичайних ситуацій та визначення можливих сценаріїв її розвитку є дані джерел первинної інформації (далі ДПІ).

Центральною підсистемою СРВНСО є її моноблоки, до яких входять такі пристрої: комунікаційний пристрій, пульт керування зональним оповіщенням, пристрій оповіщення та ін. На передбачені в моноблоці пульта керування надходять дані про всі виявлені збої, граничні значення і параметри, які що контролюють оператори (диспетчери) СРВНСО.

У свою чергу відповідно пульт СРВНСО інформує паралельно з оператором відповідальних осіб щодо досягнення граничних значень контрольованих параметрів, а також:

- відображає на екрані пульта план (схему) з місцем розташування відповідного ДПІ та одночасно має можливість відтворювати тривожний звуковий сигнал (через трансляційну мережу);

- у зручному вигляді на моніторі показує основні контрольовані показники СРВНСО, у вигляді індикаторів та у вигляді структурної схеми та інтерактивної карти;

- відображає список посадових осіб, яких сповіщають про НС, процес та результати їх оповіщення;

- здійснює інформаційну підтримку дій оператора (диспетчера) у разі наявності на пульті загрози виникнення НС, відображаючи при цьому

відповідні картки аварії, які визначають на підставі отриманих від ДПІ даних та необхідної додаткової інформації;

- автоматично формує (у разі відсутності реагування оператора (диспетчера) на сигнали про досягнення критичних значень параметрів або спрацювання ручних сповіщувачів) та передає до пульта централізованого спостереження (далі ПЦС (ПТО)) відповідне сповіщення разом з ідентифікаторами картки ПНО та картки аварії за найгіршим сценарієм розвитку НС;

- реєструє в архівному журналі інформацію, що надходить від складових системи та щодо дій оператора (диспетчера) із зазначенням дати та часу реєстрації;

- контролює працездатність складових каналів зв'язку, КП та інформує диспетчера в разі відсутності зв'язку з будь-яким компонентом протягом певного часу;

- проводить запуск за командою оператора системи оповіщення, установок локалізації/ліквідації НС або інших зовнішніх приладів. У разі перевищення граничних значень сигналів первинних джерел інформації автоматично активує відкладений старт системи оповіщення, таким чином в оператора (диспетчера) пульта керування СРВНСО є час прийняти рішення (негайно запустити систему оповіщення або відмінити запуск тривоги). У разі відсутності своєчасного реагування оператора пульта на режим відкладеного старту оповіщення система оповіщення запускається автоматично максимально через 240 с [4, 5, 12, 13].

Для своєчасного оповіщення, інформування персоналу про надзвичайні ситуації на об'єкті або їх загрозу створюється трансляційна мережа з кінцевими технічними засобами оповіщення, що дозволяє передавати заздалегідь записані мовні повідомлення та безпосередньо мікрофонні повідомлення відповідальної особи.

Оповіщення керівного складу об'єкта про загрозу або виникнення надзвичайних ситуацій здійснюється автоматизовано за каналами зв'язку (смс-повідомлення, голосові дзвінки, електронна пошта). У разі НС модуль повідомлень транслює (дзвонить) відповідальним особам залежно від типу аварії відповідне повідомлення та проводить реєстрацію результатів оповіщення (підтвердження респондентами факту прийому мовних повідомлень).

Передача службових і тривожних сповіщень від СРВНСО до пульта відбувається через інтернет з різною системою захисту, наприклад, криптографічний протокол SSL/TLS, асиметричне шифрування RSA з відкритим ключем.

Наукова новизна та практична значимість

Автори роботи вперше дослідили деякі нетипові конструктивно-технологічні рішення можливого застосування комплексних систем раннього виявлення надзвичайних ситуацій на потенційно небезпечних об'єктах, до яких належать місця зберігання засобів ураження Збройних сил України.

Застосування таких конструктивно-технологічних рішень дозволить перейти від заходів локалізації збитків до прогнозу й попередження катастроф і надійного захисту об'єктів зберігання засобів ураження Збройних Сил України, інших потенційно небезпечних об'єктів критичної інфраструктури держави.

Висновки

Питання забезпечення живучості, безпеки і захисту об'єктів зберігання засобів ураження Збройних сил України, інших потенційно небезпечних об'єктів держави повинні ґрунтуватися на комплексному використанні сучасних технічних засобів охорони, засобів пожежної сигналізації, автоматичного пожежогасіння, нових типів зв'язку і своєчасного реагування на загрозу можливих надзвичайних ситуацій на вказаних об'єктах.

Упровадження систем раннього виявлення загроз надзвичайних ситуацій на АБС Збройних сил України, інтеграція їх до Єдиної державної системи цивільного захисту дасть змогу значно поліпшити стан вибухопожежобезпеки та не допустити виникнення надзвичайних ситуацій на потенційно небезпечних об'єктах Збройних сил України, інших об'єктах критичної інфраструктури держави, а також створити необхідні умови для безпеки військовослужбовців, працівників Збройних сил України та цивільного населення.

Таким чином, одним із найбільш ефективних напрямів зниження ризиків виникнення надзвичайних ситуацій техногенного характеру є всебічний контроль, проведення профілактичних заходів, упровадження в Збройних сил систем

раннього виявлення надзвичайних ситуацій на основі широкого використання автоматизованих і комп'ютерних засобів із залученням їх до Єдиної державної системи цивільного захисту. Крім того, для ефективного забезпечення живучості, охорони та захисту потенційно небезпечних військових об'єктів (АБС) слід вжити такі додаткові заходи:

- аналіз та ідентифікація потенційних загроз;
- оцінка можливих ризиків для військових об'єктів;
- визначення потенційних сценаріїв атак та надзвичайних ситуацій;
- розробка та впровадження системи живучості;
- розробка планів дій у разі різних загроз;
- забезпечення незалежності та автономності військових об'єктів;
- упровадження технологій, що забезпечують збереження функціональності під час атак та аварій.

Упровадження система моніторингу та реагування передбачає встановлення ефективної системи виявлення атак та порушень безпеки, розробку систем автоматизованого моніторингу стану об'єктів і реагування на виявлені загрози.

Для підвищення безпеки та захисту потрібно забезпечити фізичну та кібернетичну безпеку військових об'єктів, впроваджувати заходи щодо захисту від хімічних, біологічних та радіологічних загроз.

Тренування персоналу та проведення симуляцій спрямоване на організацію регулярних тренувань із реагування на надзвичайні ситуації та проведення симуляцій атак для перевірки ефективності заходів безпеки.

Партнерство та співпраця сприяють взаємодії з іншими військовими об'єктами й організаціями для обміну досвідом та інформацією, а також передбачають співпрацю з владними та правоохоронними органами для підтримки безпеки.

Проведення систематичних аудитів безпеки для виявлення слабких місць та недоліків сприяє впровадженню колективних заходів та постійному вдосконаленню систем безпеки військових об'єктів [9, 10, 15].

Отже, проведене дослідження підтверджує, що стан живучості арсеналів, баз і складів озброєння, ракет і боєприпасів Збройних сил України значно впливає на їх боєздатність. В умовах

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

збройної агресії з боку російської федерації збереження наявного боєзапасу Збройних сил України набуло неабиякого значення.

Надзвичайні ситуації, які сталися з причини скоєння диверсійно-терористичних атак на арсенали (склади) Збройних сил України, засвідчили необхідність запровадження додаткових організаційно-технічних заходів щодо захисту об'єктів зберігання боєзапасу Збройних сил України.

Упровадження систем раннього виявлення надзвичайних ситуацій на основі широкого використання автоматизованих і комп'ютерних засобів із залученням їх до Єдиної державної системи цивільного захисту в усіх режимах управління безпекою на потенційно небезпечних об'єктах надасть органам управління:

- цілодобову оперативну інформацію про стан безпеки на об'єктах та практичні рекомендації щодо усунення загрози виникнення НС;
- оперативну інформацію з використанням різних джерел та форм подання (цифрові карти,

схеми, графіки, фото, відео, космічні знімки і т. ін.) для з'ясування цілодобової обстановки на об'єкті, у випадку виникнення НС для всіх фахівців, залучених до її ліквідації, – матеріал у реальному часі про стан об'єкта для прийняття рішень;

– електронний «чорний ящик», що містить документальне відображення всіх подій, заходів, рішень, що стосуються об'єкта і проведених заходів. Інформація «чорного ящика» за необхідності буде використана в подальшому для оцінки дій усіх працівників (учасників), задіяних у проведенні тих чи інших заходів;

– органам військового управління та суб'єктам реагування на НС необхідну інформацію для прийняття рішень щодо недопущення виникнення НС [14, 16].

Матеріал наукової публікації містить елементи наукової новизни. Розглянута комбінація конструктивно-технологічних рішень потребує подальшого наукового дослідження з метою впровадження в практичну діяльність.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. *Військовий стандарт ВСТ 01.201.001-2008 (01). Живучість та вибухопожежобезпека арсеналів, баз та складів озброєння, ракет і боєприпасів. Терміни та визначення. Управління стандартизації, кодифікації та каталогізації. Київ, 2021. 15 с.*
2. *ДБН В.2.5-76:2014 Автоматизовані системи раннього виявлення загрози виникнення надзвичайних ситуацій та оповіщення населення. Зі зміною № 1. [Чинний 2014-06-01]. Київ, 2020. 34 с.*
3. *Державна служба з надзвичайних ситуацій України. URL: <http://www.mns.gov.ua>*
4. *ДСТУ 3890–1999 Безпека в надзвичайних ситуаціях. Основні положення. [Чинний від 2000–01–01]. Київ : Держстандарт України, 1999. 5 с.*
5. *ДСТУ 3891–1999 Безпека в надзвичайних ситуаціях. Терміни та визначення основних понять. [Чинний від 2000–01–01]. Київ : Держстандарт України, 1999. 21 с.*
6. *ДСТУ 4933:2008 Техногенні надзвичайні ситуації. Терміни та визначення основних понять. [Чинний від 2008–07–01]. Київ : Держспоживстандарт України, 2007. 17 с.*
7. *ДСТУ 4934:2008 Безпека у надзвичайних ситуаціях. Джерела фізичного походження природних надзвичайних ситуацій. Номенклатура та показники впливів уражальних чинників. [Чинний від 2008–07–01]. Київ : Держспоживстандарт України, 2007. 7 с.*
8. *ДСТУ 5058–2008 Безпека в надзвичайних ситуаціях. Навчання населення діям у надзвичайних ситуаціях. Основні положення. [Чинний від 2008–07–01]. Київ : Держспоживстандарт України, 2007. 19 с.*
9. *ДСТУ 7095–2009 Безпека у надзвичайних ситуаціях. Захист населення у надзвичайних ситуаціях. Основні положення. [Чинний від 2010–02–01]. Київ : Держспоживстандарт України, 2009. 13 с.*
10. *ДСТУ 7098–2009 Безпека у надзвичайних ситуаціях. Ліквідування надзвичайних ситуацій та їх наслідків. Загальні положення. [Чинний від 2011–07–01]. Київ : Держспоживстандарт України, 2009. 17 с.*
11. *ДСТУ 7134–2009 Безпека в надзвичайних ситуаціях. Державний реєстр потенційно небезпечних об'єктів. Основні положення. [Чинний від 2010–07–01]. Київ : Держспоживстандарт України, 2009. 14 с.*
12. *ДСТУ 7135–2009 Безпека в надзвичайних ситуаціях. Паспорт потенційно небезпечного об'єкта. Загальні вимоги. [Чинний від 2010–07–01]. Київ : Держспоживстандарт України, 2009. 9 с.*

13. ДСТУ 7136–2009 Безпека в надзвичайних ситуаціях. Моніторинг потенційно небезпечних об'єктів. Порядок проведення. [Чинний від 2010–07–01]. Київ : Держспоживстандарт України, 2009. 11 с.
14. Комісаров О. Г., Хитра О. Л. Концептуальні підходи до використання категорії «кризові ситуації, що загрожують національній безпеці України». *Науковий вісник ДДУВС*. 2017. № 3. С. 104–111.
15. Мошковський М. С., Вишнівський О. В. Проблеми забезпечення живучості та вибухопожежобезпеки арсеналів, баз та складів озброєння, ракет і боєприпасів Збройних Сил України. *Тези доповіді на міжвідомчій науково-технічній конференції. ЦНДІ ОБТ ЗС України*. 2012. С. 91.
16. Мошковський М. С., Засець В. В., Колоша С. П. Проблемні питання забезпечення живучості військових потенційно небезпечних об'єктів у особливий період. *Матеріали III міжнародної науково-практичної конференції – Хімічна технологія : наука, економіка та виробництво* (Шостка, 23-25 лист. 2016). Суми : СумДУ, 2016. С. 50–52
17. Національний класифікатор України. Класифікатор надзвичайних ситуацій ДК 019:2010. [Чинний від 2011–01–01]. Київ : Держспоживстандарт України, 2010. 37 с.
18. Про затвердження Положення про організацію оповіщення про загрозу виникнення або виникнення надзвичайних ситуацій та зв'язку у сфері цивільного захисту. [Чинний від 2017–27–09]. Київ : 45 с.
19. BLOC -Business Logic Components Pattern. URL: <https://medium.com/nerd-for-tech/bloc-business-logiccomponents-pattern-8b0b9a01d611>
20. Getting Started with Flutter Bloc Pattern. URL: <https://www.mitrais.com/news-updates/getting-started-with-flutterbloc-pattern/>

V. V. ONISHCHENKO^{1*}, S. M. SUKHAI^{2*}

^{1*}State Special Transport Service, Yakova Hnizdovskoho Str., 5, Kyiv, Ukraine, 02094, tel. +38 (063) 212 54 01, e-mail jybotyrj988@gmail.com, ORCID 0009-0004-9347-6821

^{2*}Department of Military Training of Specialists of the State Special Transport Service, Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (063) 838 65 63, e-mail suhays@i.ua, ORCID 0009-0000-2539-6839

Features of Organizational and Technical Measures to Increase the Level of Survivability and Explosion and Fire Safety of Potentially Dangerous Objects

Purpose. The work is aimed at studying the peculiarities of organizational and technical measures to improve the level of explosion and fire safety of potentially dangerous objects. **Methodology.** To achieve this goal: 1) a study was conducted to identify possible hazards and risks at potentially hazardous facilities; 2) practical organizational and technical measures to improve the level of explosion and fire safety of hazardous facilities were analyzed; 3) the composition and capabilities of the system of early detection of the threat of emergencies and warning, as well as the possibility of implementing this system at the relevant facilities of the Armed Forces of Ukraine were assessed; 4) the main types of automated warning and the principles of their operation were considered, and the available technical solutions were analyzed. **Findings.** The peculiarities of organizational and technical measures to improve the level of explosion and fire safety of munitions storage facilities are summarized. The key stages of the implementation of technological solutions to ensure the survivability of potentially hazardous facilities are identified. **Originality.** For the first time, an analytical justification for the need to use hazard monitoring systems and timely warning of possible emergencies at munitions storage facilities and other potentially hazardous facilities was carried out. The features of design and technological solutions to improve the level of explosion and fire safety of munitions storage facilities through organizational and technical measures are considered. **Practical value.** The implementation of effective design and technological solutions for the use of hazard monitoring systems and timely warning of possible emergencies will allow to move from damage localization measures to the forecast and prevention of disasters and reliable protection of munitions storage facilities of the Armed Forces of Ukraine, other potentially dangerous facilities and critical infrastructure of the state.

Keywords: survivability; explosion and fire safety; potentially hazardous military facilities; safe placement of munitions; decomposition; complex technical system; hazard monitoring and timely warning systems

REFERENCES

1. *Viiskovyi standart VST 01.201.001-2008 (01). Zhyvuchist ta vybukhopozhezhbezpeka arsenaliv, baz ta skladiv ozbroiennia, raket i boieprypasiv. Terminy ta vyznachennia. Upravlinnia standartyzatsii, kodyfikatsii ta katalohizatsii.* Kyiv. (in Ukrainian)
2. *Avtomatyzovani systemy rannoho vyivlennia zahrozy vynyknennia nadzvychainykh sytuatsii ta opovishchennia naseleennia, 34 DBN V.2.5-76:2014.* (2020). Kyiv. (in Ukrainian)
3. *The State Emergency Service of Ukraine.* Retrieved from <http://www.mns.gov.ua>
4. *Bezpeka v nadzvychainykh sytuatsiiakh. Osnovni polozhennia, 5 DSTU 3890–1999.* (1999). Kyiv: Derzhstandart Ukrainy. (in Ukrainian)
5. *Bezpeka v nadzvychainykh sytuatsiiakh. Terminy ta vyznachennia osnovnykh poniat, 21 DSTU 3891–1999.* (1999). Kyiv: Derzhstandart Ukrainy. (in Ukrainian)
6. *Tekhnohenni nadzvychaini sytuatsii. Terminy ta vyznachennia osnovnykh poniat, 17 DSTU 4933:2008.* (2007). Kyiv: Derzhspozhyvstandart Ukrainy. (in Ukrainian)
7. *Bezpeka u nadzvychainykh sytuatsiiakh. Dzhherela fizychnoho pokhodzhennia pryrodnykh nadzvychainykh sytuatsii. Nomenklatura ta pokaznyky vplyviv urazhalnykh chynnykiv, 7 DSTU 4934:2008.* (2020). Kyiv. (in Ukrainian)
8. *Bezpeka v nadzvychainykh sytuatsiiakh. Navchannia naseleennia diiam u nadzvychainykh sytuatsiiakh. Osnovni polozhennia, 19 DSTU 5058–2008.* (2007). Kyiv: Derzhspozhyvstandart Ukrainy. (in Ukrainian)
9. *Bezpeka u nadzvychainykh sytuatsiiakh. Zakhyst naseleennia u nadzvychainykh sytuatsiiakh. Osnovni polozhennia, 13 DSTU 7095–2009.* (2009). Kyiv: Derzhspozhyvstandart Ukrainy. (in Ukrainian)
10. *Bezpeka v nadzvychainykh sytuatsiiakh. Likviduvannia nadzvychainykh sytuatsii ta yikh naslidkiv. Zahalni polozhennia, 17 DSTU 7098–2009.* (2009). Kyiv: Derzhspozhyvstandart Ukrainy. (in Ukrainian)
11. *Bezpeka v nadzvychainykh sytuatsiiakh. Derzhavnyi reiestr potentsiino nebezpechnykh obektiv. Osnovni polozhennia, 14 DSTU 7134–2009.* (2009). Kyiv: Derzhspozhyvstandart Ukrainy. (in Ukrainian)
12. *Bezpeka v nadzvychainykh sytuatsiiakh. Pasport potentsiino nebezpechnoho obiekta. Zahalni vymohy, 9 DSTU 7135–2009.* (2009). Kyiv: Derzhspozhyvstandart Ukrainy. (in Ukrainian)
13. *Bezpeka v nadzvychainykh sytuatsiiakh. Monitorynh potentsiino nebezpechnykh obektiv. Poriadok provedennia, 11 DSTU 7136–2009.* (2009). Kyiv: Derzhspozhyvstandart Ukrainy. (in Ukrainian)
14. Komissarov, O. G. & Khytra, O. L. (2017). Conceptual approaches to the use of category “crisis situations, threatening the national security of Ukraine. *Naukovyi visnyk DDUVS*, 3, 104-111. (in Ukrainian)
15. Moshkovskiy, M. S., & Vyshnivskiy, O. V. (2012). Problemy zabezpechennia zhyvuchosti ta vybukhopozhezhbezpeky arsenaliv, baz ta skladiv ozbroiennia, raket i boieprypasiv Zbroinykh Syl Ukrainy. In *Tezy dopovidi na mizhvidomchii nauково-tekhnichnii konferentsii. TsNDI OVT ZS Ukrainy.* (in Ukraine)
16. Moshkovskiy, M. S., Zaiets, V. V., & Kolosha, S. P. (2015). Problemni pytannia zabezpechennia zhyvuchosti viiskovykh potentsiino nebezpechnykh obektiv u osoblyvyi period. In *Materialy III mizhnarodnoi naukovopraktychnoi konferentsii-Khimichna tekhnolohiia: nauka, ekonomika ta vyrobnytstvo* (pp. 50-52). Sumi: SumDU. (in Ukrainian)
17. *Natsionalnyi klasyfikator Ukrainy. Klasyfikator nadzvychainykh sytuatsii, 37 DK 019:2010.* Kyiv: Derzhspozhyvstandart Ukrainy. (in Ukrainian)
18. *Pro zatverdzhennia Polozhennia pro orhanizatsiiu opovishchennia pro zahrozu vynyknennia abo vynyknennia nadzvychainykh sytuatsii ta zviazku u sferi tsyvilnoho zakhystu.* Kyiv. (in Ukrainian)
19. *BLOC – Business Logic Components Pattern.* Retrieved from <https://medium.com/nerd-for-tech/bloc-business-logiccomponents-pattern-8b0b9a01d611> (in English)
20. *Getting Started with Flutter Bloc Pattern.* Retrieved from <https://www.mitrais.com/news-updates/getting-started-with-flutterbloc-pattern/> (in English)

Надійшла до редколегії: 09.11.2023

Прийнята до друку: 10.03.2024

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

УДК 629.4.053:621.318

О. О. ГОЛОТА^{1*}, А. М. МУХА^{2*}, Д. В. УСТИМЕНКО^{3,4*}, С. В. ПЛАКСІН^{5*}

^{1*}Каф. «Електротехніка та електромеханіка», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 47, ел. пошта sashagolota3012@gmail.com, ORCID 0000-0002-0282-2767

^{2*}Каф. «Електротехніка та електромеханіка», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 47, ел. пошта mukha.andrii@gmail.com, ORCID 0000-0002-5629-4058

^{3*}Каф. «Електротехніка та електромеханіка», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 47, ел. пошта ustimenko.1979@gmail.com, ORCID 0000-0003-2984-4381

^{4*}Відділ систем керування транспортними засобами, Інститут транспортних систем та технологій НАН України, вул. Писаржевського, 5, Дніпро, Україна, 49005, тел. +38 (056) 370 21 82, ел. пошта ustimenko.1979@gmail.com, ORCID 0000-0003-2984-4381

^{5*}Відділ систем керування транспортними засобами, Інститут транспортних систем та технологій НАН України, вул. Писаржевського, 5, Дніпро, Україна, 49005, тел. +38 (056) 370 21 82, ел. пошта svp@westa-inter.com, ORCID 0000-0001-8302-0186

Дослідження процесів у колі тягового конденсатора моделі високошвидкісного магнітолевітаційного транспорту

Мета. Високошвидкісний магнітолевітаційний транспорт (маглев), побудований за принципом електродинічного підвішування, має особливості у вигляді великих секцій обмоток шляхових котушок. Через це виникає потреба в дослідженні електричних процесів у колах цих котушок для підвищення ефективності енергетичних показників такого виду транспорту. Дослідження електричних процесів у колах шляхової енергоустановки дозволяє обґрунтувати передумови для створення розподіленої системи накопичення та передачі енергії. Енергоустановка складається з окремих підсистем, серед яких є блок первинного накопичення енергії, блок розподілення енергії, а також тяговий модуль. Основна мета цього дослідження полягає у визначенні характеру перехідних процесів у блоці розподілення енергії та отриманні характеристик процесу розрядження тягового конденсатора. **Методика.** Проведено моделювання електричного кола, яке б відповідало потребам відповідного блока розподілення енергії шляхової структури для необхідних умов роботи системи руху маглева – керівних імпульсів із різною комбінаторикою. У процесі дослідження використано комп'ютерне моделювання фізичних систем у програмному середовищі Scilab. **Результати.** Проведено огляд наявних досліджень обґрунтовано актуальність дослідження шляхової енергоустановки високошвидкісного магнітолевітаційного транспорту. Наведено основні математичні залежності електричних кіл з ємнісними та індуктивними елементами. Створено структурне зображення індуктивної ділянки системи руху маглева з тяговим модулем: тягові котушки та конденсатор, а також блок «перетворювач – імпульсний сигнал». Створено дієвий інструмент аналізу перехідних процесів. **Наукова новизна.** Уперше запропоновано структурну та елементну реалізацію блока розподілення енергії для шляхової енергоустановки високошвидкісного наземного транспорту. Отримано часові залежності, які описують процеси в запропонованій системі під час виконання принципів імпульсного керування тяговими котушками. На підставі аналізу характеру перехідних процесів у колі тягового конденсатора запропоновано напрями подальшого розвитку цієї енергоустановки. **Практична значимість.** Результати роботи створюють підґрунтя для подальших досліджень та розробки експериментально-дослідних моделей (випробувального стенда) маглева, щоб отримати нові співвідношення та характеристики, які дозволять підтвердити ефективність і працездатність нового принципу керування запропонованою системою.

Ключові слова: енергоустановка; тяговий модуль; тяговий конденсатор; магнітолевітаційний транспорт; електродинічне підвішування; перехідні процеси

Вступ

Транспортні системи сучасного світу повинні відповідати таким логістичним потребам глобалізації суспільства: регулярність ланцюгів постачання та перевезень, зниження часу на перевезення, підвищення пропускної спроможності транспорту, технологічна модернізація транспортних засобів та інфраструктури, раціональне використання енергоресурсів та екологічна безпека.

Оскільки магнітолевітаційний транспорт (маглев) є найбільш перспективним видом транспорту, що може задовольнити зазначені потреби, необхідно вдосконалювати наявні технологічні рішення та розробляти принципово нові системи, які дозволять поліпшити транспортні засоби, що використовують магнітну левітацію [1, 2].

Будь-яка транспортна система – це складна мережа різних пристроїв та засобів, що вимагають значних ресурсів на утримання. Кінцевим результатом створення транспортних систем є перевезення пасажирів та вантажів на максимально можливу відстань за мінімально можливий час. Для реалізації цих завдань необхідно проводити значну кількість наукових досліджень, щоб визначити нові структури або типи транспортних систем. Із метою оптимізації витрат часу ці дослідження можна проводити в декілька етапів: аналітичні, експериментальні, лабораторні, експлуатаційні, у реальних умовах та інші.

Серед наявних транспортних систем маглев є складним із погляду створення, а значить, найбільш наближеними до реальних умов є лабораторні випробовування масштабних моделей.

Масштабне моделювання дозволяє виконати експериментальну валідацію теоретичних гіпотез та розрахунків, здійснити перевірку очікуваних закономірностей роботи системи на практиці і виявити можливі похибки або неточності. Використання розподілу на підсистеми дозволяє отримати експериментальні дані для кількісної оцінки подальшої розробки та проектування системи. Стаття [8] теоретично обґрунтовує метод аналізу електромагнітного поля та моделей електричних кіл машин на основі теорії подібності та масштабних коефіцієнтів. Розвиток цього методу представлено в [9] у вигляді розробки проекту спеціальних електричних машин. Дослідження подібності динамічних характеристик

для масштабних моделей крана [10] показало, що шляхом використання визначених співвідношень теорії подібності можна виконати аналіз роботи динамічних параметрів системи. Масштабні моделі для дослідження електромагнітних сил також застосовують у геомеханічних моделях, щоб імітувати сили гравітації, із застосуванням електромагнітного поля [11]. У таких дослідженнях визначають відповідні масштабні коефіцієнти для кожної окремої задачі. Закони та принципи теорії подібності також раніше застосовували для створення масштабної моделі прототипу високошвидкісної роторної системи [15]. Принципи розробки масштабного дослідного стенда, що дозволяє діагностувати стан електро-механічних систем, наведені у [8].

Для наземного високошвидкісного магнітолевітаційного транспорту в [14] була запропонована концепція, яка також побудована на дослідженні масштабної моделі. За результатами вимірювання електричні характеристики експериментального стенда відповідали очікуваним результатам.

Умовно дослідження моделей транспортних систем можна поділити на декілька етапів: комп'ютерне [12] та масштабне моделювання.

На першому етапі роботи автори розглядають можливість імітаційного моделювання процесів шляхової енергоустановки високошвидкісного магнітолевітаційного транспорту.

Основна ідея такої шляхової енергоустановки запропонована в [5]. На основі цієї структури можна досягти розв'язання необхідних задач, пов'язаних із поліпшенням енергетичних показників магнітолевітаційного транспорту, а також забезпечити розвиток відновлюваних джерел енергії, оскільки концепція цієї енергоустановки побудована на отриманні та використанні сонячної енергії.

Схема роботи цієї енергоустановки являє собою розподілену фотоелектричну систему, основою якої є відновлюване джерело енергії, яке потрапляє до первинного ємнісного накопичувача. Ці складові можна визначити як «блок первинного накопичування енергії».

На подальшому етапі енергія з первинного ємнісного накопичувача потрапляє до тягового конденсатора, який передає енергію до дворезимного тягового модуля. Ці складові можна визначити як «блок розподілення енергії».

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

У результаті цього необхідно визначити структуру та енергетичні процеси, що відбуваються в блоці розподілення енергії.

Мета

Особливістю високошвидкісного магнітолевітаційного транспорту з електродинамічним способом підвищення є наявність великих секцій обмоток шляхових котушок (longstator). Це створює певні обмеження в значеннях ефективності енергетичних показників [6]. Для пошуку більш сприятливих технологічних рішень необхідно провести дослідження електричних процесів у колах шляхової енергоустановки, що дозволить обґрунтувати передумови створення розподіленої системи накопичення та передачі енергії [1]. Будову такої енергоустановки можна поділити на окремі підсистеми: блок первинного накопичення енергії, блок розподілення енергії, який передає електроенергію до тягового модуля шляхової структури.

Оскільки ключовим елементом системи тяги є тяговий модуль, то постає мета визначити характер перехідних процесів у блоці розподілення енергії та отримати характеристики процесу розрядження тягового конденсатора через тягову котушку, представлену в моделі як індуктивний елемент.

Початковою умовою для розв'язання цієї задачі є те, що ми беремо значення початкової напруги на конденсаторі постійним для цієї системи, а струм у котушці індуктивності дорівнює нулю.

Методика

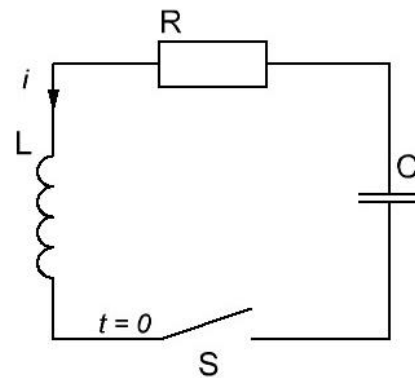
Наше дослідження ґрунтується на створенні та використанні комп'ютерної моделі, що дозволить аналізувати перехідні процеси в тяговому конденсаторі блока розподілення енергії магнітолевітаційного транспорту.

Для проведення дослідження використано методику, яка містить моделювання відповідного електричного кола. Це коло повинно задовольняти вимоги блока розподілення енергоустановки шляхової структури та створювати необхідні умови для роботи системи руху маглева. Особливий акцент зроблено на формуванні вхідних імпульсів із різними параметрами сигналу, такими як послідовний, паралельний та комбінований із затримкою.

Для аналізу та моделювання фізичної системи використано комп'ютерну симуляцію в програмному середовищі Scilab. Робоче середовище для дослідження мало відповідні типові електричні елементи, з яких і формувалась потрібна схема.

Ємнісний накопичувач (тяговий конденсатор) передає енергію до тягового модуля шляхової структури за певний час. Цей проміжок часу повинен відповідати динамічним вимогам руху високошвидкісного транспорту [3]. Процес перемикавання тягових котушок шляхової структури повинен відповідати визначеним режимам роботи такої системи.

Схема, яка представлена в дослідженні, складається з трьох найпоширеніших електричних компонентів: резистор, конденсатор, котушка індуктивності, – що створюють у разі послідовного з'єднання схему RLC контуру (рис. 1).

Рис. 1. Послідовна схема RLC Fig. 1. RLC series circuit

Залежно від значень параметрів є різні варіації роботи та реакції системи. Згідно з теорією електричних кіл розряд конденсатора може мати аперіодичні, періодичні (коливальні) або граничні характеристики.

Процес розрядження конденсатора через котушку індуктивності має декілька етапів. У початковий момент ($t = 0$) конденсатор має початковий заряд, який дорівнює початковим умовам необхідної системи, у цей час струм на індуктивних елементах дорівнюватиме нулю.

У досліджуваному колі відсутні постійні джерела енергії, а конденсатор заряджений на певну величину, яка залежить від його характеристик. Рівняння, яке описує цю схему, має вигляд:

$$\frac{d^2 u_C}{dt^2} + \frac{R}{L} \frac{du_C}{dt} + \frac{1}{LC} u_C = 0. \quad (1)$$

Загальний розв'язок цього рівняння щодо $u_C(t)$ за різних коренів буде мати вигляд:

$$u_C(t) = A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t}, \quad (2)$$

де A_1, A_2 – сталі інтегрування; p_1, p_2 – корені характеристичного рівняння;

$$p^2 + \frac{R}{L} p + \frac{1}{LC} = 0. \quad (3)$$

Вираз (3) відповідає (1), розв'язок якого матиме два корені:

$$p_{1,2} = -\frac{R}{2L} \pm \sqrt{\frac{R^2}{4L^2} - \frac{1}{LC}}. \quad (4)$$

Перехідна напруга u_C , яку потрібно визначити згідно з виразом (2), буде залежати від характеру коренів, що, відповідно до (4), визначають значеннями параметрів RLC -кола, а отже, і характер інших перехідних величин кола матиме залежність від цих параметрів.

Сталі інтегрування A_1, A_2 у виразі (2) можна визначити через похідну за часом:

$$\frac{du_C}{dt} = A_1 p_1 e^{p_1 t} + A_2 p_2 e^{p_2 t}. \quad (5)$$

У момент комутації $t = 0$ вирази (2) та (5) будуть мати вигляд:

$$\begin{cases} u_C(0) = A_1 + A_2; \\ \frac{du_C}{dt} = A_1 p_1 + A_2 p_2. \end{cases} \quad (6)$$

Відповідно до другого закону комутації й умови, що конденсатор до $t = 0$ був заряджений на певне значення напруги, матимемо:

$$u_C(0) = u_C(-0) = U_0. \quad (7)$$

Сталі інтегрування визначають за таким виразом:

$$\left. \begin{aligned} A_1 &= U_0 \frac{p_2}{p_2 - p_1} \\ A_2 &= -U_0 \frac{p_1}{p_2 - p_1} \end{aligned} \right\}. \quad (8)$$

Підставивши (8) у (2), отримуємо закон зміни $u_C(t)$ в перехідному режимі:

$$u_C(t) = U_0 \frac{p_2}{p_2 - p_1} e^{p_1 t} - U_0 \frac{p_1}{p_2 - p_1} e^{p_2 t}. \quad (9)$$

Перехідний струм можна знайти як похідну від (9):

$$i(t) = C \frac{du_C}{dt} = \frac{U_0}{L(p_2 - p_1)} (e^{p_1 t} - e^{p_2 t}). \quad (10)$$

Напругу на індуктивності визначають за формулою:

$$u_L(t) = L \frac{di}{dt} = \frac{U_0}{p_2 - p_1} (p_1 e^{p_1 t} - p_2 e^{p_2 t}). \quad (11)$$

Дослідження типової ланки тягової котушки індуктивності проведено за подачі імпульсів постійної напруги амплітудою 5 В. Тривалість діапазону моделювання перехідного процесу становить 1 с. Результат дослідження визначено числовими та графічними характеристиками створюваного тягового модуля.

Результати

За заданого значення індуктивності концепція структури тягового модуля для експериментально-дослідної установки буде мати кругову форму, що показано на рис. 2.

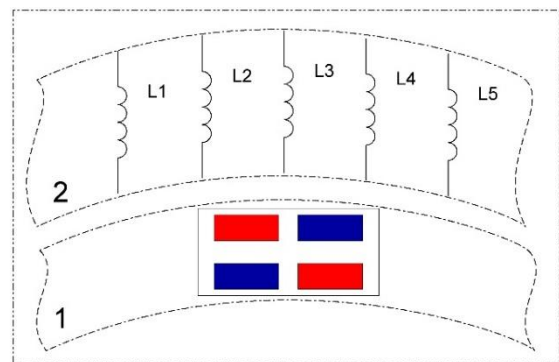


Рис. 2. Структурне зображення рухомого складу (1) та ділянки з індуктивними елементами (2)

Fig. 2. Structural image of the section with inductive elements (1) and rolling stock (2)

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

Під час дослідження увагу приділено саме цій ділянці блока розподілення енергії для визначення взаємозв'язку між тяговим конденсатором та тяговим модулем, щоб у подальших дослідженнях використовувати результати, які має блок розподілення енергії.

Блок-перетворювач постійної напруги в імпульсний сигнал є керівним елементом, що дозволяє подавати напругу на потрібну тягову котушку у відповідний момент часу для реалізації різних режимів роботи маглева. Під час різних режимів роботи (розгін, сталий рух, гальмування) можливі різні варіації схем ввімкнення тягового модуля, що представлений у вигляді котушок індуктивності. Ці варіації увімкнення повинні бути створені залежно від виду вихідних імпульсів.

Елементи формування імпульсного сигналу складаються з тягового конденсатора, блока перетворювача постійної напруги в імпульсний сигнал та котушок індуктивності, що в загальному вигляді являють собою блок розподілення енергії енергоустановки шляхової структури маглева (рис. 3).

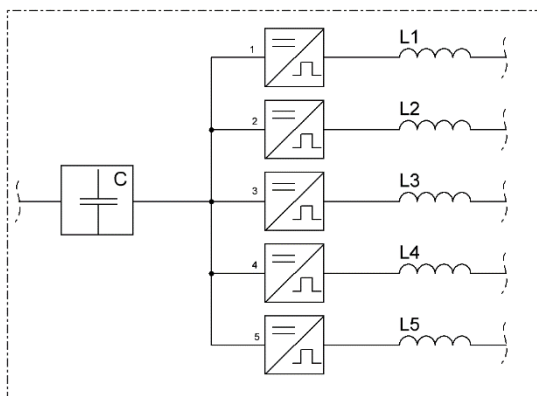


Рис. 3. Блок розподілення енергії

Fig. 3. Energy distribution unit

Для побудови функціональної схеми в програмному середовищі було використано типові елементи електричних схем, де кожний відповідний блок обмотки збудження вмикається у визначений час перехідного процесу і відбувається етап зміни робочої котушки, яка приймає енергію з конденсатора. Цей процес є циклічним і відбувається шляхом зарядження та розрядження тягового конденсатора.

Схема «тяговий конденсатор – імпульсний сигнал» побудована у вигляді ланки з імпульсним

сигналом (step), який подається на ключ (switch), що замикає електричне коло, унаслідок чого відбувається живлення відповідної ділянки у визначений момент часу. Графічні зображення результатів моделювання є процесами зміни в часі струму та напруги.

Функціональна схема блока розподілення енергії зображена на рис. 4.

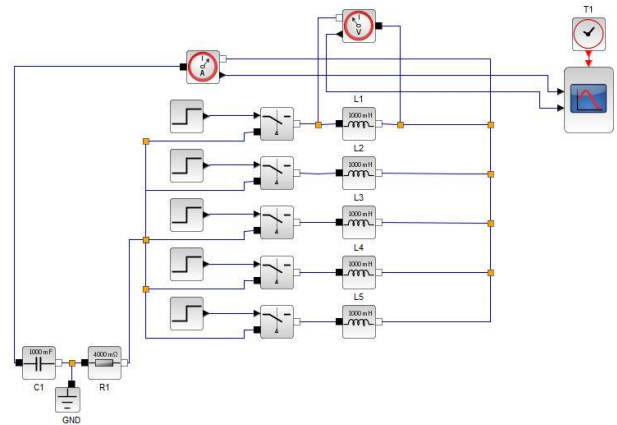


Рис. 4. Функціональна схема блока розподілення енергії

Fig. 4. Functional diagram of the energy distribution unit

Формування вихідних імпульсів буде залежати від задач процесів керування рухомим складом. Послідовне вмикання керівних сигналів (рис. 5) дозволяє встановити вмикання тягових модулів по черзі.

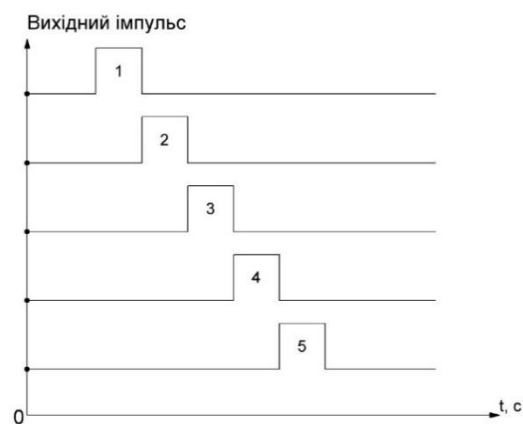


Рис. 5. Принцип послідовного вмикання індуктивних елементів

Fig. 5. Sequential switching on of inductive elements

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

Подача послідовного сигналу полягає в тому, щоб у системі руху формувати серію імпульсів, коли після завершення одного в той самий час вмикався б наступний і таким чином створювалась безперервність сигналу та живлення котушок [1].

Послідовний режим роботи можливий для реалізації процесу керування за умови, що маглев уже завершив етап розгону та перейшов на сталий рух із постійною швидкістю на певній ділянці шляхової структури.

Формування серії вхідних імпульсів, які подають на тягові котушки індуктивності в середовищі Scilab для дослідження принципу послідовної роботи тягового елемента, показано на рис. 6.

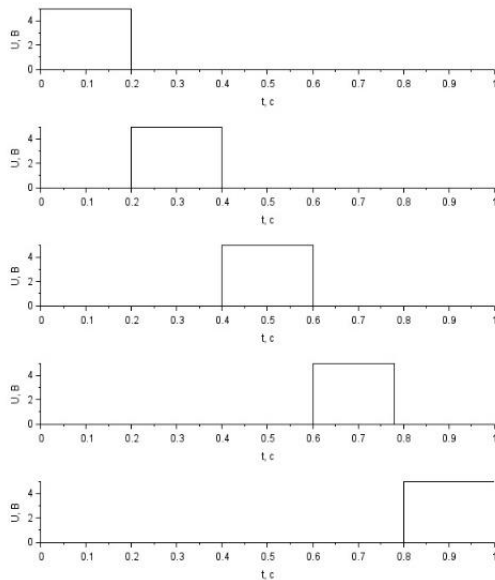


Рис. 6. Характер послідовних імпульсів у середовищі Scilab

Fig. 6. The nature of successive pulses in the Scilab environment

Загальний час подачі серії керівних імпульсів становитиме 1 с. Кожна серія цих імпульсів може мати різні значення частоти живлення системи та тривалості сигналу.

Результати моделювання перехідного процесу за послідовного вмикання індуктивних елементів зображено на рис. 7.

Отримані дані початкових і кінцевих значень напруги, струму та часу роботи системи наведено в табл. 1.

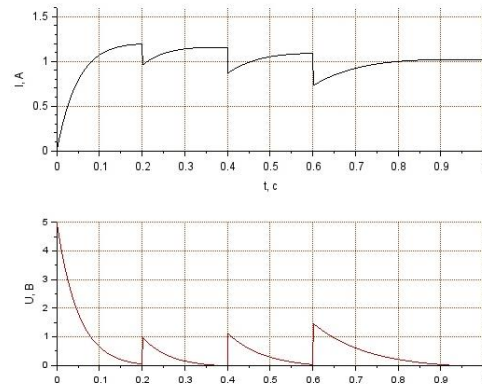


Рис. 7. Графік моделювання перехідного процесу послідовного вмикання індуктивних елементів

Fig. 7. The graph of the simulation of the transition process of sequential switching on of inductive elements

Таблиця 1

Початкові та кінцеві значення напруг, струму та часу для послідовного вмикання індуктивних елементів

Table 1

Initial and final values of voltages, currents and times for sequential switching on of inductive elements

№	$U_{\text{поч'}}$ В	$U_{\text{кінц'}}$ В	$I_{\text{поч'}}$ А	$I_{\text{кінц'}}$ А	$t_{\text{поч'}}$ с	$t_{\text{кінц'}}$ с
1	4,7	0,047	0	1,2	0	0,2
2	0,88	0,025	0,9	1,15	0,2	0,4
3	0,96	0,06	0,88	1,09	0,4	0,6
4	1,43	0,21	0,73	0,93	0,6	0,8
5	0,2	0,053	0,995	1	0,8	1

Згідно з рис. 7 та табл. 1, живлення індуктивних елементів має типовий характер, що повторюється з кожним наступним циклом роботи системи та вмикання наступної (послідовної) тягової котушки. Відбуваються паралельні процеси розрядження конденсатора (зниження рівня напруги) та насичення котушок (збільшення рівня струму). Під час перемикавання на черговий індуктивний елемент відбувається стрибкоподібне зменшення значення струму та підвищення рівня напруги. Через визначений час рівень струму та напруги досягає усталеного значення, та згідно

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

з технологічними вимогами, усталеними для конкретної системи, відбувається вмикання наступного тягового елемента.

Паралельне вмикання (рис. 8) дозволяє більш злагоджено розподіляти електричну енергію для точнішої реалізації процесу розгону маглева. Суть паралельного вмикання полягає в роботі одночасно двох тягових модулів, коли умовно одна котушка індуктивності досягає половини свого часу перехідного процесу. Реалізація такого принципу керування маглевом може мати місце на етапі розгону, коли потрібно досконало та плавно здійснювати перехід від однієї робочої тягової котушки до іншої.

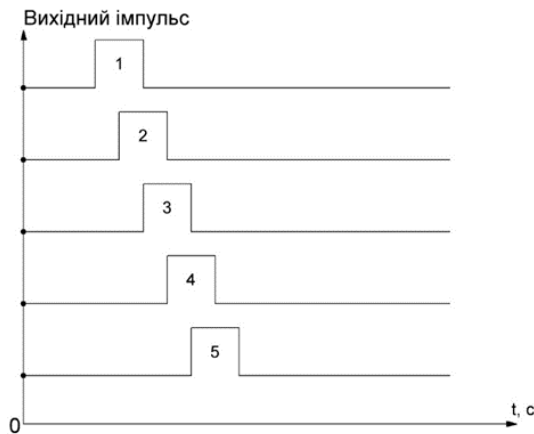


Рис. 8. Принцип паралельного вмикання індуктивних елементів

Fig. 8. Sequential switching on of inductive elements

Структура формування паралельного сигналу полягає в послідовності подачі одиничних імпульсів, коли процес увімкнення ще не завершився, а вмикається наступний послідовний сигнал, який «підхоплює» маглев та створює тягову силу, що дозволяє набирати швидкість рухомому складу.

Система формування паралельного сигналу передбачає послідовне увімкнення імпульсів, що дозволяє почати наступний цикл у момент, коли попередній ще не завершено, створюючи неперервну тягову силу для набору швидкості маглева.

Цей підхід до керування маглевом забезпечує плавність руху та злагожене використання електричної енергії, що робить цей спосіб ефективним за досягнення високої продуктивності роботи.

Формування входних імпульсів, які подають на котушки індуктивності в середовищі Scilab для дослідження принципу паралельного вмикання тягового елемента, показано на рис. 9.

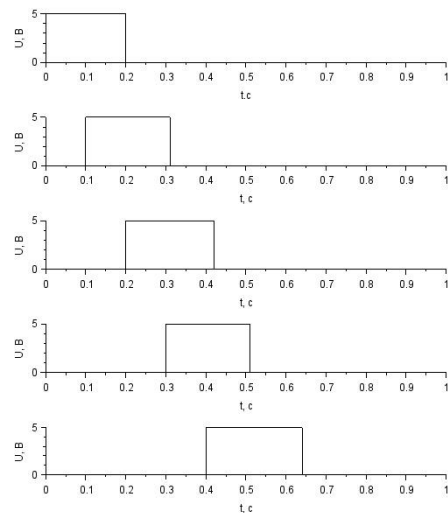


Рис. 9. Характер паралельних імпульсів у середовищі Scilab

Fig. 9. The nature of parallel pulses in the Scilab environment

Результати моделювання перехідного процесу за паралельного вмикання індуктивних елементів зображено на рис. 10, отримані дані початкових і кінцевих значень напруги, струму та часу роботи системи наведено в табл. 2.

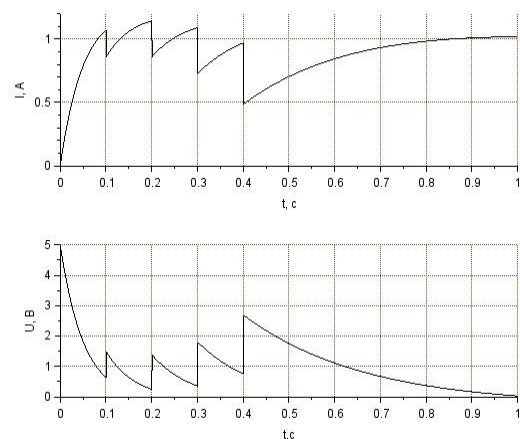


Рис. 10. Графік моделювання перехідного процесу паралельного вмикання індуктивних елементів

Fig. 10. The simulation graph of the transition process of parallel switching on inductive elements

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

Із рис. 10 визначено, що принцип роботи системи за паралельного вмикання індуктивних елементів має той самий характер, що і за послідовного. Однак суттєвою відмінністю є те, що відбувається зменшення часу роботи системи на кожному з п'яти етапів. Це пов'язано з тим, що в процесі вимкнення кожного імпульсу в програмному середовищі Scilab під час перемикавання на іншу котушку починається графічна реєстрація наступного тягового елемента, а процес роботи попередньої котушки вважається завершеним.

Таблиця 2

Початкові і кінцеві значення напруг, струму та часу для паралельного вмикання індуктивних елементів

Table 2

Initial and final values of voltages, currents and times for parallel switching of inductive elements

№	$U_{\text{поч}},$ В	$U_{\text{кінц}},$ В	$I_{\text{поч}},$ А	$I_{\text{кінц}},$ А	$t_{\text{поч}},$ с	$t_{\text{кінц}},$ с
1	5	0,64	0	1,06	0	0,1
2	1,47	0,248	0,85	1,44	0,1	0,2
3	1,37	0,36	0,86	1,091	0,2	0,3
4	1,8	0,75	0,73	0,97	0,3	0,4
5	2,7	0,028	0,49	1	0,4	1

Послідовний та паралельний принцип керування можуть мати різну варіативність та комбінації залежно від умов роботи (зупинка або гальмування) маглева або інших систем, де можливо використовувати тягові котушки. Одним із варіантів таких комбінувань є послідовне живлення тягових котушок із затримкою сигналу на одному елементі (рис. 11). Потреба в такому способі керування маглевом може виникати, наприклад, коли відбуваються деякі помилки в системі та перемикавання затримується чи відбувається зупинка транспортного засобу й потрібно його зафіксувати на одній ділянці шляхової структури.

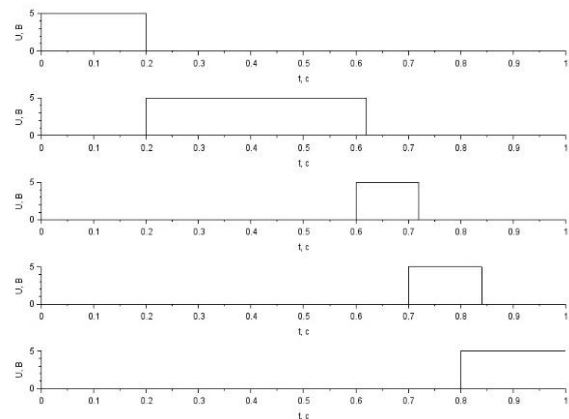


Рис. 11. Характер послідовних імпульсів із затримкою в середовищі Scilab

Fig. 11. The character of successive pulses with a delay in the Scilab environment

Результати моделювання перехідного процесу за послідовного вмикання індуктивних елементів із затримкою зображено на рис. 12, отримані дані початкових і кінцевих значень напруг, струму та часу роботи системи наведено в табл. 3.

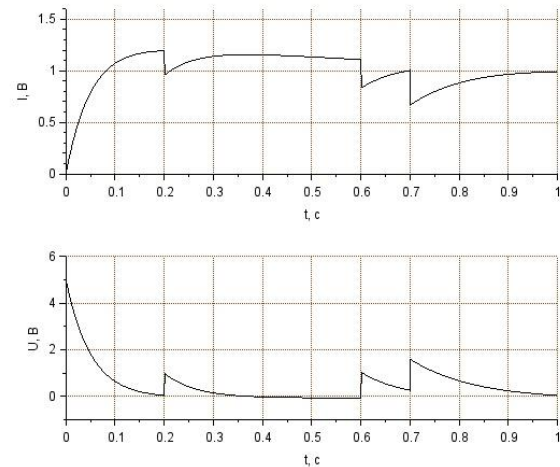


Рис. 12. Графік моделювання перехідного процесу послідовного вмикання індуктивних елементів із затримкою

Fig. 12. The graph of the simulation of the transition process of the sequential switching on of inductive elements with a delay

Реалізація подібного процесу керування дозволить зменшити похибку або відхилення від необхідного часу роботи окремого тягового елемента та забезпечить більшу стабільність зворотного зв'язку.

Таблиця 3

Початкові і кінцеві значення напруг, струму та часу для послідовного вмикання індуктивних елементів із затримкою

Table 3

Initial and final values of voltages, currents and times for sequential switching on of inductive elements with a delay

№	$U_{\text{поч}},$ В	$U_{\text{кінц}},$ В	$I_{\text{поч}},$ А	$I_{\text{кінц}},$ А	$t_{\text{поч}},$ с	$t_{\text{кінц}},$ с
1	5	0,043	0	1,12	0	0,2
2	0,9	0,07	0,96	1,1	0,2	0,6
3	0,99	0,37	0,84	1	0,6	0,7
4	1,6	0,63	0,7	0,88	0,7	0,8
5	0,63	0,04	0,8	1	0,8	1

Результати, отримані згідно з рис. 12 та зведені в табл. 3, показують, що, якщо в одному з індуктивних тягових елементів відбувається затримка в часі, яка є більшою, ніж період роботи інших складових, то цей процес є більш лінійним та не характеризується різкою зміною струму або напруги, досягаючи при цьому усталеного значення.

Наукова новизна та практична значимість

У роботі вперше отримано нові співвідношення та залежності, що являють собою характеристики перехідного процесу тягового модуля, який складається з типових електротехнічних елементів (конденсатор, котушки).

Запропоновано та визначено принципи можливих алгоритмів керування маглевом, що дозволить удосконалити наявну будову шляхової стру-

ктури цього виду транспорту й надалі може поліпшити енергоефективність та уніфікацію складових елементів системи живлення та керування рухом.

На основі отриманих результатів можливі подальші дослідження принципів керування, моделювання великих ділянок шляхової структури, комбінації електричних схем із різною компонентною базою, а також створення експериментально-дослідних моделей маглева для фізичного дослідження системи керування з використанням шляхової енергоустановки.

Висновки

У результаті виконаного дослідження можна стверджувати, що цей напрям є актуальним для подальшого розв'язання проблем комбінованої системи керування рухом маглева.

У процесі роботи було визначено основні математичні залежності електричних кіл з ємнісними та індуктивними елементами. Створено структурне зображення блока розподілення енергії з ємнісним і тяговим модулем, а також показано процес формування імпульсного сигналу.

За допомогою програмного забезпечення Scilab проведено моделювання роботи дослідної схеми блоку розподілення енергії та отримано графічні зображення перехідних процесів для різного типу керування тяговим модулем: послідовне, паралельне, послідовне із затримкою. Визначено та зведено в таблиці рівні розряду конденсатора та рівень струму, який надходить на тяговий модуль.

Розроблено інструмент для комп'ютерного моделювання блока розподілення енергії, який надалі можна застосовувати для розв'язання інших задач, пов'язаних із розробкою енергоустановки шляхової структури високошвидкісного магнітолевітаційного транспорту.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Голота О. О., Плаксін С. В., Шкіль Ю. В. Визначення координат просторової орієнтації магнітоплану відносно колійної структури. *Транспортні системи і технології*. 2022. № 40. С. 159–169. DOI: <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2022-40-14>
2. Дзензерский В. А., Гниленко А. Б., Плаксин С. В., Погорелая Л. М., Шкиль Ю. В. Перспективная транспортно-энергетическая система на основе интеграции магнитолевитационной технологии и распределенной фотоэлектрической электростанции. *Наука та прогрес транспорту*. 2018. № 1 (73). С. 77–86. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2018/123116>

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

3. Муха А. М., Плаксін С. В., Погоріла Л. М., Устименко Д. В., Шкіль Ю. В., Комбінована система синхронізованого керування рухом і підвісом магнітоплана. *Наука та прогрес транспорту*. 2022. № 1 (97). С. 23–31. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2022/265332>
4. Плаксін С. В., Муха А. М., Устименко Д. В., Шкіль Ю. В., Голота О. О., Чуприна Є. М. 2-х режимний тягово-левітаційний модуль перспективної магнітно-левітаційної транспортної системи. *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. 2022. № 2 (58). С. 56–65. DOI: <https://doi.org/10.30929/2072-2052.2022.2.58.49-53>
5. Плаксін С. В., Шкіль Ю. В. Сонячна шляхова енергоустановка для електроживлення лінійного двигуна магнітолевітаційного транспорту. *Енергозбереження та енергоефективність*. 2016. С. 106–111.
6. Скосар В. Ю., Бурилов С. В., Дзензерський В. О. Деякі проблеми надшвидкісних транспортних технологій. *Наука та прогрес транспорту*. 2023. № 2 (102). С. 5–16. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2023/288073>
7. Dong F., Hao L., Park D., Iwasa Y., & Huang Z. On the future sustainable ultra-high-speed maglev: An energy-economical superconducting linear thrusting system. *Energy Conversion and Management*. 2023. № 291. P. 117247. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.117247>
8. Esteban E., Salgado O., Iturrospe A., Isasa I. Design methodology of a reduced-scale test bench for fault detection and diagnosis. *Mechatronics*. 2017. Vol. 47. P. 14–23. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2017.08.005>
9. Luo X.-Q., Cheng S.-G., Cheng S.-G., Zhang Z.-H., Tang K. Study of similarity theory of geomechanical model test in electromagnetic field. *Rock and Soil Mechanics*. 2011 Vol. 32. Iss. 4. P. 1035–1039.
10. Moschoudis A. P., Tsekouras G. J., Kanellos F. D., Kladas A. G. Particular SRM Design Methodology Based on Similarity Theory, Scale Factors and FEM. *Materials Science Forum*. 2016. Vol. 856. P. 269–275. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICELMACH.2014.6960536>
11. Moschoudis A. P., Tsekouras G. J., Kanellos, F. D., Design of particular electrical machines by using similarity theory and scale factors. *2014 International Conference on Electrical Machines (ICEM)* (Berlin, 02-05 Sept. 2014). Berlin, 2014. P. 2486–2491. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICELMACH.2014.6960536>
12. Shile L., Ying Zh., Jianhua Y. Application of Simulink in transient process analysis of transient electromagnetic field. *Coal Geology & Exploration*. 2020. Vol. 48. Iss. 2. P. 209–215.
13. Wang H. M., Yang B. F., Song B. M., Zhao Y. N. Transient Simulation of Electromagnetic Field during EMCC Process. *Applied Mechanics and Materials*. 2011. Vol. 66–68. P. 189–193. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.66-68.189>
14. Wiesman R., Fontana R., Cope D., Gamble B., Design and Demonstration of a Locally Commutated Linear Synchronous Motor. *SAE Transactions*. 1995. Vol. 104. P. 59–65. DOI: <https://doi.org/10.4271/951919>
15. Zhou B., Liang H., Miao H., Zang C. Reduced-Scale Model Design for a High-Speed Rotor System Based on Similitude Theory. *Proceedings of the ASME Turbo Expo 2019: Turbomachinery Technical Conference and Exposition. Volume 7A: Structures and Dynamics* (Phoenix, 17–21 June). Phoenix, 2019. P. 1–10. DOI: <https://doi.org/10.1115/GT2019-91112>

O. O. HOLOTA^{1*}, A. M. MUKHA^{2*}, D. V. USTYMENKO^{3,4*}, S. V. PLAKSIN^{5*}

^{1*}Dep. «Electrical Engineering and Electromechanics», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 47, e-mail sashagolota3012@gmail.com, ORCID 0000-0002-0282-2767

^{2*}Dep. «Electrical Engineering and Electromechanics», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 47, e-mail mukha.andrii@gmail.com, ORCID 0000-0002-5629-4058

^{3*}Dep. «Electrical Engineering and Electromechanics», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 47, e-mail ustimenko.1979@gmail.com, ORCID 0000-0003-2984-4381

^{4*}Department of Control Systems in Vehicles, Institute of Transport Systems and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine, Pysarzhevskoho St., 5, Dnipro, Ukraine, 49005, tel. +38 (056) 370 21 82, e-mail ustimenko.1979@gmail.com, ORCID 0000-0003-2984-4381

^{5*}Department of Control Systems in Vehicles, Institute of Transport Systems and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine, Pysarzhevskoho St., 5, Dnipro, Ukraine, 49005, tel. +38 (056) 370 21 82, e-mail svp@westa-inter.com, ORCID 0000-0001-8302-0186

Investigation of Processes in the Traction Capacitor Circuit of the Model of High-Speed Magnetolevitation Transport

Purpose. High-speed magnetolevitation transport (maglev), based on the principle of electrodynamic suspension, has features in the form of large sections of the windings of the track coils. Therefore, there is a need to study electrical processes in the circuits of these coils to improve the efficiency of the energy performance of this type of transport. The study of electrical processes in the circuits of a track power plant makes it possible to substantiate the prerequisites for the creation of a distributed energy storage and transmission system. The power plant consists of separate subsystems, including a primary energy storage unit, an energy distribution unit, and a traction module. The main purpose of this study is to determine the nature of transients in the energy distribution unit and to obtain the characteristics of the traction capacitor discharge process. **Methodology.** We modeled an electrical circuit that would meet the needs of the corresponding energy distribution unit of the track structure for the required operating conditions of the maglev motion system – control pulses with different combinatorics. In the course of the study, computer modeling of physical systems in the Scilab software environment was used. **Findings.** A review of existing studies has been carried out and the relevance of the study of the track power plant for high-speed magnetolevitation transport has been substantiated. The basic mathematical dependences of electrical circuits with capacitive and inductive elements are given. A structural representation of the inductive section of the maglev motion system with a traction module is created: traction coils and a capacitor, as well as a converter-pulse signal unit. An effective tool for analyzing transient processes has been created. **Originality.** For the first time, the structural and elemental realization of the power distribution unit for the road power plant of high-speed land transport is proposed. The time dependencies describing the processes in the proposed system during the implementation of the principles of pulse control of traction coils are obtained. Based on the analysis of the nature of transients in the traction capacitor circuit, the directions of further development of this power plant are proposed. **Practical value.** The results of the work create the basis for further research and development of experimental research models (test bench) of the maglev in order to obtain new ratios and characteristics that will confirm the effectiveness and efficiency of the new control principle of the proposed system.

Keywords: power plant; traction module; traction capacitor; magnetolevitation transport; electrodynamic suspension; transient processes

REFERENCES

1. Holota, O., Plaksin, S., & Shkil, Y. (2022). Determination of the coordinates of the spatial orientation of the magnetoplan regarding the rail structure. *Collection of Scientific Works of the State University of Infrastructure and Technologies Series «Transport Systems and Technologies»*, 1(40), 159-169. DOI: <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2022-40-14> (in Ukrainian)
2. Dzenzerskiy, V. O., Gnilenko, A. B., Plaksin, S. V., Pogorelaya, L. M., & Shkil, Y. V. (2018). Perspective transport-power system based on the integration of maglev-technology and distributed photo-electric station. *Science and Transport Progress*, 1(73), 77-86. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2018/123116> (in Russian)
3. Mukha, A. M., Plaksin, S. V., Pohorila, L. M., Ustymenko, D. V., & Shkil, Y. V. (2022). Combined System of Synchronized Simultaneous Control of Magnetic Plane Movement and Suspension. *Science and Transport Progress*, 1(97), 23-31. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2022/265332> (in Ukrainian)
4. Skosar, V. Yu., Burylov, S. V., & Dzenzerskiy, V. O. (2023). Some Problems of Ultra-High-Speed Transportation Technologies. *Science and Transport Progress*, 2(102), 5-16. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2023/288073> (in Ukrainian)
5. Plaksin, S., Mukha, A., Ustymenko, D., Shkil, Y., Holota, O., & Chupryna, Y. (2022). 2-mode traction-levitation module of a promising magnetic-levitation transport system. *Electromechanical and Energy Saving Systems*, 58(2), 56-65. DOI: <https://doi.org/10.30929/2072-2052.2022.2.58.49-53> (in Ukrainian)
6. Plaksin, S., Shkil, Y. V. (2016). Solar guideway energy station for power supply of the linear motor of maglev transport. *Enerhozberezhennya ta enerhoefektyvnist*, 106-111. (in Russian)
7. Esteban, E., Salgado, O., Iturrospe, A., & Isasa, I. (2017). Design methodology of a reduced-scale test bench for fault detection and diagnosis. *Mechatronics*, 47, 14-23. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2017.08.005> (in English)
8. Dong, F., Hao, L., Park, D., Iwasa, Y., & Huang, Z. (2023). On the future sustainable ultra-high-speed maglev: An energy-economical superconducting linear thrusting system. *Energy Conversion and Management*, 291, 117247. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.117247> (in English)

9. Shile, L., Ying, Zh., & Jianhua, Y. (2020). Application of Simulink in transient process analysis of transient electromagnetic field. *Coal Geology and Exploration*, 48(2), 209-215. (in English)
10. Luo X.-Q., Cheng S.-G., Cheng S.-G., Zhang Z.-H., Tang K. (2011). Study of similarity theory of geomechanical model test in electromagnetic field. *Rock and Soil Mechanics*, 32(4), 1035-1039. (in English)
11. Moschoudis, A. P., Tsekouras, G. J., & Kanellos, F. D. (2014). Design of particular electrical machines by using similarity theory and scale factors. *2014 International Conference on Electrical Machines (ICEM)* (pp. 269-275). DOI: <https://doi.org/10.1109/icelmach.2014.6960536> (in English)
12. Moschoudis, A. P., Tsekouras, G. J., Kanellos, F. D., & Kladas, A. G. (2016). Particular SRM Design Methodology Based on Similarity Theory, Scale Factors and FEM. *Materials Science Forum*, 856, 269-275. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.856.269> (in English)
13. Wang, H. M., Yang, B. F., Song, B. M., & Zhao, Y. N. (2011). Transient Simulation of Electromagnetic Field during EMCC Process. *Applied Mechanics and Materials*, 66-68, 189-193. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.66-68.189> (in English)
14. Wiesman, R., Fontana, R., Cope, D., & Gamble, B. (1995). Design and Demonstration of a Locally Commutated Linear Synchronous Motor. *SAE Transactions*, 104, 59-65. DOI: <https://doi.org/10.4271/951919> (in English)
15. Zhou, B., Liang, H., Miao, H., & Zang, C. (2019). Reduced-Scale Model Design for a High-Speed Rotor System Based on Similitude Theory *Proceedings of the ASME Turbo Expo 2019: Turbomachinery Technical Conference and Exposition. Volume 7A: Structures and Dynamics* (pp. 1-10). DOI: <https://doi.org/10.1115/gt2019-91112> (in English)

Надійшла до редколегії: 17.11.2023

Прийнята до друку: 21.03.2024

УДК 621.333:621.311

В. М. КОВАЛЬОВ^{1*}, Ю. В. КОВАЛЬОВА^{2*}

^{1*}Каф. «Автоматизовані електромеханічні системи», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», вул. Кирпичова, 2, Харків, Україна, 61002, тел. +38 (066) 222 05 58, ел. пошта kovalov1952@gmail.com, ORCID 0000-0001-5817-8790

^{2*}Каф. «Системи електропостачання та електроспоживання міст», Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, вул. Маршала Бажанова, 17, Харків, Україна, 61002, тел. +38 (066) 939 33 02, ел. пошта kovalova.jv@gmail.com, ORCID 0000-0002-2931-9176

Підвищення енергоефективності тягових електроприводів постійного струму

Мета. Робота спрямована на підвищення енергоефективності тягових електроприводів постійного струму електричного транспорту за рахунок упровадження транзисторних широтно-імпульсних перетворювачів (ШПП) з оптимальною частотою комутації для мінімізації загальних електричних втрат в електроприводі. Електричні втрати тягових електроприводів складаються з електричних втрат в обмотці якоря і в транзисторах ШПП. **Методика.** Для дослідження залежності від частоти комутації транзисторів електричні втрати в обмотці якоря і транзисторах ШПП розкладають на дві частини: статичні втрати від постійної складової струму і динамічні втрати, тобто втрати в обмотці якоря від гармонічних складових струму та втрати в транзисторах від перехідних струмів комутації. Оскільки динамічні електричні втрати в транзисторах у разі зростання частоти збільшуються, а в обмотці якоря зменшуються, то необхідно знайти оптимальну частоту комутації ШПП, за якої загальні динамічні втрати в тяговому електроприводі будуть мінімальними. Поставлена мета підвищення енергоефективності в тяговому електроприводі досягається визначенням залежності динамічних електричних втрат в обмотці якоря від частоти комутації ШПП та комп'ютерним моделюванням транзисторного електропривода. **Результати.** З'ясовано, що відносні динамічні електричні втрати в обмотці якоря в разі полігармонічного живлення дорівнюють квадрату коефіцієнта пульсацій струму якоря. Розроблено алгоритм визначення оптимальної частоти комутації ШПП: 1) на комп'ютерних моделях двигуна і ШПП експериментально визначають залежності динамічних електричних втрат від частоти комутації транзисторів; 2) на графіку залежності загальних динамічних електричних втрат транзисторного електропривода від частоти визначають точку мінімуму втрат, якій відповідає оптимальне значення частоти. **Наукова новизна.** Автори вперше отримали аналітичний вираз відносних динамічних електричних втрат в обмотках якоря, які дорівнюють квадрату коефіцієнта пульсацій струму якоря. **Практична значимість.** Встановлення оптимальної частоти комутації ШПП за розробленою методикою забезпечує зменшення електричних втрат у тягових електроприводах, тобто підвищує їх енергоефективність.

Ключові слова: широтно-імпульсний перетворювач (ШПП); частота комутації транзисторів; електричні втрати; коефіцієнт пульсацій струму; комп'ютерне моделювання

Вступ

В Україні до цього часу експлуатують велику кількість рухомого складу електричного транспорту (міські трамваї і тролейбуси, метрополітен, приміські електропоїзди, рудникові акумуляторні електровози, складські вантажопідйомні механізми тощо) з двигунами постійного струму (ДПС) послідовного збудження з реостатним керуванням.

Під час їх капітального ремонту доцільно проводити модернізацію для підвищення енергоефективності шляхом заміни реостатних релейно-контакторних систем керування системами керування з широтно-імпульсними пере-

творювачами (ШПП). Подальше підвищення загальної енергоефективності таких електроприводів можливе за рахунок вибору оптимальної частоти комутації транзисторів, за якої сума електричних втрат у транзисторах і в обмотках якоря буде мінімальною.

Таким чином, визначення оптимальної частоти комутації транзисторів ШПП є актуальним і практично доцільним.

Мета

Основна мета статті полягає в розробці методики розрахунку частоти комутації широтно-імпульсного перетворювача для зменшення дина-

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

мічних електричних втрат у тяговому транзисторному електроприводі постійного струму. Предмет дослідження – залежність електричних втрат в обмотках якоря від коефіцієнта пульсацій струму.

Методика

Напруга живлення ДПС в разі широтно-імпульсного керування має прямокутну форму і розкладається в ряд Фур'є, тому далі використовуємо поняття «полігармонічне живлення».

Електроенергія за полігармонічного живлення втрачається в напівпровідникових структурах транзисторних модулів та в омичному опорі обмоток якоря. Загальні електричні втрати в транзисторах і в обмотках якоря представляємо у вигляді статичних втрат від постійної складової струму та динамічних втрат в обмотках якоря від гармонік струму, а в транзисторах – від перехідних процесів у разі їх комутації.

Аналіз залежності електричних втрат у транзисторних модулях за умови змінної частоти комутації розглянуто у [2, 11, 12], де їх поділено на електричні втрати в структурах транзисторів та на втрати потужності в структурах зворотних діодів, тобто:

$$\Delta P_{mod} = \Delta P_{VT} + \Delta P_{VD}, \quad (1)$$

де ΔP_{mod} – загальні електричні втрати в силових транзисторних модулях; ΔP_{VT} – електричні втрати в самих транзисторах; ΔP_{VD} – електричні втрати у зворотних діодах.

Спрощені графіки процесу комутації струму та напруги в силових транзисторах показано на рис. 1.

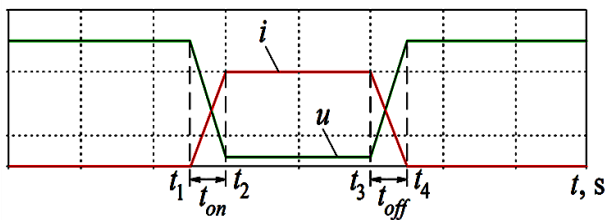


Рис. 1. Перехідні процеси струму та напруги в разі комутації транзисторів

Fig. 1. Transient processes of current and voltage during switching of transistors

При цьому електричні втрати транзистора поділяємо на статичні втрати в інтервалі провідності та на динамічні електричні втрати під час вмикання та вимикання транзистора, тобто:

$$\Delta P_{VT} = \Delta P_{ст} + \Delta P_{дт}, \quad (2)$$

де ΔP_{VT} – загальні електричні втрати транзисторах; $\Delta P_{ст}$ – статичні електричні втрати в інтервалі провідності транзистора; $\Delta P_{дт}$ – електричні втрати в динамічних режимах комутації.

Статичні електричні втрати в транзисторах в інтервалі їх провідності практично не залежать від частоти комутації, їх визначають як інтеграл добутку миттєвих напруги та струму колектора з виразу:

$$\Delta P_{ст} = \int_{t_2}^{t_3} (i_k \cdot u_k) dt, \quad (3)$$

де i_k, u_k – миттєві струм та напруга колектора; t_2, t_3 – інтервали провідності транзистора згідно з рис. 1.

У першому наближенні статичні електричні втрати в транзисторах визначають за формулою:

$$\Delta P_{ст} = I_0^2 R_T, \quad (4)$$

де I_0, R_T – постійна складова струму і прямий опір транзистора в режимі провідності.

Динамічні електричні втрати визначають інтегруванням добутків струму й напруги на інтервалах вмикання та вимикання транзистора:

$$\Delta P_{VT} = \int_{t_1}^{t_2} (i_{on} \cdot u_{on}) dt + \int_{t_3}^{t_4} (i_{off} \cdot u_{off}) dt, \quad (5)$$

де u_{on}, i_{on} – миттєві значення напруги та струму колектора під час вмикання транзистора; t_{on} – інтервал часу вмикання транзистора (рис. 1); i_{off}, u_{off} – миттєві значення напруги і струму колектора під час вимикання транзистора; t_{off} – інтервал вимикання транзистора (рис. 1).

Електричні статичні втрати у зворотних діодах визначають як інтеграл добутку миттєвих напруги та струму через діод:

$$\Delta P_{VD0} = \int_{t_1}^{t_2} (i_{VD0} \cdot u_{VD0}) dt, \quad (6)$$

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

де i_{VD0}, u_{VD0} – миттєві струм та спад напруги зворотного діода; $t_2 - t_3$ – інтервали провідності зворотного діода.

Електричні динамічні втрати у зворотних діодах визначають за виразом:

$$\Delta P_{DD} = \int_{t_1}^{t_2} (i_{on} \cdot u_{on}) dt + \int_{t_3}^{t_4} (i_{of} \cdot u_{of}) dt, \quad (7)$$

де u_{on}, i_{on} – миттєві значення напруги та струму діода під час вмикання; t_1, t_2 – інтервал часу вмикання діода; i_{of}, u_{of} – миттєві значення напруги та струму діода під час вимикання; t_3, t_4 – інтервал часу вимикання діода.

Розрахунок електричних втрат у силових транзисторах проводять за спеціалізованими програмами від підприємств-виробників силових транзисторів. У [2, 11, 12] з використанням спеціалізованого програмного забезпечення SemiSel від підприємства-виробника транзисторів проведено розрахунок статичних та динамічних електричних втрат для IGBT-транзистора типу SKM300GAR123D (виробництво компанії SEMIKRON: струм колектора 300 А, напруга 1 200 В, прямий опір колектор-емітер 4,7 мОм за 125 °С, напруга насичення 2,8 В).

За результатами розрахунків, отриманих у [2, 11, 12], апроксимовано графік відносних електричних динамічних втрат транзистора за формулою:

$$\Delta P_{дт}^* = \Delta P_{дт} / \Delta P_{ст} = K_{дт} f, \quad (8)$$

де $K_{дт}$ – коефіцієнт пропорційності, отриманий експериментально з графіка електричних динамічних втрат у транзисторі, $K_{дт} = 0,064$ Вт·Гц.

Проведемо аналіз публікацій щодо електричних втрат у ДПС за полігармонічного живлення. У [7] розглянуто модель для розрахунку електричних втрат у ДПС за полігармонічного живлення з урахуванням нелінійності кривої намагнічування сталі магнітопроводу якоря. Аналогічну модель запропоновано в [5] для транзисторного електропривода тролейбуса з двигунами змішаного збудження. У [14, 16] змодельовано магнітні втрати від вищих гармонік під час полігармонічного живлення. У [9] розглянуто теплову карту нагрівання обмоток тягових електро-двигунів за полігармонічного живлення. У [5]

проаналізовано електричні втрати за полігармонічного живлення та змінної частоти комутації і змінної ширини імпульсів транзисторного перетворювача. У [8] запропоновано вдосконалену модель електричних втрат тягового двигуна електровоза. У [13, 15] досліджено залежність коефіцієнта пульсацій напруги від ширини імпульсів живлення обмотки якоря. У [6] проведено аналіз провалів крутного моменту ДПС з постійними магнітами через неідеальність їх характеристик. У [1] запропоновано методику визначення оптимальної частоти комутації ШПП за допомогою виразів тривалостей наростання і спаду струму, які унеможливають її практичне використання, оскільки визначити час наростання і спаду фронтів струму в колі з індуктивністю аналітично неможливо.

З аналізу вищенаведеної літератури можна зробити такі висновки: 1) в основному розглядають лише моделювання втрат; 2) практичної методики визначення оптимальної частоти комутації транзисторів із метою зменшення електричних втрат не запропоновано. Таким чином, тема статті є актуальною.

Результати

Споживана потужність перетворюється в механічну на валу двигуна і на механічні, магнітні та електричні втрати. Пульсівна напруга живлення обмотки якоря не впливає на механічні втрати. У разі пульсових струмів обмотки якоря розрахунок магнітних втрат виконують за спрощеною формулою без їх розподілу на вихрові струми та на перемагнічування [4]:

$$P_{ст.v} = B_v^2 f_v^\beta, \quad (9)$$

де $P_{ст.v}$ – потужність магнітних втрат у сталі від дії v -ї гармоніки струму; B_v – v -а гармоніка магнітної індукції, яка зменшується зі зростанням частоти, f_v – частота v -ї гармоніки; $\beta = 1,3-1,5$ – показник ступеня для заданої марки електротехнічної сталі залежно від співвідношення втрат на вихрові струми та перемагнічування на частоті 50 Гц.

Потужність сумарних магнітних втрат визначають шляхом додавання втрат від дії кожної гармоніки.

Не враховуємо вплив на нагрівання обмотки якоря нагрівання сталі осердя якоря від магніт-

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

них втрат, спричинених гармоніками магнітного потоку.

Для аналізу електричних втрат у ДПС за пульсівної напруги живлення обмотки якоря від ШПП беремо узагальнений параметр, який впливає на електричні динамічні втрати і не залежать від потужності ДПС. Як узагальнений параметр виступає коефіцієнт пульсацій струму, який має три визначення за міжнародним стандартом ІЕК–60050–161 Міжнародної електротехнічної комісії. Для дослідження впливу пульсацій струму на динамічні електричні втрати використовуємо таке визначення: коефіцієнт пульсацій струму дорівнює відношенню суми діючих значень гармонік струму $\sqrt{\sum I_k^2}$ до постійної складової, тобто:

$$K_{\text{пс}} = \sqrt{\sum I_k^2} / I_0. \quad (10)$$

У разі полігармонічного живлення струм обмотки якоря визначають за формулою:

$$I_{\text{я}} = \sqrt{I_0^2 + \sum I_k^2}. \quad (11)$$

Виразимо діюче значення струму якоря через коефіцієнт пульсацій струму:

$$I_{\text{я}} = I_0 \sqrt{1 + K_{\text{пс}}^2}. \quad (12)$$

При цьому електричні втрати в ДПС розкладаємо на статичні від постійної складової струму та динамічні від гармонік струму, тобто:

$$\Delta P_{\text{я}} = \Delta P_{\text{ста}} + \Delta P_{\text{дин}} = I_0^2 R_{\text{я}} + \Delta P_{\text{дин}}. \quad (13)$$

Виразимо повні електричні втрати (13) у ДПС в разі живлення від ШПП відносно статичних втрат від постійної складової струму:

$$\Delta P_{\text{я}}^* = \frac{I_0^2 (1 + K_{\text{пс}}^2) R_{\text{я}}}{I_0^2 R_{\text{я}}} = 1 + K_{\text{пс}}^2. \quad (14)$$

Із виразу (14) видно, що відносні загальні електричні втрати зростають на величину відносних динамічних втрат, які чисельно дорівнюють квадрату коефіцієнта пульсацій струму. Тоді в іменованих одиницях динамічні електричні втрати від гармонік струму визначаються за формулою:

$$\Delta P_{\text{дин}} = K_{\text{пс}}^2 \Delta P_{\text{ста}}. \quad (15)$$

Коефіцієнт пульсацій струму в загальному випадку залежить від частоти f комутації транзисторів ШПП, від моменту навантаження на валу (постійна складова струму), від індуктивності кола якоря (електромагнітна стала) та від коефіцієнта заповнення імпульсу $\gamma = t_i/T$, де t_i – тривалість імпульсу, T – період комутації транзисторів.

У процесі експлуатації електропривода постійна (середня) складова струму і коефіцієнт відносної тривалості імпульсу змінюються випадковим чином. Беремо їх значення для подальшого розрахунку чисельно рівними середньостатистичним значенням: відносний струм навантаження $I/I_n = 0,6$, де I_n – номінальний струм. Коефіцієнт відносної тривалості імпульсу $\gamma = t_i/T = 0,5$.

Вищенаведений аналіз показує, що електричні динамічні втрати в ШПП збільшуються зі зростанням частоти, а в обмотці якоря зменшуються. Таким чином, повинно бути оптимальне значення частоти, за якої сумарні динамічні електричні втрати в транзисторному електроприводі будуть мінімальними.

Виходячи з вищевикладеного, складемо алгоритм розрахунку оптимальної частоти комутації транзисторів, яка забезпечує мінімізацію сумарних динамічних електричних втрат:

1) складають комп'ютерні моделі двигуна постійного струму і транзистора та шляхом комп'ютерного експерименту визначають залежності динамічних електричних втрат від частоти комутації;

2) за отриманими даними будують результативний графік залежності загальних динамічних електричних втрат транзисторного електропривода від частоти;

3) на результативному графіку визначають точку мінімуму втрат та відповідне їм оптимальне значення частоти комутації.

Використаємо як приклад запропоновану методику та визначимо оптимальну частоту комутації ШПП для електропривода трамвая з тяговим двигуном послідовного збудження типу ДК–261А: потужність $P = 60$ кВт; напруга обмотки якоря $U = 550$ В; частота обертання $n = 1460$ об/хв; номінальний струм якоря $I = 250$ А; омичний опір обмотки якоря $0,0316$ Ом, обмотки послідовного збудження $0,033$ Ом, обмотки додаткових полюсів

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

$R_{я} = 0,014$ Ом; загальна індуктивність кола якоря $L_{я} = 1,17$ мГн. Складемо модель транзисторного електропривода (рис. 2) в програмному пакеті Simulink [8], щоб отримати залежності коефіціє-

нта пульсацій струму від частоти для подальшого розрахунку динамічних електричних втрат в обмотці якоря двигуна постійного струму.

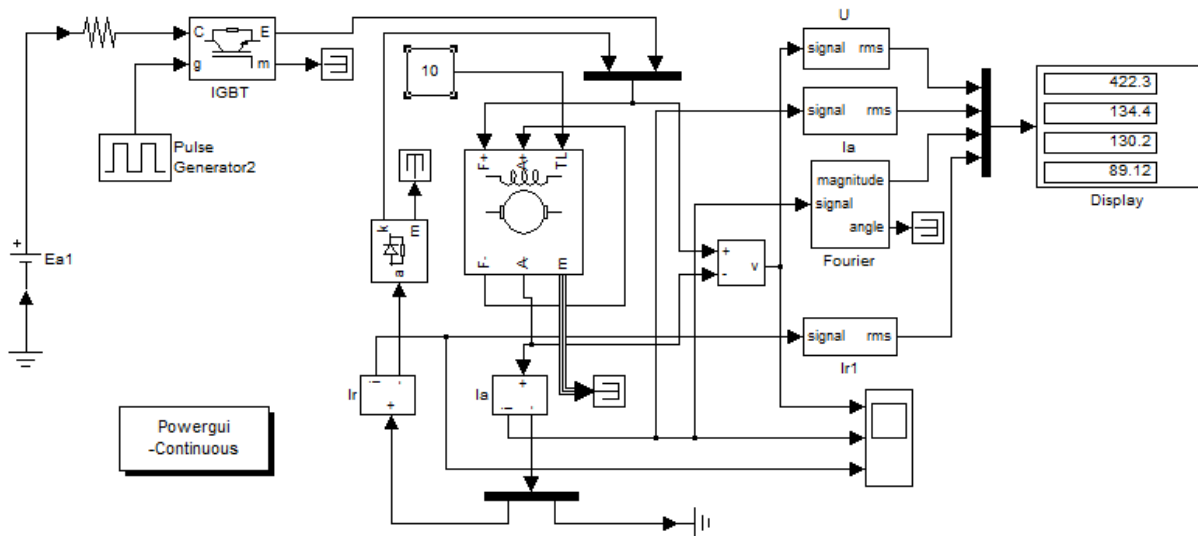


Рис. 2. Модель тягового електропривода трамвая для визначення коефіцієнта пульсацій струму

Fig. 2. Model of a tram traction electric drive for determining the current ripple coefficient

Комп'ютерний експеримент проведено таким чином. У діапазоні частот комутації ШПП від 100 до 1 100 Гц вимірювали діючі значення струму $I_{я}$ та їх постійні складові I_0 . Коефіцієнт пульсацій струму визначаємо за формулою:

$$K_{пс} = \sqrt{I_{я}^2 - I_0^2} / I_{я}. \quad (16)$$

У результаті комп'ютерного експерименту для відносного струму навантаження 0,6 від номінального і для коефіцієнта заповнення імпульсу $\gamma = 0,5$ отримано графіки залежностей коефіцієнта пульсацій струму якоря від частоти, які мають практично лінійний характер.

Статичні і динамічні втрати в транзисторі отримано в [3] в результаті розрахунків за спеціальною програмою Semisel, розробленою підприємством-виробником, і програмою в пакеті MatLab. Експериментальні значення електричних втрат отримано для постійної складової струму 100 А і для частоти 5 кГц. Використовуючи результати моделювання, побудуємо графіки залежностей динамічних втрат у транзисторі та в ДПС, які показано на рис. 3.

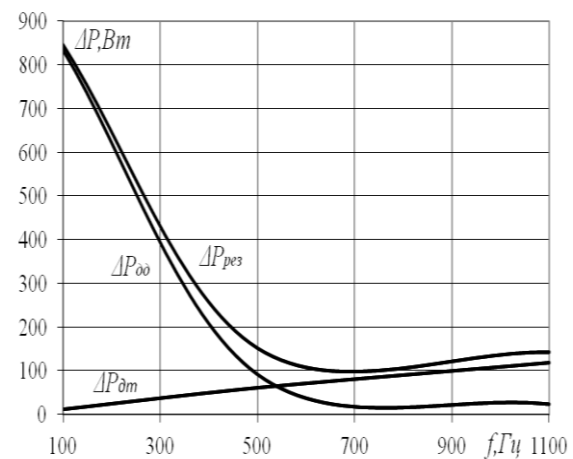


Рис. 3. Графіки залежності динамічних електричних втрат від частоти

Fig. 3. Graphs of dynamic electrical losses versus frequency

Із графіка на рис. 3 випливає, що сумарні електричні втрати потужності в транзисторному електроприводі є мінімальними за частоти 750 Гц.

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

Необхідно відзначити, що механічна потужність на валу двигуна також залежить від коефіцієнта пульсацій струму обмотки якоря, тобто чим більший коефіцієнт пульсацій струму, тим менша величина механічної потужності на валу двигуна. Це пояснюється тим, що гармоніки струму якоря створюють знакозмінний момент і не створюють крутного моменту на валу. Це означає, що в разі номінальної електричної потужності двигуна необхідно зменшувати механічну потужність на валу, інакше не буде забезпечено номінальний температурний режим обмотки якоря.

Наукова новизна та практична значимість

Автори вперше отримали аналітичний вираз для визначення відносних динамічних електричних втрат в обмотках якоря від гармонік струму, які дорівнюють квадрату коефіцієнта пульсацій струму якоря.

Визначення оптимальної частоти комутації ШПІ за розробленою методикою забезпечує зменшення електричних втрат у тягових електроприводах, тобто підвищує їх енергоефективність.

Висновки

У результаті проведених досліджень запропоновано методику для визначення оптимальної частоти комутації транзисторів, за якої забезпе-

чується мінімізація загальних динамічних електричних втрат у транзисторному електроприводі постійного струму. Алгоритм розрахунку полягає в такому:

1) складають комп'ютерні моделі двигуна постійного струму та транзисторного широтно-імпульсного перетворювача, на яких визначають залежності динамічних електричних втрат від частоти комутації;

2) за отриманими даними моделювання будують графік залежності загальних динамічних електричних втрат транзисторного електропривода від частоти;

3) на графіку визначають точку мінімуму втрат та відповідне їм оптимальне значення частоти комутації.

У підсумку отримано аналітичний вираз для розрахунку відносних динамічних електричних втрат в обмотці якоря за пульсівної напруги живлення якоря, за яким втрати дорівнюють квадрату пульсацій струму якоря.

Використання результатів роботи дозволить суттєво підвищити енергоефективність електроприводу, який широко експлуатують в Україні.

Зменшення споживання електроенергії дозволить заощаджувати енергоресурси та позитивно позначиться на екологічній ситуації в країні.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Глазенов Т. О. *Полупроводниковые преобразователи в электроприводах постоянного тока*. Киев : Техника, 1973. 304 с.
2. Жемеров Г. Г., Ивахно В. В., Ковальчук О. И. Расчет мощности потерь и температуры структуры транзисторно-диодных модулей при компьютерном моделировании преобразователей. *Електротехніка і електромеханіка*. 2011. № 4. С. 2129.
3. Островерхов М. Я., Пижев В. М. *Моделирование электромеханических систем в Simulink*. Киев : ВД «Стилос», 2008. 528 с.
4. Петренко А. Н., Танянский В. И., Петренко Н. Я. Дополнительные потери мощности частотно-управляемого асинхронного двигателя от высших гармоник напряжения. *Електротехніка і електромеханіка*. 2012. № 5. С. 34–35.
5. Bak Y., Lee K.-B. Reducing Switching Losses in Matrix Converter Drives: Discontinuous PWM Method. *Journal Power Electron*. 2018. Vol. 18, No. 5. P. 1325–1335.
6. Gervasio F., Mastromauro R., Liserre M. Power losses analysis of two-levels and three-levels PWM inverters handling reactive power. *IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)* (Seville, 17-19 March 2015). Seville, 2015. P. 1123–1128. DOI: <https://doi.org/10.1109/icit.2015.7125248>

7. Goolak S., Riabov Ie., Tkachenko V., Sapronova Natsionalnoh S., Rubanik I. Model of pulsating current traction motor taking into consideration magnetic losses in steel. *Electrical Engineering & Electromechanics*. 2021. No. 6. P. 11–17. DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272x.2021.6.02>
8. Goolak S., Sapronova S., Tkachenko V., Riabov I., Batrak Y. Improvement of the model of power losses in the pulsed current traction motor in an electric locomotive. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Vol. 6, No. 5 (108). P. 38–46. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.218542>
9. Gundabattini E., Mystkowski A., Idzkowski A., R. R. S., Solomon D. G. Thermal Mapping of a High-Speed Electric Motor Used for Traction Applications and Analysis of Various Cooling Methods-A Review. *Energies*. 2021. Vol. 14. P. 1–32. DOI: <https://doi.org/10.3390/en14051472>
10. Kharchenko V., Kostenko I., Liubarskyi B., Shaïda V., Kuravskyi M., Petrenko O. Simulating the traction electric drive operation of a trolleybus equipped with mixed excitation motors and a DC-DC converter. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Vol. 3, No. 9 (105). P. 46–54. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.205288>
11. Nerubatskyi V. P., Plakhtii O. A., Tugay D. V., Hordiienko D. A. Method for optimization frequency in frequency convertor. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2021. № 1. P. 103–111. DOI: <https://doi.org/10.33271/nvngu/2021-1/103>
12. Plakhtii, O. A., Nerubatskyi, V. P., Hordiienko, D. A., & Khoruzhevskyi, H. A. (2020). Calculation of static and dynamic losses in power IGBT-transistors by polynomial approximation of basic energy characteristics. *Naukovyi Visnyk Hirnychoho Universytetu*. 2020. № 2. P. 82–88. DOI: <https://doi.org/10.33271/nvngu/2020-82>
13. Raminosa T., Wiles R., Cousineau J. E., Bennion K., Wilkins J. A High-Speed High-Power-Density Non-Heavy Rare-Earth Permanent Magnet Traction Motor. *2020 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)* (Detroit, 11-15 Oct. 2020). Detroit, 2020. P. 61–67. DOI: <https://doi.org/10.1109/ecce44975.2020.9235704>
14. Rens J., Vandenbossche L., Dorez O. Iron Loss Modelling of Electrical Traction Motors for Improved Prediction of Higher Harmonic Losses. *World Electric Vehicle Journal*. 2020. Vol. 11. Iss. 1. P. 1–14. DOI: <https://doi.org/10.3390/wevj11010024>
15. Xue L. L., Su G.-J., Ozpineci B. DC-Ripple-Energy Adaptive-Minimization Modulation Scheme for a High Power Density Convertor. *IEEE Applied Power Electronics Conference (APEC)* (Phoenix, 14-17 June 2021). Phoenix, 2021. P. 186–191. DOI: <https://doi.org/10.1109/apec42165.2021.9487324>
16. Yamazaki K., Noiaki F. Torque and Loss Calculation of Rotating Machines Considering Laminated Core. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2011. Vol. 47. Iss. 5. P. 994–997. DOI: <https://doi.org/10.1109/tmag.2010.2089501>

V. M. KOVALOV^{1*}, YU. V. KOVALOVA²

^{1*}Dep. «Automated Electromechanical Systems», National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kirpychova St., 2, Kharkiv, Ukraine, 61002, tel. +38 (066) 222 05 58, e-mail kovalov1952@gmail.com, ORCID 0000-0001-5817-8790

²Dep. «Electricity supply and consumption systems in cities», O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Marshala Bazhanov Str., 17, Kharkiv, Ukraine, 61002, tel. +38 (066) 939 33 02, e-mail kovalova.jv@gmail.com, ORCID 0000-0002-2931-9176

Increasing the Energy Efficiency of Traction Electric Drives of Direct Current

Purpose. The work is aimed at improving the energy efficiency of direct current traction electric drives of electric transport by introducing transistor pulse width converters (PWC) with an optimal switching frequency to minimize total electrical losses in the electric drive. The electrical losses of traction electric drives consist of electrical losses in the armature winding and in the PWC transistors. **Methodology.** To study the dependence on the switching frequency of transistors, the electrical losses in the armature winding and PWC transistors are divided into two parts: static losses from the direct current component of the current and dynamic losses, i.e., losses in the armature winding from harmonic current components and losses in the transistors from transient switching currents. Since the dynamic electrical losses in transistors increase with increasing frequency and decrease in the armature winding, it is necessary to find the optimal PWC co-mutation frequency at which the total dynamic losses in the traction electric drive will be minimal. The goal of increasing energy efficiency in a traction electric drive is achieved by determining the dependence of dynamic electrical losses in the armature winding on the switching frequency of the PWC and computer modeling

of the transistor electric drive. **Findings.** It is found that the relative dynamic electrical losses in the armature winding in the case of polyharmonic power supply are equal to the square of the armature current ripple coefficient. An algorithm for determining the optimal switching frequency of the PWC is developed: 1) the dependence of dynamic electrical losses on the switching frequency of transistors is determined experimentally on computer models of the motor and PWC; 2) the graph of the dependence of total dynamic electrical losses of the transistor electric drive on the time-to-the point of minimum losses, which corresponds to the optimal frequency value, is determined. **Originality.** For the first time, the authors obtained an analytical expression for the relative dynamic electrical losses in the armature windings, which are equal to the square of the armature current ripple factor. **Practical value.** Establishing the optimal switching frequency of the PWC according to the developed methodology reduces electrical losses in traction electric drives, i.e., increases their energy efficiency.

Keywords: pulse width converter (PWC); transistor switching frequency; electrical losses; current ripple coefficient; computer modeling

REFERENCES

1. Glazenko, T. O. (1973). *Poluprovodnikovye preobrazovateli v elektroprivodakh postoyannogo toka*. Kyiv: Tekhnika. (in Russian)
2. Zhemerov, G. G., Ivakhno, V. V., & Kovalchuk, O. I. (2011). Raschet moshchnosti poter i temperatury struktury tranzistorno-diodnykh moduley pri kompyuternom modelirovanii preobrazovateley. *Electrical engineering and electromechanics*, 4, 21-29. (in Russian)
3. Ostroverkhov, M. Ya., & Pizhov, V. M. (2008). *Modelirovanie elektromekhanicheskikh sistem v Simulink*. Kyiv: VD «Stilos». (in Russian)
4. Petrenko, A. N., Tanyanskiy, V. I., & Petrenko, N. Ya. (2012). Dopolnitelnye poteri moshchnosti chastotno-upravlyаемого asinkhronnogo dvigatelya ot vysshikh garmonik napryazheniya. *Electrical engineering and electromechanics*, 5, 34-35. (in Russian)
5. Bak Y., Lee K.-B. (2018). Reducing Switching Losses in Matrix Converter Drives: Discontinuous PWM Method. *Journal Power Electron*, 18(5), 1325-1335. (in English)
6. Gervasio, F., Mastromauro, R. A., & Liserre, M. (2015). Power losses analysis of two-levels and three-levels PWM inverters handling reactive power. In *2015 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)* (pp. 1123-1128). Seville, Spain. DOI: <https://doi.org/10.1109/icit.2015.7125248> (in English)
7. Goolak, S., Riabov, Ie., Tkachenko, V., Sapronova, S., & Rubanik, I. (2021). Model of pulsating current traction motor taking into consideration magnetic losses in steel. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 6, 11-17. DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272x.2021.6.02> (in English)
8. Goolak, S., Sapronova, S., Tkachenko, V., Riabov, I., & Batrak, Y. (2020). Improvement of the model of power losses in the pulsed current traction motor in an electric locomotive. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6(5(108)), 38-46. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.218542> (in English)
9. Gundabattini, E., Mystkowski, A., Idzkowski, A. R., R. S., & Solomon, D. G. (2021). Thermal Mapping of a High-Speed Electric Motor Used for Traction Applications and Analysis of Various Cooling Methods-A Review. *Energies*, 14, 1-32. DOI: <https://doi.org/10.3390/en14051472> (in English)
10. Kharchenko, V., Kostenko, I., Liubarskyi, B., Shaida, V., Kuravskyi, M., & Petrenko, O. (2020). Simulating the traction electric drive operation of a trolleybus equipped with mixed excitation motors and a DC-DC converter. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(9(105)), 46-54. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.205288>
11. Nerubatskyi, V. P., Plakhtii, O. A., Tugay, D. V., & Hordiienko, D. A. (2021). Method for optimization of switching frequency in frequency converters. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 1, 103-110. DOI: <https://doi.org/10.33271/nvngu/2021-1/103> (in English)
12. Plakhtii, O. A., Nerubatskyi, V. P., Hordiienko, D. A., & Khoruzhevskyi, H. A. (2020). Calculation of static and dynamic losses in power IGBT-transistors by polynomial approximation of basic energy characteristics. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2, 82-88. DOI: <https://doi.org/10.33271/nvngu/2020-82> (in English)
13. Raminoso, T., Wiles, R., Cousineau, J. E., Bennion, K., & Wilkins, J. (2020). A High-Speed High-Power-Density Non-Heavy Rare-Earth Permanent Magnet Traction Motor. In *2020 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)* (pp. 61-67). Detroit, Michigan (USA). DOI: <https://doi.org/10.1109/ecce44975.2020.9235704> (in English)

14. Rens, J., Vandenbossche, L., & Dorez, O. (2020). Iron Loss Modelling of Electrical Traction Motors for Improved Prediction of Higher Harmonic Losses. *World Electric Vehicle Journal*, 11(1), 1-14. <https://doi.org/10.3390/wevj11010024> (in English)
15. Xue, L. L., Su, G.-J., & Ozpineci, B. (2021). DC-Ripple-Energy Adaptive-Minimization (DREAM) Modulation Scheme for a High Power Density Inverter. In *2021 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)* (pp. 186–191). Phoenix, AZ, USA. DOI: <https://doi.org/10.1109/apec42165.2021.9487324> (in English)
16. Yamazaki, K., & Noiaki, F. (2011). Torque and Loss Calculation of Rotating Mashines Considering Laminated Core. *IEEE Transactions on Magnetics*, 47(5), 994-997. DOI: <https://doi.org/10.1109/tmag.2010.2089501> (in English)

Надійшла до редколегії: 30.11.2023

Прийнята до друку: 28.03.2024

UDC 621.313.33:621.316.93

E. K. MANAFOV^{1*}, F. H. HUSEYNOV^{1,2*}

^{1*}Dep. «Energy and Automation», National Aviation Academy, Mardakan Av., 30, AZ1045, Baku, Azerbaijan, tel. (+994 12) 525 98 08, e-mail emanafov@naa.edu.az, ORCID 0000-0001-5697-577X

^{2*}Dep. «Electromechanical», Azerbaijan State Oil and Industry University, Azadliq Av., 20, AZ1010, Baku, Azerbaijan, tel. (+994 12) 493 45 57, e-mail fhuseynov@naa.edu.az, ORCID 0000-0002-5325-0279

Modeling of an Integrated Traction Motor Protection System

Purpose. The article is devoted to the creation of traction motor protection by modern methods and means based on a programmable logic controller (PLC). **Methodology.** To simulate motor fault monitoring in laboratory conditions, magnetic field and temperature sensors were installed on a small powerful induction motor, and then the data obtained from the sensors in normal and overloaded motor modes were analyzed. Based on the research, protection methods were developed. **Findings.** Previously used simple motor protection systems based on components such as timers, contactors, electromagnetic switches, voltage and current transformers were slow and inaccurate, and had low sensitivity. However, the production of PLCs and their application in this industry has eliminated these problems. The intensive operation of motors as the main executive equipment requires the creation of modern automated protection systems to ensure their reliable and stable operation. **Originality.** The paper improves the method of protection of traction motors based on the use of programmable logic controllers. In addition to the voltage and current parameters, the proposed method involves monitoring the magnetic field. It also provides for the possibility of adjusting the protection response time. As a result, in the event of overload, short circuit, and other non-standard situations, the improved method provides the system with the ability to make more accurate and reliable decisions. **Practical value.** The TIA Portal software package has modeled a traction motor protection system by temperature and current and considered its practical application. To make such systems more effective, in the future, comprehensive protection systems based on the diagnostic state of the traction motor can be developed. In addition, an effective system can be created by providing SCADA control of the engines of several vehicles simultaneously.

Keywords: traction motor; programmable logic controller (PLC); overload; magnetic field control; temperature control; overload; Hall sensor

Introduction

Electric motors are electromechanical machines used in industry and other fields to convert electrical energy into mechanical power. Electric motors are widely used in vehicles, machine tools, presses, cranes, escalators and elevators. Traction asynchronous motors used in transport are particularly distinguished from other traction electric motors by their high reliability, low maintenance requirements and high efficiency. Motor failure is mainly due to mechanical and electrical stress. Overloading, sudden and sharp load changes in motors cause mechanical stresses resulting in increased temperature, vibration and noise. Electric voltage can cause short circuit, temperature rise, phase loss etc. due to some other faults. Failure to prevent malfunctions and defects

in time leads to motor failure. This is unacceptable in important production areas, as well as in transport. Real-time automatic protection and control of motors is required for timely detection of abnormal conditions to reduce the number of breakdowns that lead to long downtimes and high motor overhaul costs. The main difficulty in creating such a protection system is its complex organization. The variation of the main parameters to be protected in a wide range depending on the motor load and operating mode directly affects the accuracy of the protection [4, 11, 12].

Traction electric motor (TEM) stopping due to any malfunction during operation creates great difficulties in traction. To avoid such problems, it is possible to predict failures in TEM. Based on the diagnosis of the technical condition of traction electric motors, a list of malfunctions should be

drawn up, and by determining the normal and threshold values of the main information parameters involved in the occurrence of these malfunctions, more reliable complex protection systems can be established in the future. With the application of such systems, it will be possible to monitor the changes occurring in the motors and draw conclusions about these changes by organizing regular diagnostic control of the motor parameters.

Currently, several methods are used to protect electric motors. The application of traditional protection systems in the protection of motors has some disadvantages. To overcome these shortcomings, modern protection systems should be developed according to the diagnostic status of motors. To overcome the problems of traditional protection systems, PLC (Programmable Logic Control) based protection systems can be applied to motor fault detection and protection.

Nowadays, system control in energy systems and several large enterprises is carried out based on SCADA. The main element of the SCADA system is the PLC. Considering the scope of use of PLCs, their application in motor protection is prospective. Below is a block diagram (see figure 1) for the protection of an electric motor based on PLC [1, 2, 4,15].

As shown in the block diagram, CT (current transformer), and PT (potential transformer) sensors are used to measure current and voltage, and LM35 sensors are used to measure temperature. The output of these sensors is fed to the PLC. In this protection method, online monitoring of the electric motor is carried out and all informative parameters – voltage, current and temperature are monitored. If all parameters are within the normal operating range, the PLC will continuously allow a three phase power supply to the motor.

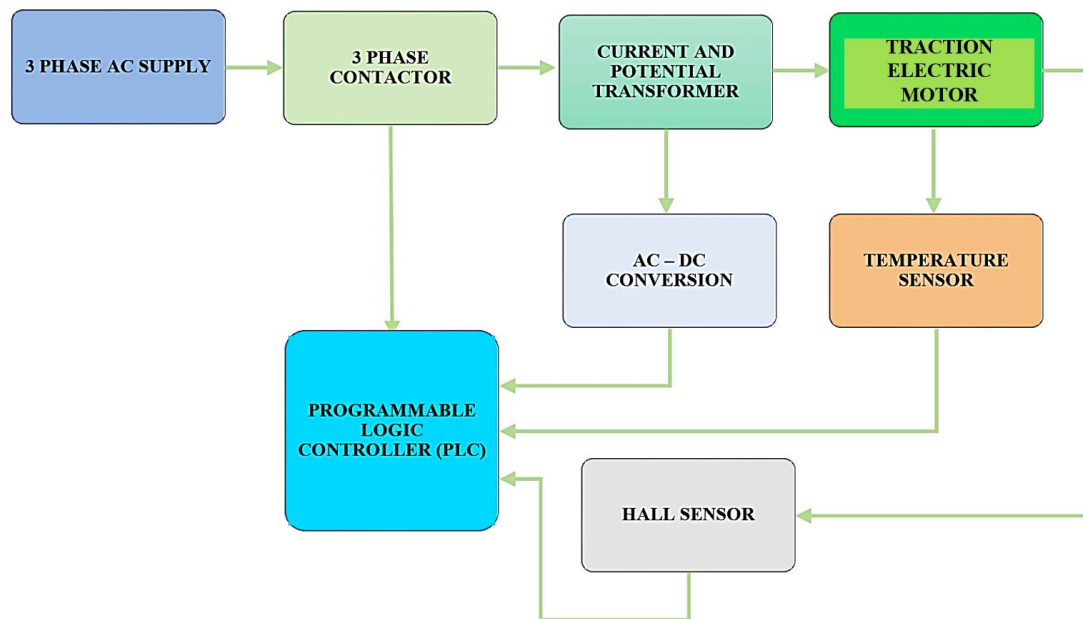


Fig. 1. Block diagram for protection of electric motor based on PLC

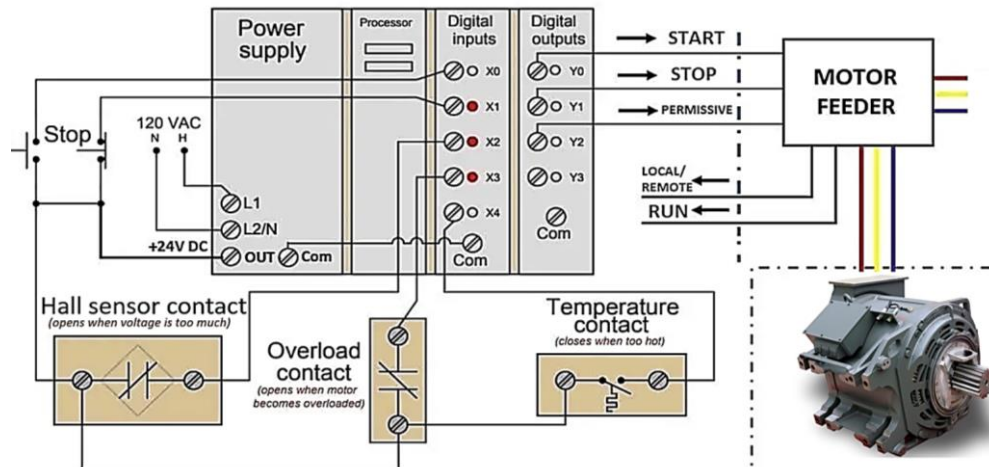


Fig. 2. Motor protection circuit based on PLC

However, if any abnormal mode is detected, the PLC will stop the induction motor by giving an opening signal to the magnetic contactor and relay according to the programmed conditions [2, 4, 13, 15].

Today, PLCs are continuously evolving and striving to be the best choice for various industrial automation applications. Since the PLC-based protection system is a reliable, fast, high-precision system, modern protection systems of traction electric motors based on PLC are studied in the article [3, 5, 8, 9].

Purpose

The article is dedicated to the organization of PLC (programmable logic controller)-based protection of the traction electric motor with modern methods and instruments. In order to simulate the control of a series of faults in the motor, magnetic field and temperature transmitters were installed on a small powerful asynchronous motor in laboratory conditions, the data received from the transmitters in the normal and overload modes of the motor were studied and protection was established.

Methodology

In the practical part of the research, a model of a modern protection system was created in laboratory conditions based on a small powerful

motor. Temperature, magnetic field (overload), current and voltage are taken as informative parameters for motor protection.

One of the most modern and promising methods chosen for constant control of the technical condition of the TEM during operation is magnetic field measurement and spectral analysis. In the laboratory, an experimental stand based on a small powerful motor was developed to simulate possible malfunctions of the TEM and control changes in the main parameters [6, 10, 13, 14]. The results of the analysis show that defects and malfunctions in the electric motor significantly affect the spectrum of the electromagnetic field generated outside it. By analyzing the spectrum of the external magnetic field, an idea can be made about the failure of the TEM. Research has prioritized the use of a Hall sensor as a sensor that allows non-contact diagnostics without interfering with the motor design. Thus, this sensor can be considered one of the most informative sensors that allows you to evaluate the condition of the motor by monitoring the electromagnetic spectrum. A traditional connection diagram for this type of sensor is shown in figure 3.

During the experimental studies, the use of KY-024 Hall sensor, distinguished by its performance, was preferred. The oscillograms of the magnetic field change in different modes of the motor studied using the KY-024 Hall sensor is shown in figure 4.

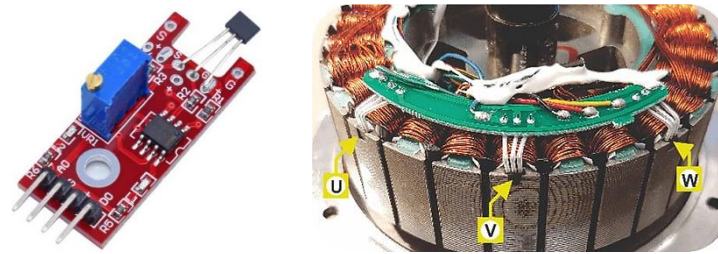
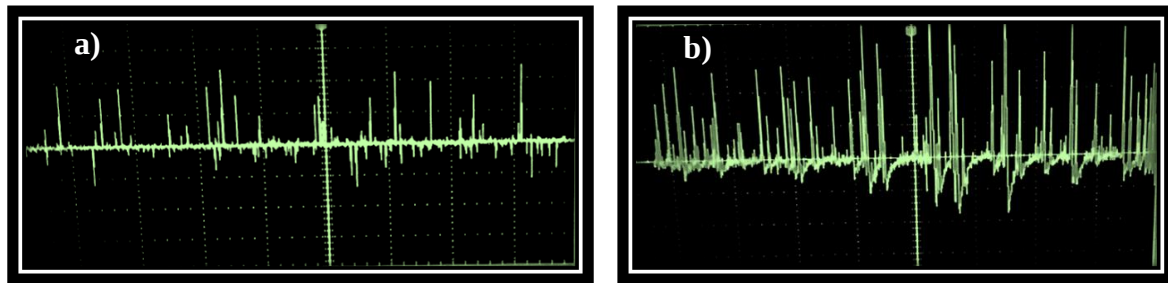


Fig. 3. Connection and constructive description of Hall sensor with motor

Fig. 4. Recorded oscillograms of magnetic field changes:
a – during normal operation; *b* – in case of overload

The oscillograms were recorded and analyzed using an oscilloscope.

As can be seen from the analysis of oscillograms, magnetic field control can be selected as one of the most important parameters for modern protection system of the motor.

Temperature control is one of the main diagnostic parameters of the TEM under study. The increase in temperature may depend on several parameters: failures in the bearing, overload, cessation of ventilation, etc. Several methods are used to measure temperature. These include fiber-optic temperature sensors, electrical resistance thermometers, thermography, thermocouple-based temperature sensors, and more [7, 10, 14].

When the operating temperature of the motor windings exceeds the heating limit of 100°C for any period of time, the service life of the stator and rotor windings is reduced by half. Temperature diagram for different insulation classes and schematic diagram of the temperature protection of traction motor studies are given in figure 5.

Findings

The most suitable method for temperature regulation in high-power motors, as well as in the studied TEM, is the use of thermocouples. During the study, the operation of the traction electric motor protection system was modeled using PLC in the TIA Portal:

- simulation of motor overload;
- simulation of activation of motor temperature protection;
- simulation of an electric motor protection system based on the magnetic field of the air gap between the rotor and stator;
- simulation of operation of motor overcurrent protection with time delay;
- simulation of activation of motor overcurrent protection with a time delay of 5 seconds.

The schematic diagram and design description of the thermocouple used in the experimental studies are given in figure 6. In normal conditions, the motor is controlled by the «Start» and «Stop» buttons. The motor's current and temperature protection system is simulated in the program, also measurement and control magnetic flux based on

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

hall sensor. If the value of the current reaches the maximum limit, the motor will be protected from the maximum current with a waiting period of 5 seconds. Also, if there is an overload in the motor due to the current, then the temperature is measured and, analogously, fan is automatically connected. After 10 seconds of fan operation, the temperature is measured again. If the measured temperature is equal to or greater than the previous value, the motor is protected. Otherwise, based on the diagnostic monitoring system, the warning system

starts and makes a decision about the real condition of the motor. That is, the obtained informative parameter is compared with other parameters.

We use hall sensor for measurement magnetic flux in air gap. So, output signal of hall sensor give us 2,5–6,5 V voltage depend on flux. When output voltage above 5V, we protect motor from increasing voltage. As mentioned, the proposed modern protection system is implemented according to the diagnostic situation.

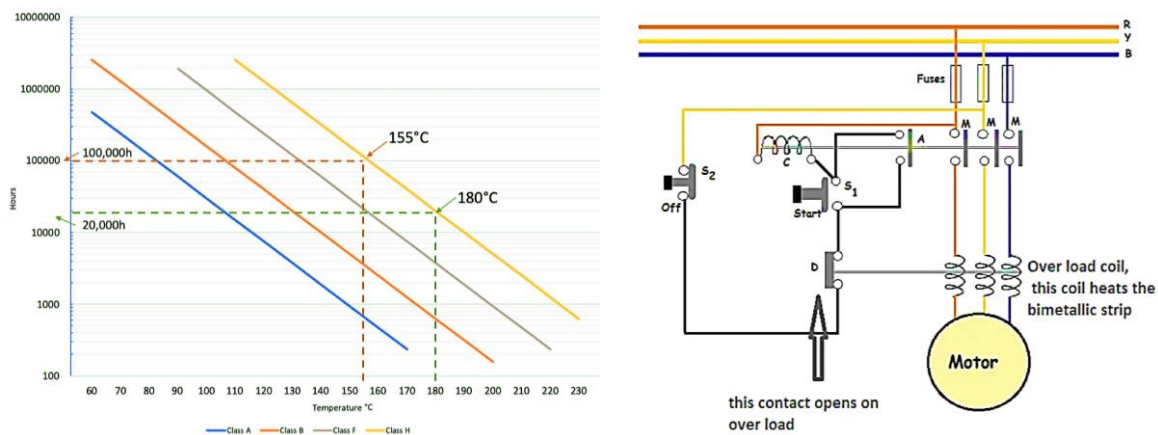


Fig. 5. Temperature diagram for different insulation classes and schematic diagram of the temperature protection of traction motor

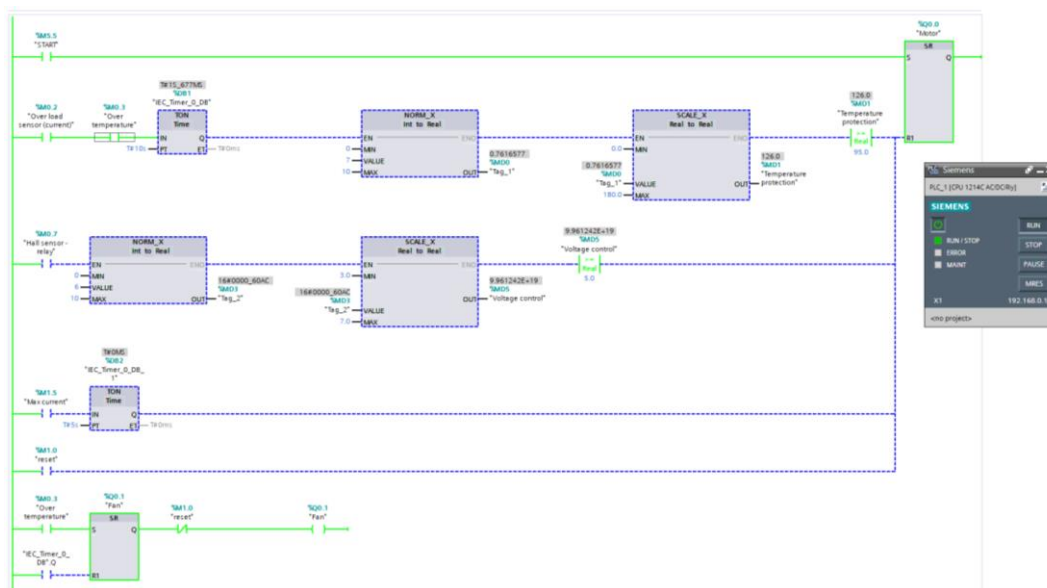


Fig. 6. Simulation of motor overload. When the motor is overloaded, using a signal from the temperature sensor, the fan turns on and tries to reduce the temperature to normal

As shown in the figure 6 and 7, the motor is started by pressing the START button and the motor is already under load. At this time, the temperature in the stator winding of the motor increases due to the effect of overload current. As we know, the increase in temperature value and exceeding the permissible limit is undesirable for the motor.

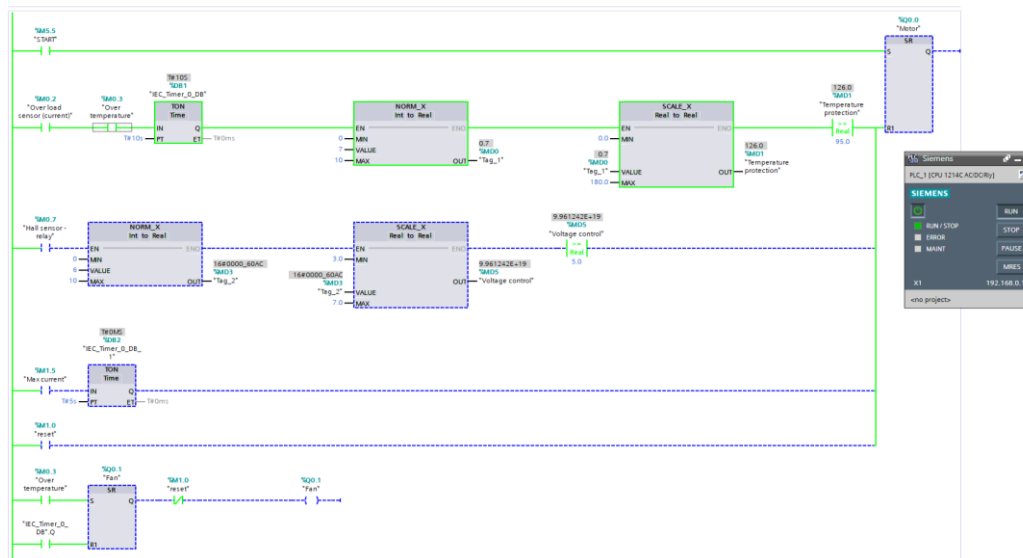


Fig. 7. Simulation of activation of motor temperature protection. After running the fan for 10 seconds, the motor temperature is measured again and compared with the normal value. If the temperature is still higher than normal, the motor temperature protection is activated

To prevent this, a temperature-based protection system is built. The maximum value for temperature is set at 95°C. When the temperature increases, the fan connects to the circuit and tries to reduce the temperature value to the previous level. In the program, the operating time of the fan is set to 10 sec. After 10 sec, the temperature is measured again by stopping the fan. If the temperature value is equal to or greater than the previous value, then the motor is protected due to temperature.

Another protection and control system is the measurement and control of the magnetic field in the air gap between the rotor and stator parts of the motor as shown in figure 8. A Hall sensor with a relay output is used in the practical part of the work to measure the magnetic field, and during normal and abnormal conditions, the output of the

sensor is evaluated diagnostically or the signal is processed for motor protection. In modeling, the maximum value of the output voltage of the sensor is set to 5 V. At voltage values equal to and greater than 5 V, the output signal of the sensor is used for motor protection.

As shown in figure 9 and 10, another parameter used for protection of the motor is the overcurrent protection with endurance time. When the value of the current reaches the maximum limit, the time relay protects the motor from the maximum current by counting the set time of 5 sec. As a result of the conducted experimental studies, the selected methods and tools will increase the effectiveness of the protection of traction motors, and more reliable working conditions of the motors will be provided.

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

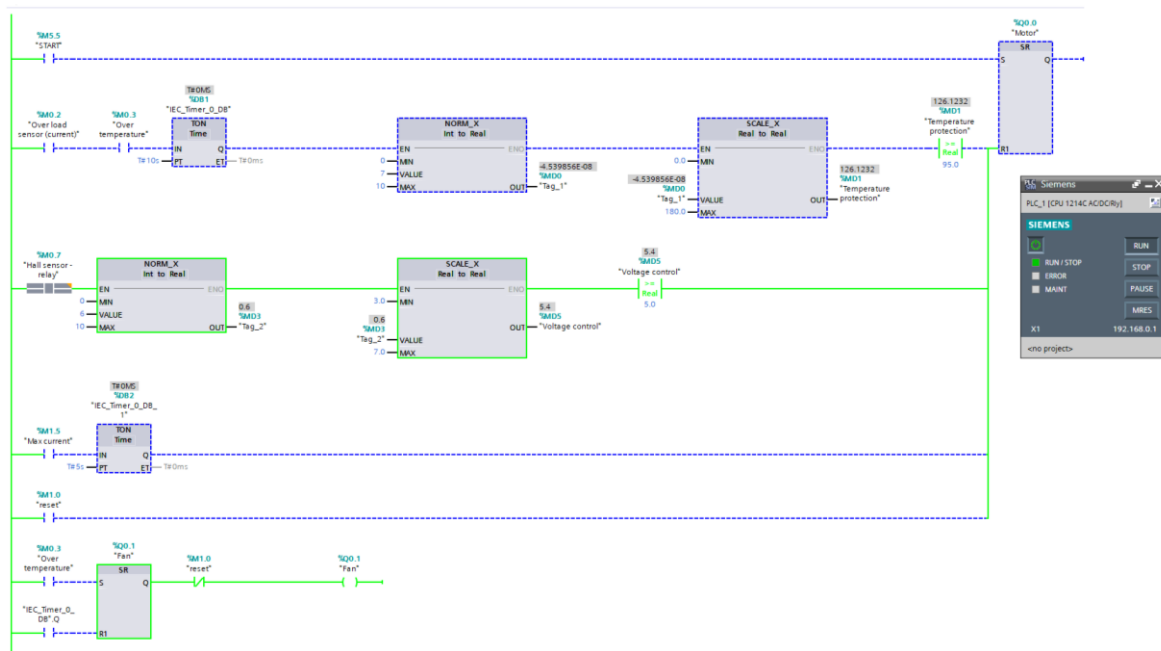


Fig. 8. Simulation of an electric motor protection system based on the magnetic field of the air gap between the rotor and stator (using Hall sensors)

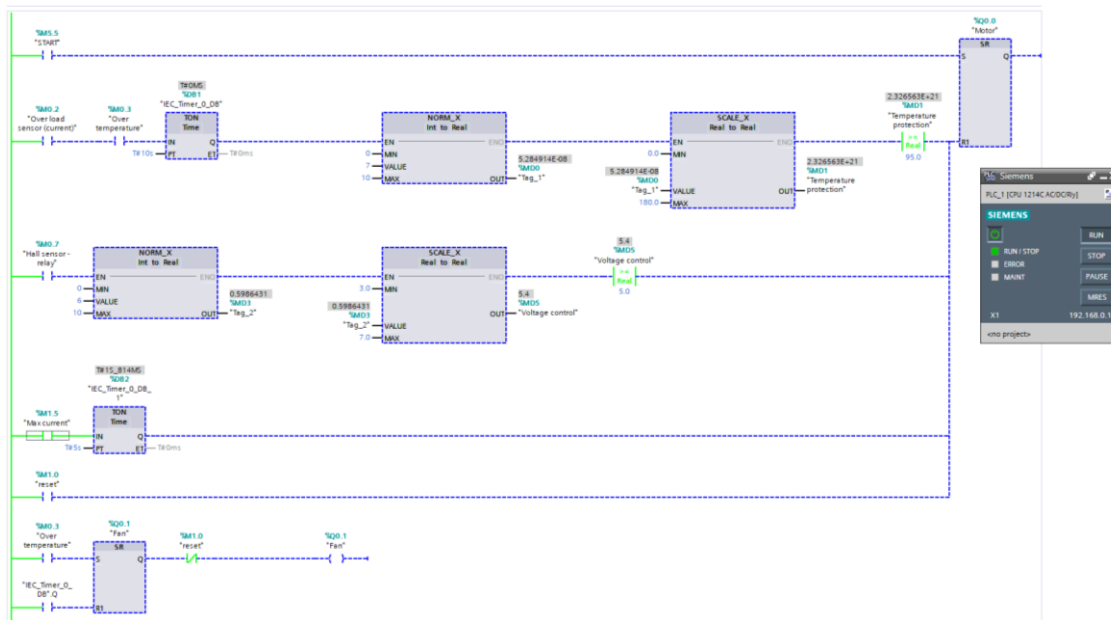


Fig. 9. Simulation of operation of motor overcurrent protection with time delay

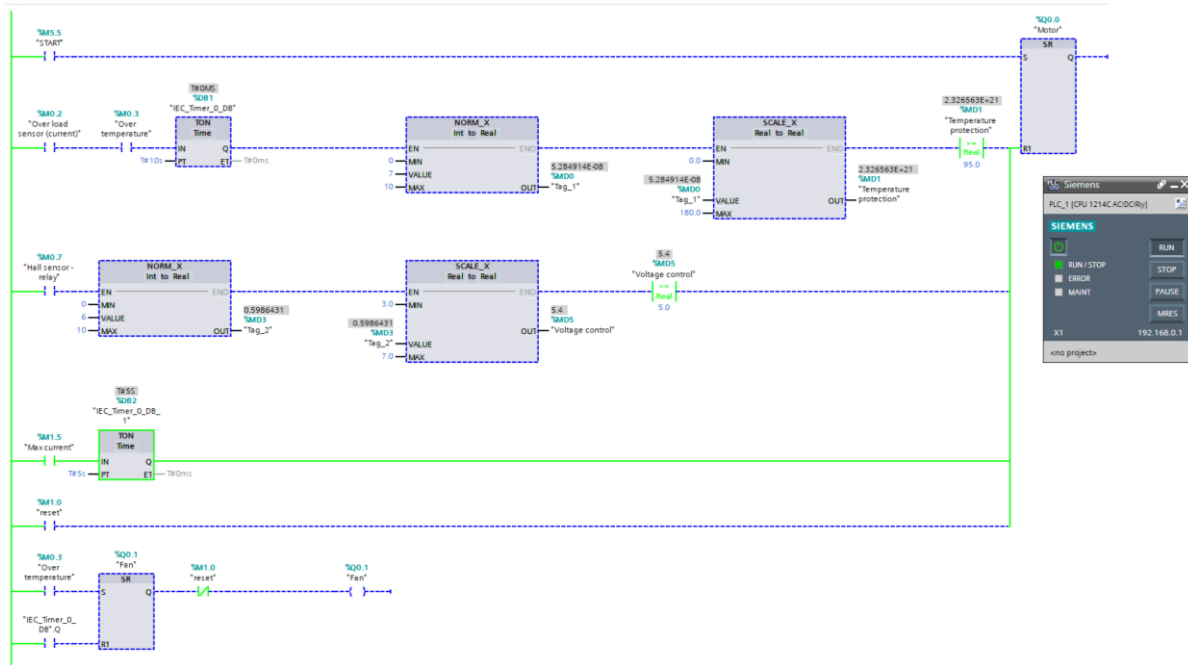


Fig. 10. Simulation of activation of motor overcurrent protection with a time delay of 5 seconds

Originality and practical value

The scientific novelty of the work consists in the fact that it improves the method of protection of traction motors based on the use of programmable logic controllers. In addition to the voltage and current parameters, the proposed method provides for monitoring the magnetic field. It also assumes the possibility of regulating the response time of the protection. As a result, in case of overload, short circuit and other non-standard situations, the improved method provides the system with the opportunity to make more accurate and reliable decisions.

The protection system of traction electric motors based on temperature and current was simulated in the TIA Portal software package, and its practical application was considered. In order for such systems to be more effective, complex protection systems can be developed based on the diagnostic status of the traction electric motor in the future. Also, an effective system can be established by providing SCADA control over the motors of several drag vehicles at the same time.

Conclusions

Thus, the modern protection system of traction electric motor is practically built on a small powerful motor based on PLC, and simulated in TIA Portal program. In addition to voltage, current and temperature parameters, as well as magnetic field monitoring as a diagnostic parameter, the PLC can also provide protection based on other parameters.

PLCs can be integrated into a SCADA system using communication modules to provide simultaneous control of several traction motors. One of the key features of SCADA is the ability to monitor the entire system in real time. The main purposes of using this system are to collect data, display them on the monitor screen in the control room, store the relevant data on the hard disk of the master computer, and provide the ability to control field devices (remote or local). SCADA systems are equipped to make instant adjustments to the operating system, which increases equipment life, reduces the need for costly repairs, and reduces downtime. Thus, it is possible to control various

parameters of the motor in real time from the SCADA system and, if necessary, monitor the technical condition of the motor from the computer screen. As mentioned, in order to organize deeper

protection of electric motors and increase accuracy, new hybrid complex protection systems should be built according to the diagnostic situation.

LIST OF REFERENCE LINKS

1. Bhosale Bh. S., Burad M. V., Chavan A. B., Baji R. N. Automation and protection of induction motor by using PLC. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*. 2018. Vol. 05. Iss. 4. P. 3672–3675.
2. Bin W. A survey on AC motors online fault identification. *Motion Control Conferences*. 2018. Vol. 3. P. 1353–1358.
3. Jadhav S. S., Khillare S. S. Design of PLC and SCADA based Fault Detection and Protection for Induction Motor. *International Journal of Motorering Science and Computing*. 2017. Vol. 7. Iss. 9. P. 14246–14252.
4. Kumar D., Basit A., Saleem A., Abbas Engr. G. PLC Based Monitoring & Protection of 3- Phase Induction Motors against Various Abnormal Conditions. *2019 2nd International Conference on Computing, Mathematics and Engineering Technologies (iCoMET)* (Sukkur, 30-31 Jan. 2019). Sukkur, 2019. P. 294–298. DOI: <https://doi.org/10.1109/icomet.2019.8673497>
5. Mahanta B., Gouda S. K., Sahu S. S. Design of Intelligent Induction Motor Protection System using PLC and SCADA. *International Journal of Scientific Research in Science and Technology*. 2018. Vol. 4. Iss. 4. P. 575–580.
6. Manafov E. K., Isgandarov I., Huseynov F. Investigating the protection system of electric motors based on its main working parameters. *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*. 2022. Vol. 115. P. 63–74. DOI: <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2022.115.5>
7. Manafov E., Huseynov F. Application of artificial neuron networks and fuzzy logic in diagnostic and forecasting the technical condition of traction motors. *Journal of social research & behavioral sciences*. Vol. 27. Iss. 06. P. 233–239. DOI: <https://doi.org/10.36962/piretc27062023-233>
8. Mekonnen S. J., Reddy S. G. Remote Monitoring and Control of Induction Motor using PLC and SCADA. *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Motorering*. 2014. Vol. 3. Iss 9. P. 9358–9366.
9. Narváez-Guerra N. P., Herrera-Vega J. A., Martínez-Flores J. A. Remote monitoring and control of three-phase induction motors using a low-cost PLC and SCADA system. *IEEE Latin America Transactions*. 2019. Vol. 17, No. 3. P. 385–391.
10. Negrea M. D. *Electromagnetic flux monitoring for detecting faults in electrical machines* : doctoral dissertation. Helsinki University of Technology, Laboratory of Electromechanics. 2006. 142 p.
11. Pradeep A., Thomas E., Mohan K. Protection of Induction Motor From Abnormal Conditions using PLC. *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Motorering*. 2017. Vol. 6. Iss. 4. P. 2570–2574.
12. Rode A. K., Pathe M. S. Fault Detection and Protection of Induction Motor by using PLC. *International Journal of Research in Motorering, Science and Management*. 2019. Vol. 3. Iss. 7.
13. Saad N., Ibrahim R. Development of intelligent condition monitoring system for AC induction motors using PLC. *IEEE Business Motorering and Industrial Applications Colloquium (BEIAC)*. 2018. Vol. 5. P. 1466–1472.
14. Shashidhara S. M., Raju P. S. Stator Winding Fault Diagnosis of Three Phase Induction Motor by Park's Vector Approach. *Internatonal Journal of Advance Research In Electircal Electronics and Instrumentation Motorering*. 2013. Vol. 2. Iss. 7. P. 2901–2906.
15. Yadava G. S., Singh B. A survey of stator fault analysis techniques for AC motors. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2010. Vol. 20. Iss. 2. P. 106–111.

Е. К. МАНАФОВ^{1*}, Ф. Х. ГУСЕЙНОВ^{2*}

^{1*}Каф. «Енергетика та Автоматика», Національна авіаційна академія, пр. Мардакан, 30, Баку, Азербайджан, AZ1045, тел. (+994 12) 525 98 08, ел. пошта emanafov@naa.edu.az, ORCID 0000-0001-5697-577X

^{2*}Каф. «Електромеханіка», Азербайджанський державний університет нафти та промисловості, пр. Азадлик, 20, Баку, Азербайджан, AZ1010, тел. (+994 12) 493 45 57, ел. пошта fhuseynov@naa.edu.az, ORCID 0000-0002-5325-0279

Модельовання комплексної системи захисту тягових двигунів

Мета. Стаття присвячена створенню захисту тягового електродвигуна сучасними методами та засобами на основі програмованого логічного контролера (ПЛК). **Методика.** Для моделювання контролю за несправностями двигуна в лабораторних умовах на невеликому потужному асинхронному двигуні було встановлено датчики магнітного поля і температури, потім проаналізовано дані, отримані від датчиків у нормальному і перевантаженому режимах двигуна. На підставі досліджень були розроблені методи захисту. **Результати.** Використовувані раніше прості системи захисту електродвигунів на основі таких компонентів, як таймери, контактори, електромагнітні перемикачі, трансформатори напруги та струму, були повільними та неточними, а також мали низьку чутливість. Проте виробництво ПЛК та їх застосування в цій галузі усунули вказані проблеми. Інтенсивна експлуатація двигунів як основного виконавчого обладнання вимагає створення сучасних автоматизованих систем захисту для забезпечення їх надійної і стабільної роботи. **Наукова новизна.** У роботі вдосконалено метод захисту тягових електродвигунів на основі використання програмованих логічних контролерів. На додаток до параметрів напруги та сили струму запропонований метод передбачає моніторинг магнітного поля. Також він передбачає можливість регулювання часу спрацьовування захисту. У результаті в разі перевантаження, короткого замикання та інших нестандартних ситуацій удосконалений метод забезпечує системі можливість приймати більш точні та надійні рішення. **Практична значимість.** У програмному комплексі ТІА Portal змодельовано систему захисту тягових електродвигунів за температурою та струмом та розглянуто її практичне застосування. Щоб такі системи були більш ефективними, у майбутньому можуть бути розроблені комплексні системи захисту на основі діагностичного стану тягового електродвигуна. Крім того, ефективну систему можна створити, забезпечивши керування SCADA двигунами кількох транспортних засобів одночасно.

Ключові слова: тяговий електродвигун; програмований логічний контролер (ПЛК); перевантаження; контроль магнітного поля; контроль температури; перевантаження; датчик Холла

REFERENCES

1. Bhosale, Bh. S., Burad, M. V., Chavan, A. B., & Baji, R. N. (2018). Automation and protection of induction motor by using PLC. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 05(4), 3672-3675. (in English)
2. Bin, W. (2018). A survey on AC motors online fault identification. *Motion Control Conferences*, 3, 1353-1358. (in English)
3. Jadhav, S. S., & Khillare, S. S. (2017). Design of PLC and SCADA based Fault Detection and Protection for Induction Motor. *International Journal of Motororing Science and Computing*, 7(9), 14246-14252. (in English)
4. Kumar, D., Basit, A., Saleem, A., & Abbas, Engr. G. (2019). PLC Based Monitoring & Protection of 3-Phase Induction Motors against Various Abnormal Conditions. In *2019 2nd International Conference on Computing, Mathematics and Engineering Technologies (ICoMET)* (pp. 294-298). Sukkur, Pakistan. DOI: <https://doi.org/10.1109/icomet.2019.8673497> (in English)
5. Mahanta, B., Gouda, S. K., & Sahu, S. S. (2018). Design of Intelligent Induction Motor Protection System using PLC and SCADA. *International Journal of Scientific Research in Science and Technology*, 4(4), 575-580. (in English)

6. Manafov, E., & Huseynov, F. (2023). Application of artificial neuron networks and fuzzy logic in diagnostic and forecasting the technical condition of traction motors. *Journal of social research & behavioral sciences*, 27(06), 233-239. DOI: <https://doi.org/10.36962/piretc27062023-233> (in English)
7. Manafov, E., Isgandarov, I., & Huseynov, F. (2022). Investigating the protection system of electric motors based on its main working parameters. *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*, 115, 63-74. DOI: <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2022.115.5> (in English)
8. Mekonnen, S. J., & Reddy, S. G. (2014). Remote Monitoring and Control of Induction Motor using PLC and SCADA. *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Motoreringol*, 3(9), 9358-9366. (in English)
9. Narváez-Guerra, N. P., Herrera-Vega, J. A., & Martínez-Flores, J. A. (2019). Remote monitoring and control of three-phase induction motors using a low-cost PLC and SCADA system. *IEEE Latin America Transactions*, 17(3), 385-391. (in English)
10. Negrea, M. D. (2006). *Electromagnetic flux monitoring for detecting faults in electrical machines* (Doctoral dissertation). Helsinki University of Technology, Laboratory of Electromechanics. (in English)
11. Pradeep, A., Thomas, E., & Mohan, K. (2017). Protection of Induction Motor From Abnormal Conditions using PLC. *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Motorering*, 6(4), 2570-2574. (in English)
12. Rode, A. K., & Pathe, M. S. (2019). Fault Detection and Protection of Induction Motor by using PLC. *International Journal of Research in Motorering, Science and Management*, 3(7). (in English)
13. Saad, N., & Ibrahim, R. (2018). Development of intelligent condition monitoring system for AC induction motors using PLC. *IEEE Business Motorering and Industrial Applications Colloquium (BEIAC)*, 5, 1466-1472. (in English)
14. Shashidhara, S. M., & Raju, P. S. (2013). Stator Winding Fault Diagnosis of Three Phase Induction Motor by Park's Vector Approach. *Internatonal Journal of Advance Research In Electirical Electronics and Instrumentation Motorering*, 2(7), 2901-2906. (in English)
15. Yadava, G. S., & Singh, B. (2010). A survey of stator fault analysis techniques for AC motors. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 20(2), 106-111. (in English)

Received by the editorial board: 02.11.2023

Accepted for publication: 05.03.2024

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

УДК 656.216.2.027:656.25-048.35

М. Б. КУРГАН¹, О. Ф. ЛУЖИЦЬКИЙ², Р. В. ІВАНОВ³, Н. П. ХМЕЛЕВСЬКА⁴,
В. С. ХМЕЛЕВСЬКИЙ⁵

¹Каф. «Транспортна інфраструктура», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 48, ел. пошта kunibor@gmail.com, ORCID 0000-0002-8182-7709

²Каф. «Транспортна інфраструктура», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 48, ел. пошта oleg.luzhickii@gmail.com, ORCID 0000-0001-6519-7447

³Каф. «Транспортна інфраструктура», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 48, ел. пошта ivanovrodion@ukr.net, ORCID 0009-0005-9125-9468

⁴Каф. «Транспортна інфраструктура», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 48, ел. пошта hmelevnela@gmail.com, ORCID 0000-0002-2360-8671

⁵Каф. «Транспортна інфраструктура», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 48, ел. пошта Junkpff@gmail.com, ORCID 0009-0000-3221-6955

Упровадження інноваційних технологій під час модернізації наявних переїздів для організації швидкісного руху поїздів

Мета. Основна мета роботи – огляд інноваційних технологій для підвищення безпеки на перетині залізничних колій з автомобільними дорогами. Об'єктом дослідження є процеси функціонування – залізничних переїздів за різної інтенсивності і параметрів руху транспорту, що вимагають вирішення досить широкого кола завдань теоретичного, практичного й організаційного плану. **Методика.** Дослідження ґрунтується на теорії математичного моделювання та чисельних методах розрахунків на ЕОМ. Предметом дослідження є показники, що дозволяють оцінити стан безпеки після проведеної модернізації чи нових проєктних рішень. **Результати.** Запропоновано модель удосконаленого методу підсумкового коефіцієнта, що дозволяє прогнозувати зміни у вихідних даних та отримувати різні значення підсумкового коефіцієнта, а отже, планувати заходи з упровадження інноваційних технологій, що підвищують безпеку руху на переїздах. Закриття залізничних переїздів або перехід на дворівневий перетин залізниці й автодороги (шляхопроводи) – це єдиний спосіб повністю усунути ризик. Однак практично неможливо негайно закрити всі залізничні переїзди. Крім фінансових та практичних обмежень, зручність користувача все ще має бути ключовим фактором. Використовуючи методи ієрархій, мозкового штурму та інші, можна визначати надійний набір показників для оцінки й забезпечення загальної безпеки пасажирів і транспорту, пов'язаних з усіма аспектами проєктування, будівництва, обслуговування та експлуатації залізничної мережі. Упровадження інноваційних технологій під час модернізації наявних переїздів є важливим кроком на шляху до організації швидкісного руху поїздів. Ці технології дозволять підвищити рівень безпеки руху на залізничних переїздах і захистити життя людей. **Наукова новизна.** Вирішено науково-прикладну задачу щодо впровадження інноваційних технологій під час модернізації наявних переїздів для організації швидкісного руху поїздів. **Практична значимість.** Реалізація обґрунтованої технології модернізації наявних переїздів забезпечить значне підвищення безпеки руху транспорту і пропускної спроможності.

Ключові слова: залізничний переїзд; інтенсивність руху транспорту; життєвий цикл; зносостійкість; кліматичні умови; безпека дорожнього руху

Вступ

Актуальність дослідження впливає з Національної транспортної стратегії України на період до 2030 року. Загальна мета Стратегії полягає у визначенні концептуальних засад формування та реалізації державної політики в галузі транспорту, спрямованих на створення інтегрованого до світової транспортної мережі ефективного транспортного комплексу України. Для досягнення цієї мети будуть реалізовані стратегічні цілі за окресленими пріоритетними напрямками, одним із яких є : підвищення рівня безпеки на транспорті [9].

Безпека на залізницях є надзвичайно складною та багатогранною концепцією. Це один із найважливіших критеріїв стійкої роботи залізниць як складної транспортної системи.

Загальні проблеми, що потребують розв'язання, – це недосконалість систем управління безпекою на транспорті; відсутність систем моніторингу дорожньо-транспортних пригод, їх статистики та управління ризиками; високий рівень смертності і травматизму в результаті дорожньо-транспортних пригод.

На залізничних переїздах частими є порушення безперервності руху автомобільного транспорту, а в деяких випадках і залізничного транспорту, що призводить до збільшення споживання енергії, більшого забруднення навколишнього середовища, втрати часу пасажирів і персоналу, зменшення пропускної спроможності. До негативних наслідків також належать витрати на утримання залізничного переїзду, а також витрати, пов'язані з окремими інвестиційними проєктами. Зрозуміло, що існує багато проблем, пов'язаних із залізничними переїздами, але головною проблемою є стале управління безпекою руху [9].

Щороку понад 330 людей гинуть у понад 1 200 ДТП на залізничних переїздах у Європейському Союзі. Переїзди були визначені як слабе місце дорожньої інфраструктури, яке серйозно впливає на безпеку дорожнього руху. У випадку залізничного транспорту аварії на залізничних переїздах спричиняють до 50 % усіх смертельних випадків. Щоб мінімізувати поточну статистику аварій, Європейська комісія реалізувала проєкт SELCAT (Safer European

Level Crossing Appraisal and Technology). Кепі-вним партнером проєкту був Технічний університет Брауншвейга (Німеччина). Іншими партнерами були Міжнародний союз залізниць (UIC), Французький національний інститут дорожньої безпеки (INRETS) та Британська асоціація залізничного транспорту (RSSB) [21]. SELCAT мав намір забезпечити базу знань для підвищення безпеки залізничних переїздів шляхом проведення аналізу результатів проєктів, пов'язаних із безпекою, із реалізацією від п'ятої та шостої рамкових програм досліджень FP5 та FP6 Європейського Союзу. Ці програми фінансують дослідження і розробки у різних галузях, включаючи залізничний та автомобільний транспорт. Ось деякі з ключових результатів проєкту SELCAT: розроблено єдиний підхід до класифікації аварій на залізничних переїздах: оцінено ефективність різних типів залізничних переїздів; виявлено, що автоматичні залізничні переїзди є найбільш ефективними у зниженні кількості аварій; розроблено рекомендації щодо впровадження систем автоматичного контролю за станом переїздів, які допоможуть залізничним операторам та органам влади підвищити рівень безпеки залізничних переїздів.

Результати проєкту SELCAT показали, що автоматичні залізничні переїзди можуть знизити кількість аварій на 70–80 %. Це робить їх одним із найефективніших заходів безпеки, які можна впровадити для зниження ризику аварій на залізничних переїздах.

Перший проєкт SELCAT Європейська комісія реалізувала в рамках шостої рамкової програми досліджень і розробок із 2006 по 2008 рік. Він був спрямований на оцінку ефективності наявних заходів безпеки на залізничних переїздах та розробку рекомендацій щодо впровадження нових заходів безпеки.

Другий проєкт SELCAT Європейське агентство реалізувало з безпеки залізничного транспорту (ERA) в рамках своєї програми досліджень і розробок в період із 2017 по 2022 рік. Він був спрямований на оцінку передових технологій підвищення безпеки руху на залізничних переїздах у Європі [10].

Україна є однією з країн, які беруть участь у проєкті SELCAT. У рамках проєкту в Україні

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

було проведено оцінку ефективності передових технологій підвищення безпеки руху на залізничних переїздах. Результати оцінки показали, що сучасні технології можуть значно підвищити безпеку руху на залізничних переїздах в Україні.

Порівнюючи середні дані ДТП на залізницях Європи й України за останні 5 років, доходимо висновку, що кількість ДТП на 1000 км залізничної колії, кількість загинувших і постраждалих у ДТП на 1 000 км залізничної колії вдвічі вища в Україні.

Є кілька факторів, які можуть пояснити ці відмінності. Одним із факторів є різниця в ширині колії, що ускладнює переміщення вантажів між Україною та Європою та може призвести до збільшення кількості ДТП. Іншим фактором є різниця в законодавстві та нормативній базі. У Європі існують суворіші правила безпеки на залізницях, ніж в Україні. Наприклад, у Європі заборонено проїзд по залізничних переїздах, якщо шлягбауми закриті або світлофори показують заборонний сигнал. В Україні такі правила існують, але їх не завжди виконують.

«Вузькими місцями» на транспортних коридорах є велика кількість переїздів через залізниці, а також відсутність об'їзних доріг у деяких містах України. Тому залізничні переїзди на цьому етапі слід сприймати як необхідність та вживати всіх доступних заходів, щоб зменшити негативні наслідки.

В умовах подальшої інтенсифікації залізничного транспорту все більше уваги слід приділяти проблемі гарантування безпеки руху на залізничних переїздах, досягти якої можна в разі комплексного використання організаційних і технічних заходів, впровадження нового та модернізації наявного обладнання, будівництва шляхопроводів.

Роботи щодо впливу різних показників на характеристики переїздів продовжуються. Так, у роботі [12] розглянуто залізничні переїзди в Боснії та Герцеговині на ділянці Шамац – Добой. Сформовано п'ятнадцять різних показників, які поділено на три групи: критерії безпеки, характеристики експлуатації автомобільних доріг та характеристики експлуатації залізниць. Для визначення критеріїв значущості сформовано нову інтегровану нечітку модель

FUCOM. Результати показали, що переїзди LC4 і LC8 є найбільш безпечними за всіма 15 критеріями. Автори запропонували заходи щодо забезпечення стійкої роботи залізничної системи.

Зазначимо, що переїзди категорії LC1–LC5 досі використовують у деяких країнах Європи, зокрема в Польщі, Чехії, Словаччині та Румунії. Ці категорії були введені в 1976 році в рамках Директиви Ради Європейських співтовариств 76/581/ЄЕС про встановлення єдиних технічних вимог до будівництва та експлуатаційних вимог до переїздів на залізницях. Директива 76/581/ЄЕС була замінена Директивою Ради Європейських співтовариств 2008/57/ЄС про вимоги до безпеки на залізничному транспорті. Ця директива також використовує категорії переїздів, але вони засновані на інтенсивності руху та інших факторах, які впливають на безпеку руху. Переїзди категорії LC6, LC7 і LC8 – це переїзди з високою інтенсивністю руху поїздів, автотранспорту та пішоходів, що розташовані в місцях з обмеженою видимістю.

Модернізація переїздів забезпечує поліпшення безпеки руху, збільшення вантаж- й пасажирообігу, зменшення часу очікування на переїздах для автомобільного руху, що полегшує транзитні перевезення, сумісність з європейськими стандартами. Зменшення кількості ДТП на залізничних переїздах може призвести до зниження викидів шкідливих речовин в атмосферу, до зменшення шумового забруднення та зменшення забруднення повітря від транспортних засобів. Упровадження передових технологій підвищення безпеки руху на залізничних переїздах є важливим кроком для підвищення безпеки залізничного транспорту в Європі та Україні. Запропоновані заходи щодо підвищення безпеки руху на залізничних переїздах України дозволять досягти комплексного ефекту та сприяти охороні навколишнього середовища [4, 6].

Як свідчить статистика, основна частина аварій, дорожньо-транспортних пригод (ДТП) та інцидентів відбувається на складних транспортних об'єктах, до числа яких належать залізничні переїзди. Сі Ланг та ін. [18] відзначають, що залізничні переїзди є однією з найважливіших проблем для сталого управління безпекою руху та дорожньо-транспортними пригодами,

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

що становлять третину всіх залізничних пригод у Європі. У роботі [12] представлено результати досліджень із підвищення безпеки на залізничних переїздах європейських країн. Показано, що технічні рішення мають обмежене застосування через фінансову неможливість заміни всіх переїздів естакадами або підземними переходами чи встановлення сучасного обладнання з метою попередження або виявлення небезпеки, коли до переїзду наближається поїзд. На залізничних переїздах трапляється порушення безперервності руху автотранспорту, а ряді випадків і залізничного транспорту, що призводить до підвищеного енергоспоживання, забруднення довкілля, втрат часу пасажирів та персоналу, збільшення часу залучення рухомих засобів, зниження пропускної спроможності.

Переїзди є пріоритетною темою для Управління залізниць і доріг (ORR) Великобританії. У роботі [20] відзначено, що на більш ніж 7 000 залізничних переїздів не існує універсального підходу до безпеки, кожен залізничний переїзд є унікальним.

Проблеми, пов'язані з наявністю залізничних переїздів, численні. З метою сталого управління безпекою руху вживають певних заходів для зведення цієї небезпеки до мінімуму. Найкращі рішення – перетин доріг через шляхопроводи та підземні переходи, але це вимагає дуже великих капіталовкладень.

Європейська комісія та Європейський інвестиційний банк розробили стратегію з інтеграції залізничних мереж України, Молдови та Євросоюзу [2]. Основний висновок проведеного дослідження полягає в необхідності побудови в Україні та Молдові нової магістральної мережі колії 1 435 мм, яка працюватиме паралельно з теперішньою мережею 1 520 мм на двох принципових засадах: євроколія 1 435 мм буде призначена для швидкісних перевезень (міжнародні пасажирські потяги, потяги категорії «Інтерсіті», перевезення вантажів у контейнерах/на платформах), тоді як колія 1 520 мм обслуговуватиме повільніший транспорт (місцеві та регіональні пасажирські потяги, великогазові вантажі); розвиток магістральної мережі 1 435 мм здійснюватиметься поетапно – із заходу на схід.

Для реалізації цього завдання можливі різні варіанти: будівництво європейської колії (ширина 1 435 мм) або перехід на суміщену колію (1 435/1 520 мм) з рейками європейського стандарту UIC60. Це, у свою чергу, призведе до необхідності впровадження нових конструкцій переїздів.

В Україні, як і в багатьох європейських країнах, є багато залізничних переїздів, де виникають і можуть виникнути небажані наслідки як для автомобільного, так і залізничного транспорту. Залізничні переїзди не відповідають сучасним нормам та вимогам щодо ухилу, якості покриття, забезпечення видимості, а тому є необхідність у діагностиці, моніторингу й розробці проєктних рішень для підвищення ступеня безпеки руху. Інтеграція транспортної системи України до європейської є тривалою через низький рівень інноваційності, безпеки, надання якісних транспортних послуг та необхідність проведення технологічної модернізації наявної інфраструктури [17].

Значно підвищити безпеку руху через залізничні переїзди можна завдяки правильному управлінню ризиками. Відомі такі способи управління ризиками під час технічного аудиту безпеки руху через залізничні переїзди: визначення та оцінка можливих ризиків, пов'язаних із безпекою руху через залізничні переїзди, що може включати аналіз інфраструктури, переїзного обладнання, поведінки водіїв та пішоходів, а також історичних даних про аварії; визначення ймовірності та наслідків кожного ризику; розробка заходів із контролю ризиків, що може сприяти постійному вдосконаленню системи управління ризиками.

Питанням зовнішнього контролю безпеки руху на залізничному транспорті, зокрема на переїздах, присвячено багато наукових праць. Управління ризиками на залізницях Австрії наведено в роботі [19], де показано, що зниження ризиків під час прийняття рішень можливе на трьох рівнях, причому для кожного рівня характерні багатогалузеві партнерства. Оцінку ризику виконано з точки зору капітальних вкладень, що дає можливість управляти цими ризиками. Аналіз показує, що управління ризиками залізничного оператора та його парт-

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

нерів було успішним, але все ще є потенціал для вдосконалення.

У китайській стратегії розвитку [11] застосовано 24 потенційні критичні ризики в залізничній сфері, які поділені на 6 груп. Одним із методів визначення безпеки є анкетування, спрямоване на збір даних про ймовірності виникнення ризику і його вплив. Результати застосування цього методу підтверджують його ефективність, надійність і практичність під час оцінки ризиків, оскільки він дозволяє оцінювати ризики на трьох різних рівнях: фактори ризику, категорії ризику і загальний ризик. Лексична невизначеність і невизначеність через нестачу даних враховані в процесі оцінки.

У роботі [14] наведено математичну модель оцінки ризиків, що призначена для зовнішнього контролю безпеки руху на залізничному транспорті під час технічного аудиту, на основі якої може бути надана комплексна характеристика безпеки руху. Запропонована методика дозволяє визначити заходи або невідкладні дії щодо усунення можливих загрозливих ситуацій у транспортних процесах. Експлуатаційна модель управління ризиками включає показники інвестицій та експлуатаційних витрат, що дозволяє більш точно здійснювати прогноз кількості порушень безпеки руху на залізничному транспорті та управляти ризиками в разі зовнішнього контролю.

На підставі сценаріїв аварій із залученням експертів у роботі [16] виконано оцінку безпеки руху з урахуванням людського фактора. Для допомоги експертам використано методи штучного інтелекту, зокрема машинне навчання. Методи штучного інтелекту призначені для моделювання, зберігання та оцінки знань про безпеку руху, що дало можливість полегшити роботу експертів під час систематизації важливих статистичних даних.

У роботі [23] проаналізовано вимоги до забезпечення безпеки руху на залізничному пасажирському транспорті на підставі теорії управління ризиками та моделі PDCA. Використання моделі PDCA може допомогти залізничним компаніям знизити ризики аварій та інцидентів, підвищити безпеку пасажирських перевезень, поліпшити якість обслуговування пасажирів, зменшити витрати, пов'язані з ава-

ріями та інцидентами. Недоліком побудованої системи є те, що рішення приймають люди, а це, відповідно, вплив людського фактора.

Автори наукової публікації [15] наголошують на необхідності залучення незалежних експертів із проведення технічного аудиту для отримання об'єктивних та неупереджених результатів. Метою дослідження [13] була розробка методики формування групи показників, які відображатимуть загальний рівень стану безпеки в локомотивному господарстві. Як відповідний математичний апарат у дослідженні обрано метод головних компонент, що дозволяє провести аналіз наявних показників, які характеризують виконану роботу та стан безпеки руху з необхідною мірою інформативності.

Короткий огляд наукових праць мав на меті визначити основні фактори і їхній вплив на ризики, що мають місце в багатьох країнах в разі вирішення проблем безпеки на залізничних переїздах, і встановити сучасні інноваційні технології, застосування яких буде ефективним на мережі залізниць України.

Для зменшення кількості ДТП на залізницях України необхідно вжити такі заходи:

- привести інфраструктуру українських залізниць у відповідність до європейських стандартів;
- удосконалити законодавство та нормативну базу у сфері безпеки на залізницях;
- підвищити рівень обізнаності населення про правила безпеки на залізницях;
- врахувати досвід та кращі практики інших країн.

Упровадження передових технологій із підвищення безпеки руху на залізничних переїздах є важливим кроком для підвищення безпеки залізничного транспорту у Європі та Україні.

Для досягнення стійкого результату необхідний комплексний підхід, який включатиме всі вищеперелічені заходи.

Мета

Основною метою роботи є оцінка стану залізничних переїздів на дільницях прискореного й швидкісного руху поїздів із подальшою розробкою заходів щодо підвищення безпеки дорожнього руху, огляд інноваційних технологій

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

для підвищення безпеки на перетині залізничних колій з автомобільними дорогами. Об'єктом дослідження є процес упровадження інноваційних технологій під час модернізації наявних переїздів для організації швидкісного руху поїздів в Україні.

Методика

Залізничні переїзди (RLC) є серйозною проблемою безпеки на міжнародному рівні. Їх слід сприймати як необхідність та вживати всіх доступних заходів, щоб зменшити негативні наслідки. Підвищення безпеки на RLC залишається важливим соціальним завданням як у Європейському Союзі, так і в інших частинах світу. Світовий досвід свідчить, що без упровадження інновацій неможливий ефективний розвиток залізничного транспорту. Україна також упроваджує різні інноваційні технології під час реконструкції плану залізниць, однак порівняно з країнами Європи та Північної Америки рівень інновацій української залізничної галузі поки що відстає. Серед відомих інноваційних технологій, які сьогодні застосовують у різних країнах світу, можна назвати такі:

1. Інновації для зменшення ризиків на залізничних переїздах на напрямках швидкісного руху поїздів які включають різноманітні технологічні та інженерні рішення покликані підвищити безпеку руху транспортних засобів.

2. Використання сучасних систем сигналізації та автоматизованого управління може допомогти вчасно виявляти наближення поїздів і вмикати світло-звукові сигнали, що попереджують водіїв та пішоходів про небезпеку.

3. Установлення камер та використання дронів для постійного спостереження на залізничних переїздах може допомогти вчасно виявляти проблеми та втручатися в разі порушень безпеки; урахування інженерних рішень та дизайну для забезпечення кращої видимості та безпеки на переїздах.

4. Сучасні запобіжники для автотранспорту, які оснащені технологією, здатною знижувати бар'єри та забезпечувати більш ефективний захист від зіткнень із поїздами; установлення електронних табло та попереджувальних сис-

тем, що інформують водіїв про наближення поїздів.

5. Використання штучного інтелекту (ШІ), який може допомогти в прогнозуванні ризиків та вчасному виявленні аномалій на переїздах.

Як впливає з викладеного, для управління інноваційними технологіями необхідний широкий спектр цільових заходів та ініціатив безпеки на переїздах, які залишаються відкритими. Наприклад, використання сучасних систем сигналізації та автоматизованого управління, установлення камер та використання дронів для постійного спостереження на залізничних переїздах, використання штучного інтелекту для прогнозування ризиків та вчасного виявлення небезпек на переїздах.

В цій роботі акцент зроблено на використанні комп'ютерного моделювання як важливого інструменту для підвищення безпеки на залізницях, зокрема залізничних переїздах. Комп'ютерні моделі можна використовувати для аналізу різних сценаріїв і визначення змін у системі безпеки, щоб поліпшити ситуацію на переїздах.

Існує прямий зв'язок між рівнем безпеки на залізничних переїздах і рівнем ризику. На залізницях України сьогодні експлуатують 4 945 залізничних переїздів, із яких 2 543 (51 %) – з автобусним рухом; 1 290 – із черговим працівником; 1 262 – обладнані пристроями автоматики, які забезпечують разом із основними шлагбаумами повне перекриття проїзної частини автодороги. Майже половина всіх переїздів розташована на маршрутах основних пасажирських перевезень. Звідси виникає проблема утримання й обслуговування місць перетину залізниць і автодороги, а з урахуванням переходу на європейську або суміщену колію постає актуальне питання щодо будівництва нових чи реконструкції наявних залізничних переїздів.

Окремі питання в цій сфері потребують подальшого дослідження, наприклад, система оцінки рівня безпеки на залізничних переїздах, заміна небезпечних переїздів на шляхопроводи.

Для оцінки безпеки руху залізничного транспорту та автотранспортних засобів у зоні залізничних переїздів використано метод підсумкового коефіцієнта аварійності, який дає змогу визначити стан безпеки в результаті проведеної

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

модернізації чи нових проектних рішень [7]. Його величину K_A для залізничного переїзду визначають шляхом перемноження семи коефіцієнтів аварійності:

$$K_A = \prod_{i=1}^7 K_i = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4 \cdot K_5 \cdot K_6 \cdot K_7, \quad (1)$$

До цього часу в методі підсумкового коефіцієнта аварійності коефіцієнти $K_2 \dots K_7$ задають

детерміновано для певного інтервалу, вони мають стрибкоподібний характер. Це впливає на остаточний результат і може привести до різних заходів із підвищення безпеки руху на залізничних переїздах.

Усунути вказані недоліки методу підсумкового коефіцієнта можна, за допомогою формул і графіків, запропонованих у роботі авторів [5], табл. 1.

Таблиця 1

Розрахункові формули коефіцієнтів аварійності

Table 1

Calculation formulas for accident rates

Коефіцієнти аварійності	Розрахункова формула
K_1 – коефіцієнт, який враховує добову інтенсивність руху поїздів через переїзд N_n	$K_1 = \frac{N_n}{3 + 0,1 \cdot N_n}$
K_2 – коефіцієнт, який враховує добову інтенсивність руху на автомобільній дорозі N_a	$K_2 = 0,0002 N_a + 0,423$
K_3 – коефіцієнт, який враховує відстань видимості поїзда L_v	$K_3 = -0,87 \ln(L_v) + 6,387$
K_4 – коефіцієнт, який враховує устаткування переїзду U_i : механізовані шлагбауми без сигналізації $U = 4$, механізовані шлагбауми зі сповіщальною сигналізацією $U = 3$, автоматична світлова сигналізація $U = 2$, автоматичний шлагбаум з автоматичною сигналізацією $U = 1$	$K_4 = 0,925 U^2 - 2,115 U + 2,775$
K_5 – коефіцієнт, який враховує наявність штучного освітлення переїзду (наявне 1, відсутнє 1,5)	$K_5 = 1,0 \vee 1,5$
K_6 – коефіцієнт, який враховує радіус кривої у плані на підходах до переїзду	$K_6 = 959 R^{1,226}$
K_7 – коефіцієнт, який враховує поздовжній ухил автомобільної дороги на підходах до переїзду	$K_7 = 0,041 i + 0,474$

Результати

У запропонованій моделі для визначення коефіцієнтів аварійності вихідні дані вводять з автоматизованої інформаційної системи (АІС) «Переїзд». У системі зберігаються всі необхідні дані про переїзд, такі як місце розташування переїзду (область, дільниця, станція/перегін, пікетижне положення і дистанція, яка його обслуговує). Характеристика переїзду містить таку інформацію: категорія переїзду, регулю-

ваний чи нерегульований, наявність охорони, а також дані про максимальну швидкість руху пасажирських і вантажних поїздів, кількість залізничних колій, добову кількість поїздів, тип автодороги й інтенсивність руху автотранспорту, що перетинають переїзд, наявність автобусного руху. Наводять дані про видимість дороги машиністом з непарної й парної сторони, видимість водієм колії з двох протилежних сторін. Крім того, вказують кут перетину автодороги із залізницею, ухил підходів (непарна й парна

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

сторона), ширину проїзної частини, вид покриття настилу переїзду, вид покриття підходів у зоні й поза зоною обслуговування залізниці, тип сигналізації, наявність місячно-білих миготливих вогнів, термін сповіщення, тип основних і додаткових шлагбаумів, наявність загороджувально-бар'єрного пристрою (ЗБП), наявність зовнішнього освітлення переїзду й відеонагляду.

Наводять також характеристику колії в межах переїзду, рік капітального ремонту переїзду, поздовжній профіль і план (пряма чи крива, радіус, підвищення зовнішньої рейки), поздовжній профіль автодороги, план-схему переїзду. Введення інформації здійснюють на рівні дистанції колії.

Для прикладу в табл. 2 наведено вибірку інформацію щодо переїздів на напрямках регіональної філії «Придніпровська залізниця».

Таблиця 2

Інформація щодо переїздів на напрямках регіональної філії «Придніпровська залізниця»

Table 2

Information on moves on the directions of the regional branch of «Prydniprovskya Railways»

Показники з паспорта переїзду	Дніпро – Чаплине	Наумівка – Севастополь	П'ятихатки – Дніпро	Лозова – Синельникове
1. Місце знаходження, км + м по залізниці	214+088	1039+462	109+982	970+578
2. Категорія переїзду (I–IV)	II	I	I	I
3. Ширина переїзду	7,5	7,7	7,0	7,0
4. Через скільки колій	2	2	2	2
5. Ухил підходів (парна/непарна) у %	17/10,6	6/29	0/0	3/4
6. Тип переїзду (із черговим, без чергового)	3 черговим	3 черговим	3 черговим	3 черговим
7. Максимальна встановлена швидкість руху поїздів, км/год	120	135	135	160
8. Кількість поїздів на добу	85	134	91	6
9. Кількість транспортних засобів	4 234	796	72	4 377
10. Умови видимості переїзду машиністом непарного / парного напрямків	800/600	900/1 000	1000/1 000	900/900
11. Автоматична світлофорна сигналізація з автоматичними шлагбаумами / з перекриттям	+	+	+	+
всієї проїзної частини / відеонагляд	+	–	–	–
12. Горизонтально-поворотні шлагбауми з контрольними замками	+	–	+	+
13. Прямий телефонний зв'язок з ДСП або ДНЦ	+	+	+	+

Продовження табл. 2
Continuation of Table 2

Показники з паспорта переїзду	Дніпро – ЧапLINE	Наумівка – Се- вастополь	П’ятихатки – Дніпро	Лозова – Синель- никове
13. Прямий телефонний зв’язок з ДСП або ДНЦ	+	+	+	+
14. Радіозв’язок	+	+	+	+
15. Електричне освітлення	+	+	+	+
16. Допущено ДТП				2003, 2007

Розрахунки, виконані за формулами табл. 1, показали, що коефіцієнт аварійності, який дає змогу оцінити стан безпеки в результаті проведеної модернізації чи нових проектних рішень становить, менше ніж 40. Згідно з методикою [7], у разі $K_A < 40$ переїзди вважають безпечними. Водночас на переїзді I категорії на напрямку Лозова – Синельникове (970+578) було допущено два ДТП – у 2003 і 2007 рр. (табл. 2). Є й інші приклади, які не внесені до табл. 2.

У зв’язку з укладанням на мережі залізниць України колії європейського стандарту (1 435 мм) та впровадженням на головних напрямках швидкісного руху поїздів (до 200 км/год) науковий інтерес становить визначення способів модернізації переїздів [1, 3].

Як можливий варіант упровадження швидкісного руху поїздів розглянемо напрямом Київ – Здолбунів – Львів. На ділянці Київ – Здолбунів, де передбачено рух поїздів зі швидкістю понад 140 км/год, проектно-вишукувальний інститут «Київдипротранс» рекомендував влаштовувати пересічення автомобільних доріг із залізничними коліями в різних рівнях (шляхопроводи). Але 45 переїздів, через які передбачено пропуск поїздів зі швидкістю до 140 км/год, підлягають переобладнанню автоматичною переїзною сигналізацією з основними та додатковими шлагбаумами, з повним перекриттям проїзної частини автодороги та укладанням гумово-кордового покриття (табл. 3).

Таблиця 3

Проектні рішення щодо переїздів на напрямку Київ – Здолбунів

Table 3

Design solutions for relocations on the Kyiv-Zdolbuniv route

Запропоновані заходи	Київ – Коростень	Коростень – Шепетівка	Шепетівка – Здолбунів
Переїзди, які не охороняють, переводять в переїзди з охороною	15	20	10
Заміна переїздів на шляхопроводи	13	3	2

Передбачено, що перед упровадженням швидкісного руху поїздів буде проведено комплекс робіт, необхідний для реалізації максимальної швидкості руху $160 < V_{\max} \leq 200$ км/год. Нижче наведено опис алгоритму визначення

устаткування переїзду залежно від підсумкового коефіцієнта аварійності K_A :

1.3 АІС «Переїзд» вводять вихідні дані, які необхідні для розрахунку коефіцієнтів $K_1, K_2, K_3, K_5, K_6, K_7$, а саме: N_n – кількість поїздів на добу в обох напрямках; N_a – кількість транс-

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

портних засобів на добу в обох напрямках; наявність штучного освітлення переїзду (наявне 1, відсутнє 1,5), радіус кривої у плані на підходах до переїзду R , поздовжній ухил автомобільної дороги на підходах до переїзду i .

2. За формулами (табл. 1) розраховують коефіцієнти K_i , що впливають на безпеку руху.

3. Для виконання тягових розрахунків за програмою MoveRW вводять вихідні дані: поздовжній профіль, план лінії, обмеження швидкості руху поїзда, дані про рухомий склад (тип локомотива, маса поїзда тощо).

4. Виконують тягові розрахунки для встановлення рівня швидкості руху пасажирського поїзда в місці розташування переїзду.

5. Якщо рівень швидкості менше між 160 км/год, то задають устаткування на переїзді

$U_i (i = 4...1)$, і після кожного заданого значення U_i розраховують коефіцієнт аварійності K_A . Якщо $K_A \leq 40$ (переїзд безпечний) або $40 < K_A \leq 60$ (малонебезпечний), то може бути прийняте рішення зупинити процес пошуку й прийняти задане устаткування переїзду.

6. Якщо $V_{\max} > 160$ км/год (швидкісний рух), то потрібно комплексне устаткування, що включає автоматичну світлофорну сигналізацію, автоматичний (напівавтоматичний) шлагбаум, загороджувальний бар'єрний пристрій (ЗБП), поїзний радіозв'язок і відеонагляд.

Змінюючи коефіцієнт K_4 за $U = 4...1$ (табл. 1), отримано значення, за якими побудовані гістограми (рис. 1–4).

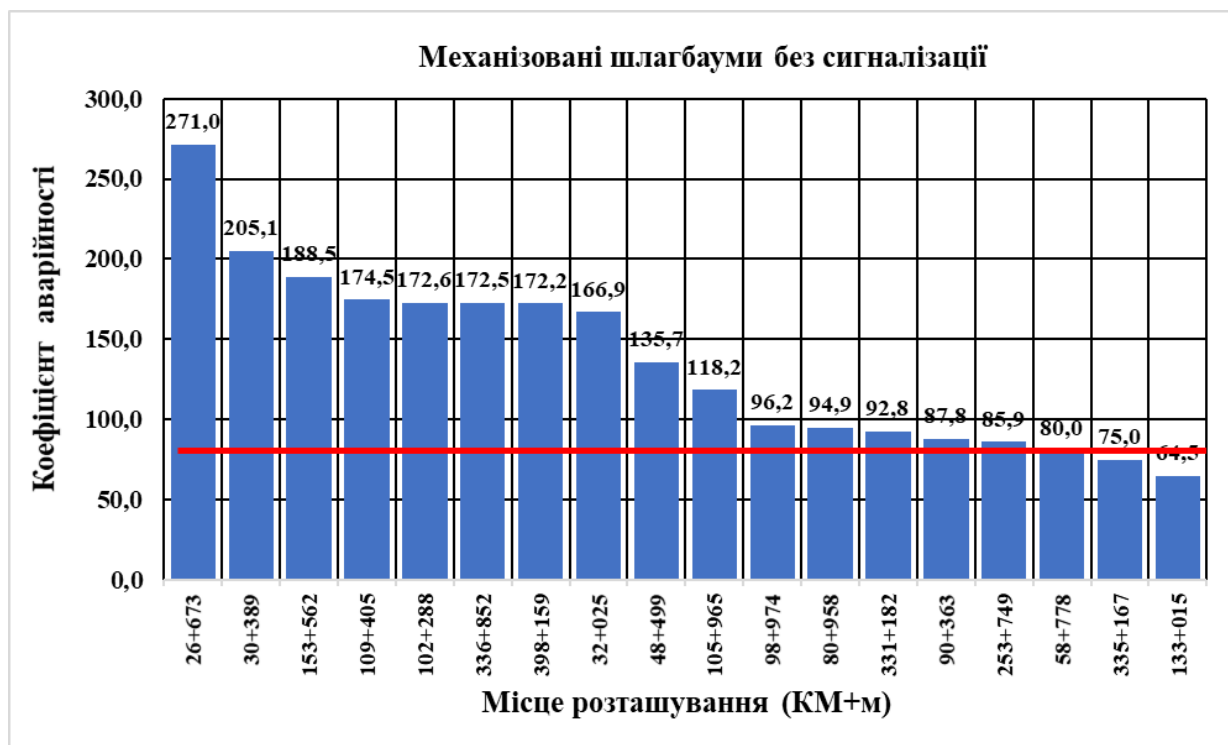
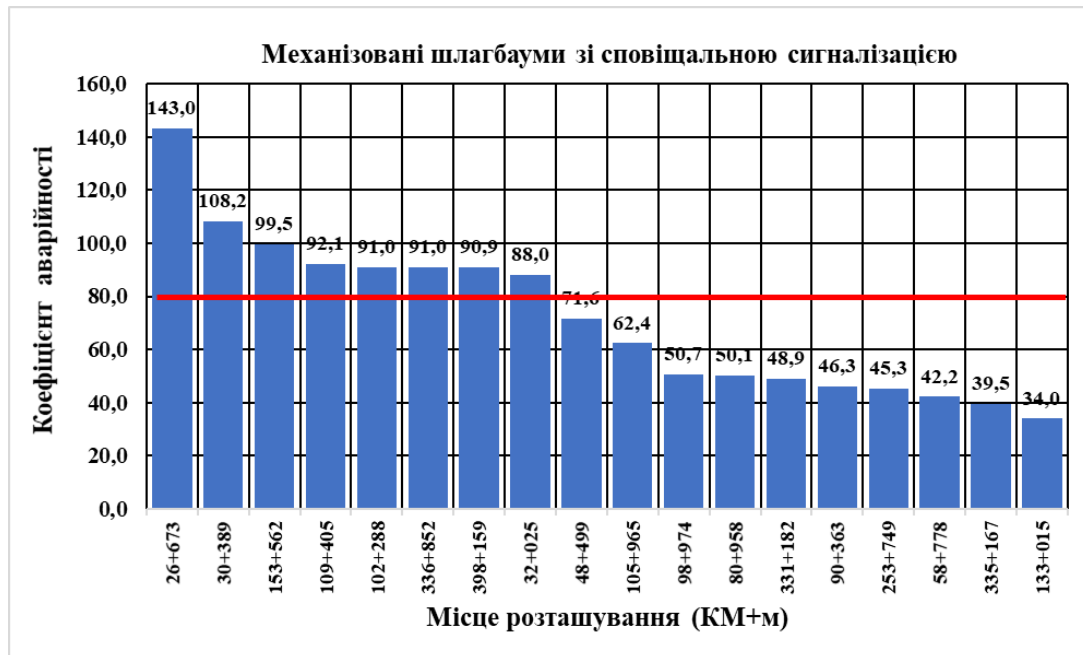


Рис. 1. Коефіцієнт аварійності за $U = 4$

Fig. 1. Accident coefficient by $U = 4$

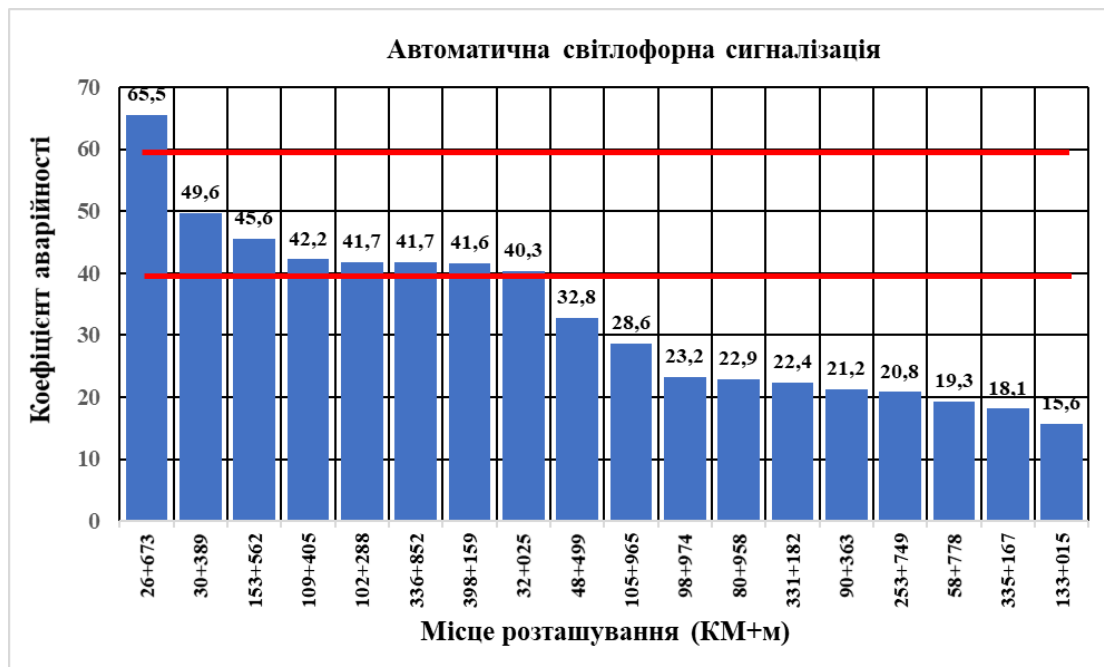
Із рис. 1 випливає, що з 18 переїздів 15 потрапляють до зони дуже небезпечних, $K_A > 81$.

Після модернізації переїздів, що полягає у впровадженні сповіщальної сигналізації, до зони дуже небезпечних потрапляють 8 переїздів (рис. 2).

Рис. 2. Коефіцієнт аварійності за $U = 3$ Fig. 2. Accident coefficient by $U = 3$

Унаслідок подальшої модернізації, що передбачає впровадження автоматичної світлофорної сигналізації, переїзди переходять до

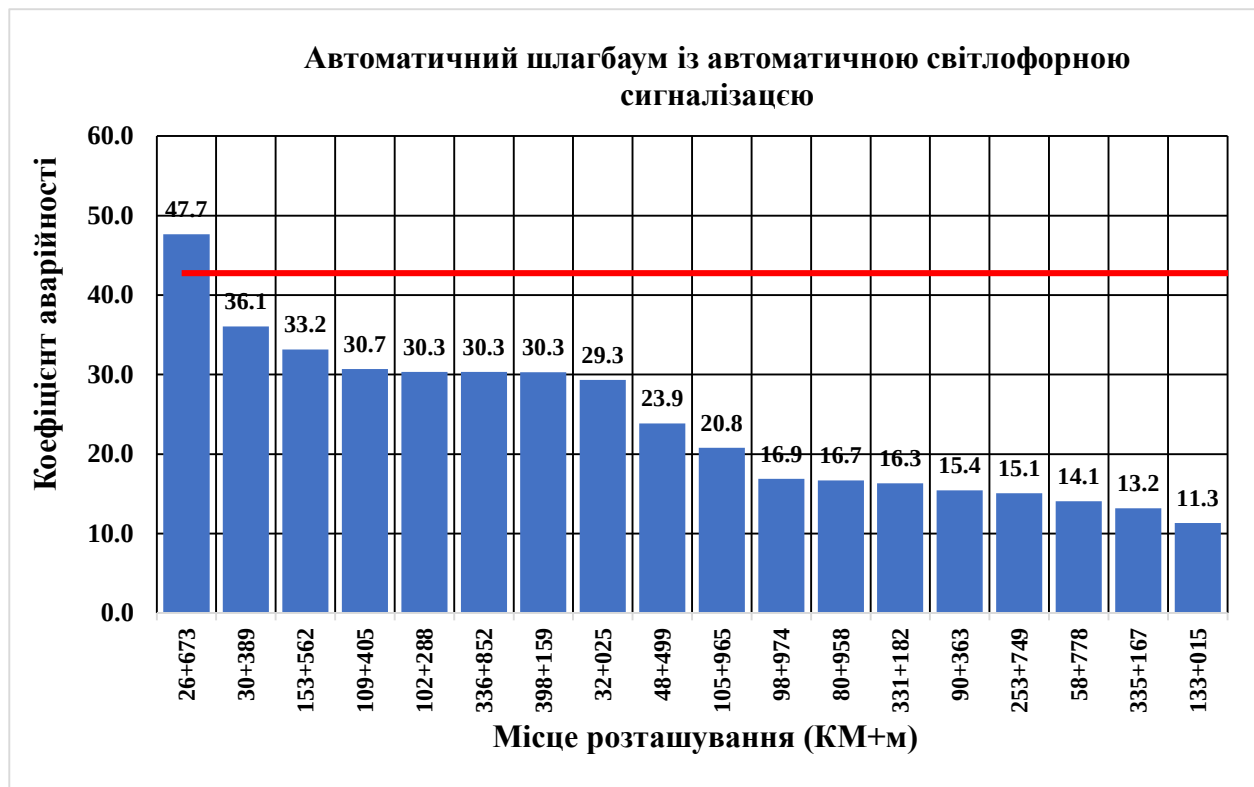
категорій: безпечні – 11, малонебезпечні – 6, і тільки один потрапляє до зони небезпечних (рис. 3).

Рис. 3. Коефіцієнт аварійності за $U = 2$ Fig. 3. Accident coefficient by $U = 2$

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

У разі впровадження автоматичних шлагбаумів із автоматичною сигналізацією тільки

один переїзд на км 26 пікет 6+73 буде перебувати в зоні малонебезпечних (рис. 4).

Рис. 4. Коефіцієнт аварійності за $U = 1$ Fig. 4. Accident coefficient by $U = 1$

Запропонована модель дозволяє прогнозувати зміни у вихідних даних і отримувати різні значення підсумкового коефіцієнта, а отже, планувати заходи з впровадження інноваційних технологій, що підвищують безпеку руху на переїздах. Закриття залізничних переїздів або перехід на дворівневий перетин залізниці й автодороги (шляхопроводи) – це єдиний спосіб повністю усунути ризик. Однак практично неможливо негайно закрити всі залізничні переїзди. Крім фінансових та практичних обмежень, зручність користувача все ще має бути ключовим фактором.

Деякі з цих ініціатив уже розглядали або впроваджують в різних країнах світу, вони можуть бути корисними і в Україні (табл. 4). Важливо зазначити, що комбінація цих технологій і

підходів може сприяти підвищенню безпеки на залізничних переїздах в Україні. Упровадження таких інновацій може зменшити ризик нещасних випадків та зробити залізницю безпечною для всіх учасників руху. Оскільки переїзди функціонують у неоднакових експлуатаційних умовах, вибір пристроїв, що забезпечують безпеку руху, повинен враховувати переваги й недоліки (табл. 4), а також і вартісні показники.

У роботі [12] розглянуто різні варіанти переїздів, що враховують кількість головних колій, кут перетину залізниці автомобільною дорогою і ширину проїзної частини. Для кожного з варіантів визначено обсяги робіт і розраховано укрупнені показники вартості влаштування залізничного переїзду під час капітального ремонту.

Таблиця 4

Переваги й недоліки пристроїв, що забезпечують безпеку руху на переїздах

Table 4

Advantages and disadvantages of devices that ensure traffic safety at crossings

Пристрої, що забезпечують безпеку руху на переїздах	Призначення пристрою	Переваги	Недоліки
1. Установлення світлофорів і динамічних LED-табло, які інформують водіїв про наближення поїзда	Надають водіям та пішоходам інформацію щодо стану переїзду, показують, чи можна перетинати переїзд. Важливі для керування рухом на залізничному переїзді	Передають інформацію про стан переїзду водіям та пішоходам. Допомагають визначити, коли дорогу можна перетинати або коли потрібно зупинитися.	Не завжди можуть виявити всі небезпечні ситуації. Вимагають регулярного обслуговування та налагодження.
2. Звукові сигнали (оповіщувач звуковий «сирена» С-03–12V AC/DC)	Допомагають водіям та пішоходам реагувати на наближення поїзда. Дзвінки та інші звукові сигнали можуть служити додатковим засобом попередження про небезпеку.	Додатковий спосіб попередження про наближення поїзда. Можуть бути корисними для водіїв та пішоходів з обмеженими можливостями.	Можуть створити додатковий шум, який дехто сприйматиме як надокучливий. Залежать від уваги та реакції водіїв і пішоходів.
3. Обладнання переїздів шлагбаумами для закриття доріг на всю ширину проїзної частини (шлагбаум автоматичний переїзний із самоопусканням бруса, електродвигуном змінного струму, діелектричним брусом довжиною 6 м, без переїзного світлофора)	Блокують доступ до залізничних колій під час проходження поїзда. Забезпечують фізичний бар'єр між дорогою та коліями, важливі для зупинки транспортних засобів.	Слугують сигналом для водіїв і пішоходів, що наближається поїзд, зменшують ризик смертельних аварій. Повністю блокують проїзну частину, що робить неможливим перетин залізничної колії під час руху поїзда.	Можуть спричиняти затримки в русі автотранспорту, особливо на дорогах із великою кількістю залізничних переїздів. Потребують обслуговування та регулярної перевірки, що може вимагати додаткових витрат. Можуть бути уразливими до відмови технічного обладнання
4. Установлення камер спостереження та сучасних сенсорів	Можуть служити для спостереження за дорожнім рухом та реагування на небезпечні ситуації. Можуть бути корисним для запису подій і надання доказів у випадку інцидентів.	Дають можливість записувати події для подальшого аналізу та розслідування інцидентів. Такі записи можуть слугувати доказами для встановлення винних осіб.	Безпосередньо не впливають на рух транспортних засобів. Потребують обслуговування та управління записами.

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

Продовження табл. 4
Continuation of Table 4

Пристрої, що забезпечують безпеку руху на переїздах	Призначення пристрою	Переваги	Недоліки
5. Загороджувальні бар'єрні пристрої (ЗБП)	ЗБП встановлюють на дорозі перед залізничними коліями та піднімають, щоб блокувати дорогу, коли наближається поїзд. Вони є важливою частиною забезпечення безпеки на залізничних переїздах, оскільки перешкоджають доступу автотранспорту до залізничних колій під час проходження поїзда.	Фізичний бар'єр, який блокує доступ до залізничних колій, ефективним способом зупинити автотранспорт перед поїздом.	Можуть стати причиною затримок для транспортних засобів. Зафіксовано вихід із ладу датчиків верхнього та нижнього положення плит, інфрачервоних датчиків для контролю вільності платформ, ультразвукових датчиків знаходження об'єкта на переїзді, безконтактних датчиків для контролю кришки моторного відсіку електродвигуна. Вимагають обслуговування та можуть бути піддатливими до витрат на ремонт.
6. Обладнання переїздів поїзним радіозв'язком (радіостанція стаціонарна УКХ діапазону аналогового режиму роботи «Оріон» РС–4 КХ)	Допомагає підвищити ефективність руху, оскільки машиністи та водії можуть отримувати інформацію про шляхи та маршрути в реальному часі. Допомогає уникнути зіткнень і зменшити затримки.	Упровадження систем цифрового радіозв'язку дозволить передавати по радіоканалу інформацію оперативно-технологічного характеру (місце знаходження локомотива, швидкість, технічні показники та ін.), що може значно підвищити безпеку руху, дозволяючи операторам та водіям швидко реагувати на небезпеку та уникати аварій.	Усі переговори ведуть на одній частоті 2,130 МГц у дуплексному режимі, що спричиняє велику завантаженість ефіру та негативно впливає на оперативність передачі повідомлень. Також аналоговий радіозв'язок має низьку перешкодозахисність порівняно з цифровим радіозв'язком.

У табл. 4 наведено і найбільш відомі пристрої, які можна застосовувати на залізничних переїздах: 1 – світлофори, 2 – звукові сигнали, 3 – шлагбауми для перекриття дороги на всю ширину проїзної частини, 4 – камери спостереження, 5 – загороджувальні бар'єрні пристрої (ЗБП), 6 – обладнання переїздів поїзним радіозв'язком. Щоб визначити кількість можливих комбінацій пристроїв для забезпечення

безпеки руху на переїздах, можна використати методи комбінаторики і кількість можливих комбінацій обчислити за допомогою формули:

$$C(n, k) = n! / (k!(n - k)!), \quad (1)$$

де n – кількість доступних елементів (6 пристроїв); k – кількість елементів, які вибираються для комбінації.

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

У цьому випадку можемо вибрати будь-яку кількість пристроїв від 0 до 6. Використовуючи формулу (1), отримуємо 64 різні комбінації пристроїв, що можуть забезпечувати безпеку руху на переїздах.

Важливо відзначити, що оптимальний варіант комбінації пристроїв може відрізнятися для різних переїздів. Тому під час вибору обладнання переїзду необхідно враховувати всі фактори, що впливають на безпеку, вартість та експлуатаційні витрати.

Використання всіх пристроїв одночасно є надмірним і може призвести до проблем. Наприклад, шлагбауми можуть заважати видимості світлофорів і динамічних LED-табло. Звукові сигнали можуть бути заглушені іншими шумами. Загороджувальні бар'єрні пристрої можуть бути пошкоджені або заблоковані. Камери спостереження та сучасні сенсори можуть бути дорогими і складними в обслуговуванні. Обладнання переїздів поїзним радіозв'язком може бути неможливим у районах з обмеженим доступом до мобільного зв'язку.

Більш ефективним рішенням є використання комбінації декількох пристроїв, які доповнюють один одного. Конкретний вибір пристроїв

для переїзду повинен бути заснований на таких факторах: інтенсивність руху на переїзді, швидкість руху поїздів, рівень шуму в районі переїзду, вартість і складність обслуговування пристроїв, екологічні аспекти.

Застосуємо в нашій роботі теорію багатокритеріальних рішень (АНР), яка дає можливість оцінити всі альтернативи рішення з точки зору кожного критерію і вибрати ту альтернативу, яка має найкращі показники за всіма критеріями [5, 8, 22].

Для складання матриці А співвідношення важливості висунутих вимог (табл. 5), кожен елемент якої $a_{i,j}$ є чисельною оцінкою важливості i -ї вимоги над j -ю. Бальна оцінка від 1 до 9 передбачає, що один критерій завжди має більший пріоритет, ніж інший. Наприклад, безпека руху (А) має найвищу важливість і може бути оцінена в 9 балів. Стійкість до погодних умов (В) має меншу важливість, ніж безпека руху, і може бути оцінена у 8 балів. Життєвий цикл (С) має меншу важливість, ніж безпека руху або стійкість до погодних умов, і може бути оцінений у 7 балів, а вартість у 5 балів.

Таблиця 5

Співвідношення висунутих вимог до пристроїв переїздів (матриця А)

Table 5

Ratio of requirements for crossing devices (matrix A)

Матриця А		Безпека руху	Стійкість до погодних умов	Життєвий цикл	Вартість пристрою	Зносо-стійкість	Склад та технологія	Поточне утримання	Екологічні аспекти
		А	В	С	Д	Е	Ф	Г	Н
1. Безпека руху	А	1	8	7	5	8	7	7	7
2. Стійкість до погодних умов	В	0,13	1	7	5	8	7	7	7
3. Життєвий цикл	С	0,14	0,14	1	6	8	8	6	5
4. Вартість пристрою	Д	0,17	0,2	0,2	1	7	7	6	5

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

Продовження табл. 5
Continuation of Table 5

Матриця А		Безпека руху	Стійкість до погодних умов	Життєвий цикл	Вартість пристрою	Зносо-стійкість	Склад та технологія	Поточне утримання	Екологічні аспекти
		А	В	С	Д	Е	F	G	Н
5. Зносо-стійкість	Е	0,14	0,13	0,13	0,13	1	7	6	5
6. Склад та технологія	F	0,14	0,14	0,13	0,14	0,14	1	6	5
7. Поточне утримання	G	0,17	0,17	0,17	0,17	0,14	0,14	1	3
8. Екологічні аспекти	Н	0,33	0,2	0,2	0,2	0,2	0,14	0,14	1
Сума:		2,22	9,98	15,82	17,63	32,49	37,29	39,14	38

Аналогічно розглянуто й надано оцінку за всіма іншими компонентами.

Зворотне співвідношення вимог за ступенем важливості виражають оберненим числом, тобто:

$$a_{j,i} = \frac{1}{a_{i,j}}. \quad (2)$$

Таким чином, матриця А співвідношення важливості висунутих вимог набуде вигляду матриці В (табл. 6).

Таблиця 6

Співвідношення важливості висунутих вимог до пристроїв переїздів (матриця В)

Table 6

The ratio of importance of the requirements for crossing devices (matrix B)

МАТРИЦЯ В	А	В	С	Д	Е	F	G	Н
А	0,450	0,802	0,443	0,284	0,246	0,188	0,179	0,184
В	0,056	0,100	0,443	0,284	0,246	0,188	0,179	0,184
С	0,064	0,014	0,063	0,340	0,246	0,215	0,153	0,132
Д	0,075	0,020	0,013	0,057	0,215	0,188	0,153	0,132
Е	0,064	0,013	0,008	0,007	0,031	0,188	0,153	0,132
F	0,064	0,014	0,008	0,008	0,004	0,027	0,153	0,132
G	0,075	0,017	0,011	0,009	0,004	0,004	0,026	0,079
Н	0,150	0,020	0,013	0,011	0,006	0,004	0,004	0,026
Сума:	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

Матриця вагомості λ може бути кількісною оцінкою, що вказує на розподілення ступеня важливості за вимогами. Сума всіх елементів складає 1. Елементи матриці вагомості λ визначають за формулою:

$$\lambda_i = \frac{\sum_{j=1}^n b_{i,j}}{n}. \quad (3)$$

Таким чином, матриця вагомості набуде вигляду (табл. 7).

Таблиця 7

Матриця вагомості λ_i

Table 7

Weighting matrix λ_i

1. Безпека руху	A	0,347
2. Стійкість до погодних умов	B	0,210
3. Життєвий цикл	C	0,153
4. Вартість пристрою	D	0,107
5. Зносостійкість	E	0,074
6. Склад матеріалів та технологія улаштування	F	0,051
7. Поточне утримання	G	0,028
8. Екологічні аспекти	H	0,029

Як видно з матриці вагомості λ_i (табл. 7), найбільш вагомими за ступенем важливості факторами є вимоги А – Безпека руху і В – Стійкість до погодних умов, що складають відповідно 34,7 і 21,0 %. Найменш вагомими є вимоги Н – Екологічні аспекти і G – Поточне утримання, відповідно 2,9 і 2,8 %. Вагомість інших вимог займає проміжні значення.

Це співвідношення є найбільш поширеним, оскільки безпека руху найважливіше фактором для захисту людей із транспортних засобів від зіткнень з поїздами.

З аналізу отриманих результатів випливає, що сумарний критерій отримали загороджувальні бар'єрні пристрої (ЗБП), які є ефективним способом попередити водіїв і пішоходів про

наближення поїзда. Але вони не можуть повністю перекрити проїзну частину. Камери спостереження та сучасні сенсори можна використовувати для моніторингу переїздів і попередження про наближення поїзда, але вони не можуть замінити шлагбауми. Обладнання переїздів поїзним радіозв'язком можна використовувати для попередження водіїв і пішоходів про наближення поїзда, але воно не може повністю перекрити проїзну частину.

Оцінимо кожну комбінацію пристроїв із точки зору досягнення поставлених цілей і критеріїв. Враховуємо ефективність і можливі обмеження кожної комбінації (див. табл. 4). Залежно від потреб, обмежень і конкретної ситуації на залізничних переїздах можна використати різні комбінації пристроїв. Ось декілька можливих комбінацій:

Світлофори і звукові сигнали. Світлофори можуть вказувати транспортним засобам, коли зупинитися і коли продовжувати рух через переїзд. Звукові сигнали можуть допомогти водіям та пасажиром сприймати більше інформації про наближення поїзда.

Світлофори і шлагбауми. Світлофори вказують водіям на переїзді, коли слід зупинитися або проїхати. Шлагбауми фізично блокують проїзд на переїзді, коли потяг наближається.

Шлагбауми та камери спостереження. Шлагбауми блокують дорогу для транспорту під час наближення поїзда. Камери спостереження використовують для відстеження та моніторингу дорожньої ситуації на переїзді.

Звукові сигнали і загороджувальні бар'єрні пристрої (ЗБП). Звукові сигнали інформують про наближення поїзда. ЗБП можуть фізично блокувати рух на переїзді та інформувати водіїв.

Шлагбауми й обладнання переїздів поїзним радіозв'язком. Шлагбауми фізично блокують проїзд. Обладнання переїздів поїзним радіозв'язком може забезпечити комунікацію між поїздом і переїздом.

Світлофори, камери спостереження і загороджувальні бар'єрні пристрої. Світлофори вказують водіям на переїзді, коли слід зупинитися або проїхати. Камери спостереження використовують для моніторингу дорожньої си-

туації. ЗБП можуть фізично блокувати рух на переїзді.

Це лише кілька можливих комбінацій. Вибір конкретної комбінації залежить від об'єктивних обставин і мети, якої необхідно досягнути на залізничному переїзді.

Вартість світлофорів і шлагбаумів залежить від багатьох факторів, таких як тип світлофора, тип шлагбаума, місце розташування переїзду та інші. Однак у цілому можна сказати, що вартість світлофора становить приблизно 50–100 тисяч гривень, а вартість шлагбаума становить приблизно 100–200 тисяч гривень. Як видно з цих прикладів, вартість світлофорів є приблизно вдвічі меншою, ніж вартість шлагбаумів. Однак, слід враховувати, що вартість світлофорів може бути вищою, якщо їх потрібно встановити на переїзді з високою інтенсивністю руху. Вартість шлагбаумів також може бути вищою, якщо їх потрібно встановити на переїзді з великою шириною.

Звідси випливає, що світлофори є більш дешевим варіантом, ніж шлагбауми. Однак шлагбауми забезпечують більш високий рівень безпеки, оскільки перешкоджають наїзду автотранспорту на поїзди.

Отже, вибір огорожувального пристрою для конкретного переїзду – це комплексне завдання, під час вирішення якого необхідно враховувати такі фактори: інтенсивність руху транспорту на переїзді; вид транспорту, який перетинає переїзд; швидкість руху транспорту на переїзді; ширина переїзду; географічні умови в місці розташування переїзду; економічні фактори; вартість будівництва, експлуатації та обслуговування огорожувального пристрою.

Наукова новизна та практична значимість

Вирішено науково-прикладну задачу щодо впровадження інноваційних технологій під час модернізації наявних переїздів для організації швидкісного руху поїздів. Практична значення реалізація обґрунтованої технології модернізації наявних переїздів забезпечує значне підвищення безпеки руху транспорту і пропускної спроможності.

Висновки

Щоб зменшити ймовірність людської помилки та підвищити безпеку, рекомендовано використовувати як наявні технології, так і інноваційні можливості для розробки нового рішення з безпеки руху на залізничних переїздах.

Для небезпечних переїздів можна рекомендувати встановити автоматичні шлагбауми з автоматичною світлофорною сигналізацією, провести капітальний ремонт підходів автодоріг до переїздів. Для запобігання в'їзду транспортних засобів на переїзд, якщо закриті автоматичні (напіваавтоматичні) шлагбауми і ввімкнені червоні миготливі вогні на переїзних світлофорах, щоб забезпечити надійну й безперебійну роботу, встановити загороджувальні бар'єрні пристрої (ЗБП).

Слід поширювати відомі та продовжувати впроваджувати інноваційні рішення, а саме: обладнання переїздів ЗБП, яких на залізницях Укрзалізниці всього 8; відеонаглядом – всього 9; чотирма шлагбаумами – 383 тощо.

Потрібно вдосконалювати оцінку ризиків для обґрунтування стратегії керування залізничними переїздами. В оцінках враховувати такі важливі фактори, як розташування переїзду (у плані, профілі, видимість), інтенсивність руху (залізничного, автомобільного та пішохідного) на ньому, а також історії аварій.

Використовуючи методи ієрархії, мозкового штурму та інші, необхідно визначати й використовувати надійний набір показників для оцінки й забезпечення загальної безпеки пасажирів і транспорту, пов'язаних з усіма аспектами проєктування, будівництва, обслуговування та експлуатації залізничної мережі.

Аналіз наведених даних вказує, що в Україні через відсутність обґрунтованої концепції вдосконалювання системи безпеки залізничних переїздів пріоритети в їх розвитку відрізняються від розвинутих країн, що негативно впливає на ефективність їх функціонування як небезпечних транспортних об'єктів.

Упровадження інноваційних технологій під час модернізації наявних переїздів може забезпечити організацію швидкісного руху поїздів за рахунок підвищення рівня безпеки руху на цих переїздах.

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

До таких інноваційних технологій належать:

- системи автоматичного контролю та керування переїздами, які дозволяють автоматично закрити переїзд у разі наближення поїзда, що виключає можливість наїзду автотранспорту на поїзд;

- системи відеоспостереження, що дозволяють контролювати стан переїзду та виявляти потенційні загрози, наприклад, перешкоди на переїзді або автомобілі, які намагаються проїхати переїзд на заборонний сигнал світлофора;

- системи штучного інтелекту, що можуть приймати рішення про закриття переїзду в автоматичному режимі на основі аналізу даних з різних джерел, таких як відеокамери, датчики та метеодані.

Реалізація цих технологій дозволить: зменшити час закриття переїзду, що буде сприяти скороченню простою поїздів на переїздах і підвищенню пропускної спроможності залізничних колій; поліпшити видимість переїзду для водіїв, що надасть їм можливість краще оцінити ситуацію на переїзді і прийняти правильне рішення про зупинку або продовження руху; знизити кількість аварій на переїздах.

Упровадження інноваційних технологій є важливим кроком на шляху до організації швидкісного руху поїздів. Ці технології дозволять підвищити рівень безпеки руху на залізничних переїздах і захистити життя людей.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бойник А. Б. *Безопасность железнодорожных переездов*: монографія. Харьков : Транспорт Украины, 2003. 183 с.
2. Водяний А. ЄС розробив стратегію переходу України на євроколію 1435 мм. *LIGA.net*. 2023. URL: <https://biz.liga.net/ua/all/transport/novosti/evrosoyuz-razrabotal-strategiyu-perehoda-ukrainy-na-evroputi-karta>
3. Возняк О. М., Гаврилюк В. І. *Забезпечення безпеки руху на залізничних переїздах* : монографія. Дніпропетровськ : Вид-во ДНУЗТ, 2016. 282 с.
4. Іванов Р. В., Філь Є. В., Курган М. Б. Технологічні інновації для безпеки руху на залізничних переїздах. *Матеріали II Міжнародної науково-практичної конференції здобувачів вищої освіти, викладачів та науковців «Сучасні дослідження: транспортна інфраструктура та інноваційні технології»* (Київ, 29-30 лист. 2023). Київ, 2023. Ч. 1. С. 106–111.
5. Козинець І. І., Журавель М. О. Переваги та недоліки «мозкового штурму» під час колективного обговорення проблем. *Вісник Дніпропетровського університету імені Альфреда Нобеля. Серія «Педагогіка і психологія». Педагогічні науки*. № 1 (11). 2016. С. 240–244. DOI: <https://doi.org/10.32342/2522-4115-2016-0-11-240-244>
6. Курган М. Б., Курган Д. М., Гусак М. А., Гаврилов М. О., Лужицький О. Ф. Оцінка безпеки руху транспортних засобів на перетині автомобільної дороги й залізниці в одному рівні. *Наука та прогрес транспорту*. 2022. № 2 (98). С. 45–58. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2022/267978>
7. *М 218-03450778-652:2008 Методика оцінки рівнів безпеки руху на автомобільних дорогах України*. [Чинний від 2008-01-01]. Київ : Державна служба автомобільних доріг України (Укравтодор), 2008. 49 с.
8. Мозковий штурм методика – Метод мозкового штурму та його модифікації. *Youthjustice*. URL: <https://youthjustice.org.ua/mozkovij-shturm-metodika-metod-mozkovogo-shturmu-ta-jogo-modifikaci%D1%97-naukovo-osvitnij-portal-iq-nacionalnij-doslidnickij-universitet-vishha-shkola-ekonomiki/>
9. *Про схвалення Національної транспортної стратегії України на період до 2030 року*. [Чинний від 2018-30-05]. Київ. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/430-2018-%D1%80#n13>
10. Andrić J. M., Wang J., Zhong R. Identifying the critical risks in railway projects based on fuzzy and sensitivity analysis: a case study of belt and road projects. *Sustainability*. 2019. Vol. 11. Iss. 5. P. 1–18. DOI: <https://doi.org/10.3390/su11051302>
11. Assessment of safety at level crossings in UNECE member countries and other selected countries and strategic framework for improving safety at level crossings. *ECE/TRANS/WP.1/2017/4*, P. 2–55. URL: <https://unece.org/fileadmin/DAM/trans/doc/2017/wp1/ECE-TRANS-WP1-2017-4e.pdf>

12. Blagojević A, Kasalica S, Stević Ž, Tričković G, Pavelkić V. Evaluation of Safety Degree at Railway Crossings in Order to Achieve Sustainable Traffic Management: A Novel Integrated Fuzzy MCDM Model. *Sustainability*. 2021. Vol. 13. Iss. 2. P. 1–20. DOI: <https://doi.org/10.3390/su13020832>
13. Bodnar B., Bolzhelarskyi Ya., Ochkasova O., Hryshechkina T., Černiauskaitė L. Determination of integrated indicator for analysis of the traffic safety condition for traction rolling stock. *The 12th International Scientific Conference Intelligent Technologies in Logistics and Mechatronics Systems (ITELMS'2018)* (Panevėžys, 26–27 April 2018). Kaunas University of Technology. Panevėžys, 2018. P. 45–54.
14. Bulakh M. Zarządzanie ryzykiem systemów logistycznych na podstawie analizy wielowymiarowej. *Materiały, Technologie, Konstrukcje 1. T. 1. Predykcja w układach mechanicznych i automatycznych 2020 – modelowanie matematyczne i statystyczne*. Wydawnictwo – Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej. Rzeszów. 2020. S. 75–99.
15. Bulakh M., Okorokov A. Operational model of risk management during the technical audit of traffic safety of railway transport. *Österreichisches Multiscience Journal*. 2020. Vol. 1, No. 28. P. 50–55.
16. Hady-Mabrouk H. Contribution of Artificial Intelligence to Risk Assessment of Railway Accidents / H. Hady-Mabrouk. *Urban Rail Transit*. 2019. Vol. 5. Iss. 2. P. 104–122. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40864-019-0102-3>
17. Kurhan M., Kurhan D., Hmelevska N. Analysis of Feasibility for Implementing European Standard Railway Tracks in Ukraine. *27th International Scientific Conference Transport Means 2023* (Palanga, 04–05 Oct. 2023). Palanga, 2023. Pt. II. P. 605–610.
18. Liang C., Ghazel M., Cazier O., Bouillaut L. Advanced model-based risk reasoning on automatic railway level crossings. *Safety Science*, 2020. Vol. 124. P. 104592. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2019.104592>
19. Otto A., Kellermann P., Thieken A. H., Máñez Costa M., Carmona M., Bubeck P. Risk reduction partnerships in railway transport infrastructure in an alpine environment. *International Journal of Disaster Risk Reduction*. 2019. Vol. 33. P. 385–397. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2018.10.025>
20. Principles for managing level crossing safety. *Office of Rail & Road*. 2021. URL: https://www.orr.gov.uk/sites/default/files/2021-06/principles-for-managing-level-crossing-safety-june-2021_0.pdf
21. Safer European Level Crossing Appraisal and Technology. *Final Report Summary – SELCAT (Safer European Level Crossing Appraisal and Technology)*. 2008. URL: <https://cordis.europa.eu/project/id/31487/reporting>
22. Taha H. A. *Operations Research: An Introduction, 11th edition*. 2023. University of Arkansas. URL: <https://www.pearson.com/en-us/subject-catalog/p/operations-research-an-introduction/P200000003221/9780137625727>
23. Zhu W., Jia Y. The Research on Safety Management Information System of Railway Passenger Based on Risk Management Theory. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2018. Vol. 108. P. 1–5. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/108/4/042067>

M. B. KURHAN^{2*}, O. F. LUZHYTSKYI¹, R. V. IVANOV³, N. P. KHMELEVSKA⁴,
V. S. KHMELEVSKYI⁵

^{1*}Dep. «Transport Infrastructure», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 48, e-mail kunibor@gmail.com, ORCID 0000-0002-8182-7709

²Dep. «Transport Infrastructure», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 48, e-mail oleg.luzhickii@gmail.com, ORCID 0000-0001-6519-7447

³Dep. «Transport Infrastructure», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 48, e-mail ivanovrodion@ukr.net, ORCID 0009-0005-9125-9468

⁴Dep. «Transport Infrastructure», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 48, e-mail hmelevnela@gmail.com, ORCID 0000-0002-2360-8671

⁵Dep. «Transport Infrastructure», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 48, e-mail Junkpff@gmail.com, ORCID 0009-0000-3221-6955

Implementation of Innovative Technologies During The Modernization of Existing Level Crossings for High-Speed Train Traffic

Purpose. The main purpose of the study is to review innovative technologies for improving safety at the intersection of railways and roads. The object of research is the processes of functioning – railway crossings with different intensity and parameters of traffic, which require solving a fairly wide range of theoretical, practical and organizational tasks. **Methodology.** The study is based on the theory of mathematical modeling and numerical methods of computer calculations. The subject of the study is indicators that allow to assess the state of safety after modernization or new design solutions. **Findings.** A model of an improved method of the final coefficient is proposed, which allows predicting changes in the initial data and obtaining different values of the final coefficient, and thus planning measures to introduce innovative technologies that improve traffic safety at level crossings. Closing railroad crossings or switching to a two-level intersection of railroad and road (overpasses) is the only way to completely eliminate the risk. However, it is virtually impossible to close all railroad crossings immediately. In addition to financial and practical constraints, user convenience should still be a key factor. Using hierarchy, brainstorming, and other methods, a reliable set of indicators can be identified to assess and ensure the overall safety of passengers and vehicles related to all aspects of the design, construction, maintenance, and operation of the rail network. The introduction of innovative technologies during the modernization of existing level crossings is an important step towards organizing high-speed train traffic. These technologies will increase the level of traffic safety at railroad crossings and protect people's lives. **Originality.** The scientific and applied problem of introducing innovative technologies during the modernization of existing level crossings for the organization of high-speed train traffic has been solved. **Practical value.** The implementation of a sound technology for the modernization of existing level crossings will provide a significant increase in traffic safety and throughput.

Keywords: railway crossing; traffic intensity; life cycle; wear resistance; climatic conditions; road safety

REFERENCES

1. Boynik, A. B. (2003). *Bezopasnost zheleznodorozhnykh pereezdov*: monografiya. Kharkov: Transport Ukrainy. (in Russian)
2. Vodiani, A. (2023). EU readies plans for Ukraine's transition to European railway track. *LIGA.net*. Retrieved from <https://biz.liga.net/ua/all/transport/novosti/evrosoyuz-razrabotal-strategiyu-perehoda-ukrainy-na-evroputi-karta> (in Ukrainian)
3. Vozniak, O. M., & Havryliuk, V. I. (2016). *Zabezpechennia bezpeky rukhu na zaliznychnykh pereizdakh*: monohrafiia. Dnipro: Vyd-vo DNUZT. (in Ukrainian)
4. Ivanov, R. V., Fil, E. V., & Kurgan, M. B. (2023). Technological innovations for traffic safety at railway crossings. In *II International scientific and practical conference for applicants for higher education, of educational and scientists* (Vol. 1, pp. 106-111). Kyiv, Ukraine. (in Ukrainian)
5. Kozynets, I. I., & Zhuravel, M. O. (2016). Perevahy ta nedoliky «mozkovoho shturmu» pid chas kolektyvnoho obhovorennia problem. *Bulletin of Alfred Nobel University. Series «Pedagogy and Psychology»*, 1(11), 240-244. DOI: <https://doi.org/10.32342/2522-4115-2016-0-11-240-244> (in Ukrainian)
6. Kurhan, M. B., Kurhan, D. M., Husak, M. A., Havrylov, M. O., & Luzhytskyi, O. F. (2022). Vehicle Traffic Safety Assessment at the Intersection of Highways and Railways at the Same Level. *Science and Transport Progress*, 2(98), 45-58. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2022/267978> (in Ukrainian)
7. *Metodyka otsinky rivniv bezpeky rukhu na avtomobilnykh dorohakh Ukrainy*, 49 M 218-03450778-652:2008. (2008). (in Ukrainian)
8. *Mozkovyi shturm metodyka – Metod mozkovoho shturmu ta yoho modyfikatsii*. *Youthjustice*. Retrieved from <https://youthjustice.org.ua/mozkovij-shturm-metodyka-metod-mozkovogo-shturmu-ta-jogo-modifikaci%D1%97-naukovo-osvitnij-portal-iq-nacionalnij-doslidnickij-universitet-vishha-shkola-ekonomiki/> (in Ukrainian)
9. *Pro skhvalennia Natsionalnoi transportnoi stratehii Ukrainy na period do 2030 roku*. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/430-2018-%D1%80#n13> (in Ukrainian)
10. Andrić, J. M., Wang, J., & Zhong, R. (2019). Identifying the Critical Risks in Railway Projects Based on Fuzzy and Sensitivity Analysis: A Case Study of Belt and Road Projects. *Sustainability*, 11(5), 1-18. DOI: <https://doi.org/10.3390/su11051302> (in English)

11. Assessment of safety at level crossings in UNECE member countries and other selected countries and strategic framework for improving safety at level crossings. *ECE/TRANS/WP.1/2017/4*, 2-55.
Retrieved from <https://unece.org/fileadmin/DAM/trans/doc/2017/wp1/ECE-TRANS-WP1-2017-4e.pdf> (in English)
12. Blagojević, A, Kasalica, S, Stević, Ž, Tričković, G, & Pavelkić, V. (2021). Evaluation of Safety Degree at Railway Crossings in Order to Achieve Sustainable Traffic Management: A Novel Integrated Fuzzy MCDM Model. *Sustainability*, 13(2), 1-20. DOI: <https://doi.org/10.3390/su13020832> (in English)
13. Bodnar, B., Bolzhelarskyi, Ya., Ochkasova, O., Hryshechka, T., & Černiauskaitė, L. (2018, April). Determination of integrated indicator for analysis of the traffic safety condition for traction rolling stock. In *The 12th International Scientific Conference Intelligent Technologies in Logistics and Mechatronics Systems (ITELMS'2018)* (pp. 45-54). Kaunas University of Technology. Panevėžys. (in English)
14. Bulakh, M. (2020). Zarządzanie ryzykiem systemów logistycznych na podstawie analizy wielowymiarowej. *Materiały, Technologie, Konstrukcje I. T. I. Predykcja w układach mechanicznych i automatycznych 2020 – modelowanie matematyczne i statystyczne* (s. 75-99). Wydawnictwo – Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej. Rzeszów. (in Polish)
15. Bulakh, M., & Okorokov, A. (2020). Operational model of risk management during the technical audit of traffic safety of railway transport. *Österreichisches Multiscience Journal*, 1(28), 50-55. (in English)
16. Hadj-Mabrouk, H. (2019). Contribution of Artificial Intelligence to Risk Assessment of Railway Accidents / H. Hadj-Mabrouk. *Urban Rail Transit*, 5(2), 104-122.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s40864-019-0102-3>
17. Kurhan, M., Kurhan, D., & Hmelevska, N. (2023, October). Analysis of Feasibility for Implementing European Standard Railway Tracks in Ukraine. 27th International Scientific Conference Transport Means 2023 (Pt. II, pp. 605-610). Palanga. (in English)
18. Liang, C., Ghazel, M., Cazier, O., & Bouillaut, L. (2020). Advanced model-based risk reasoning on automatic railway level crossings. *Safety Science*, 124, 104592. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2019.104592> (in English)
19. Otto, A., Kellermann, P., Thieken, A. H., Máñez, Costa M., Carmona, M., & Bubeck, P. (2019). Risk reduction partnerships in railway transport infrastructure in an alpine environment. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 33, 385-397. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2018.10.025> (in English)
20. Principles for managing level crossing safety. *Office of Rail & Road*.
Retrieved from https://www.orr.gov.uk/sites/default/files/2021-06/principles-for-managing-level-crossing-safety-june-2021_0.pdf (in English)
21. Safer European Level Crossing Appraisal and Technology. *Final Report Summary – SELCAT (Safer European Level Crossing Appraisal and Technology)*. Retrieved from <https://cordis.europa.eu/project/id/31487/reporting> (in English)
22. Taha, H. A. (2023). Operations Research: An Introduction, 11th edition. University of Arkansas.
Retrieved from <https://www.pearson.com/en-us/subject-catalog/p/operations-research-an-introduction/P200000003221/9780137625727> (in English)
23. Zhu, W., & Jia, Y. (2018). The Research on Safety Management Information System of Railway Passenger Based on Risk Management Theory. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 108, 1-5.
DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/108/4/042067> (in English)

Надійшла до редколегії: 12.11.2023

Прийнята до друку: 14.03.2024

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

УДК 656.2.073.235-046.32

Г. Л. ВАТУЛЯ¹, А. О. ЛОВСЬКА^{2*}, Є. С. КРАСНОКУТСЬКИЙ³,
П. В. РУКАВІШНИКОВ⁴

¹Навчально-науковий інститут будівельної та цивільної інженерії, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, вул. Маршала Бажанова, 17, Харків, Україна, 61002, тел. +38 (097) 560 91 30, ел. пошта glib.vatulia@kname.edu.ua, ORCID 0000-0002-3823-7201

^{2*}Каф. «Інженерія вагонів та якість продукції», Український державний університет залізничного транспорту, май. Фейєрбаха, 7, Харків, Україна, 61050, тел. +38 (057) 730 10 35, ел. пошта alyonalovskaya.vagons@gmail.com, ORCID 0000-0002-8604-1764

³Філія «Науково-дослідний та конструкторсько-технологічний інститут залізничного транспорту» АТ «Укрзалізниця», вул. С. Гедройця, 5, Київ, Україна, 03150, тел. +38(044) 309 61 36, ел. пошта ek1520mm@gmail.com, ORCID 0000-0001-6978-4489

⁴Каф. «Теплотехніка, теплові двигуни та енергетичний менеджмент», Український державний університет залізничного транспорту, май. Фейєрбаха, 7, Харків, Україна, 61050, тел. +38 (057) 730 10 21, ел. пошта Rukavishnikov@kart.edu.ua, ORCID 0000-0002-9670-3071

Визначення міцності контейнера зі стінами із сендвіч-панелей під час експлуатаційних режимів навантаження

Мета. Основною метою роботи є висвітлення результатів визначення міцності контейнера зі стінами із сендвіч-панелей за основних експлуатаційних режимів навантажень. **Методика.** Для забезпечення міцності несної конструкції контейнера запропоновано виготовити його торцеві та бокові стіни із сендвіч-панелей. При цьому передбачено створення сендвіч-панелей із двох металевих листів, між якими знаходиться наповнювач у вигляді енергопоглинального матеріалу. Товщину листів сендвіч-панелей визначено за методом Бубнова – Гальоркіна. Лист розглянуто як тонкостінну плиту з відповідними параметрами ширини та висоти. Для визначення міцності несної конструкції контейнера зі стінами із сендвіч-панелей проведено відповідні розрахунки за методом скінченних елементів у програмному комплексі SolidWorks Simulation. Як розрахунковий застосовано критерій Мізеса (IV теорія міцності). Просторову модель контейнера створено в SolidWorks. **Результати.** З урахуванням проведених розрахунків встановлено раціональну товщину листів, із точки зору забезпечення міцності, бокової та торцевої стін, яка склала, відповідно, 1,6 та близько 3,0 мм. Важливо, що застосування прямокутних гофр дає можливість зменшити товщину листа торцевої стіни до 1,0 мм. Також ж узятю і товщину листа бокової стіни. Максимальні напруження в контейнері в разі його подовжньої навантаженості виникають у фітингах і складають 268,3 МПа, що нижче за допустимі на 13,6 %. Максимальні напруження в контейнері за умови його поперечної навантаженості зафіксовані в зонах взаємодії бокової стіни з кутовими стійками. Чисельне значення цих напружень склало 178 МПа, що на 15,2 % нижче за допустимі. **Наукова новизна.** У роботі науково обґрунтовано використання сендвіч-панелей як стін універсального контейнера. **Практична значимість.** Проведені дослідження сприятимуть створенню рекомендацій щодо проектування сучасних конструкцій транспортних засобів модульного типу та підвищенню ефективності функціонування транспортної галузі.

Ключові слова: контейнер ISO; сендвіч-панель; навантаженість контейнера; міцність контейнера; контейнерні перевезення

Вступ

Забезпечення ефективності експлуатації машинобудівної галузі зумовлює необхідність створення та впровадження сучасних конструкцій транспортних засобів. Найбільш конкурентоспроможною складовою машинобудівної промисловості вже тривалий час є залізничний транспорт, на долю якого припадає значний сегмент вантажоперевезень [1]. При цьому однією з найбільш пріоритетних складових залізничної галузі є контейнерні перевезення. Разом із цим окрім ряду переваг, контейнерні перевезення порівняно з іншими транспортними симбіозами мають і суттєві недоліки, які полягають головним чином у недостатній міцності складових контейнерів. Це обумовлено значними величинами експлуатаційних навантажень, у тому числі знакозмінних динамічних, які на них. Таких навантажень зазнає не тільки контейнер, а й вантаж, розміщений у ньому. Унаслідок наявності власного ступеня вільності вантажу в контейнері може мати місце додаткова навантаженість його конструкції. У зв'язку з цим виникають пошкодження контейнерів, що спричиняє додаткові витрати на їх утримання в експлуатації, а також впливає на безпеку та екологічність перевезень. Тому дослідження, присвячені вдосконаленню конструкцій контейнерів із метою зменшення їх динамічної навантаженості за експлуатаційних режимів, є досить актуальними.

Особливості проектування контейнера ISO розглянуто в роботі [11]. Автори проаналізували основні схеми навантажень контейнера в експлуатації. Також у роботі досліджено опір конструкції впливом зовнішніх навантажень.

Конструкцію контейнера для перевезень плодоовочевої продукції запропоновано в роботі [12]. Наведено результати розрахунку контейнера на міцність та зазначено вимоги до умов його експлуатації. Разом із цим під час проектування таких контейнерів автори не запропонували рішень щодо поліпшення міцності їх стін як одного з найбільш вразливих елементів конструкції.

У статті [10] запропоновано контейнер із пружно-фрикційними складовими в конструкції. Таке вдосконалення сприяє зменшенню навантажень, які впливають на контейнер в експлуатації. Результати математичного моделювання динаміки, а також розрахунки на міц-

ність підтвердили доцільність такого вдосконалення. Однак необхідно сказати, що запропоноване в роботі вдосконалення не сприяє поліпшенню міцності стін контейнера в умовах транспортування, у тому числі залізницею.

Для зменшення динамічних навантажень, які впливають на транспортні засоби, водночас поліпшення їх показників міцності використовують сендвіч-панелі в їх конструкціях. Так, обґрунтування впровадження таких панелей у конструкцію залізничного транспортного засобу наведено в статті [7]. У роботі представлено алгоритм оптимізації несної конструкції транспортного засобу. Результати розрахунків показали, що таке впровадження сприяє зменшенню тари несної конструкції більше ніж на 16 % порівняно з прототипом.

Також використання сендвіч-панелей у конструкції кузова транспортного засобу обґрунтовано в роботах [8, 13]. Дослідження проведені на прикладі залізничного вагона. Таке впровадження можливо здійснювати не тільки під час виготовлення вагонів, а і в разі їх модернізації. Доведено доцільність запропонованого рішення шляхом теоретичних розрахунків на міцність несної конструкції вагона.

Важливо сказати, що автори цих публікацій не приділяли уваги питанню впровадження сендвіч-панелей у зйомні транспортні засоби, зокрема контейнери.

Проведений огляд літературних джерел дозволяє зробити висновок, що питання вдосконалення контейнерів є досить поширеними. Разом із цим поліпшенню їх міцності шляхом упровадження сендвіч-панелей у несні конструкції досі не приділяли належної уваги. У зв'язку з цим виникає необхідність проведення досліджень у зазначеному напрямку.

Мета

Основною метою дослідження є висвітлення результатів визначення міцності контейнера зі стінами із сендвіч-панелей за основних експлуатаційних режимів навантажень. Для досягнення зазначеної мети поставлені такі задачі:

- визначити товщину металевих листів, які утворюють сендвіч-панель;
- провести визначення міцності контейнера зі стінами із сендвіч-панелей у разі поздовжньої навантаженості його конструкції;

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

– провести визначення міцності контейнера зі стінами із сендвіч-панелей у разі поперечної навантаженості його конструкції.

Методика

Для забезпечення міцності несної конструкції контейнера запропоновано виготовити його торцеві та бокові стіни у вигляді сендвіч-панелей (рис. 1). При цьому поліпшення міцності стін контейнера досягається за рахунок зменшення динамічної навантаженості в умовах експлуатаційних режимів. Це у свою чергу сприятиме зменшенню пошкоджень контейнерів, а відповідно, і витрат на їх утримання. Передбачено створення сендвіч-панелей із двох металевих листів, між якими знаходиться наповнювач у вигляді енергопоглинального матеріалу.

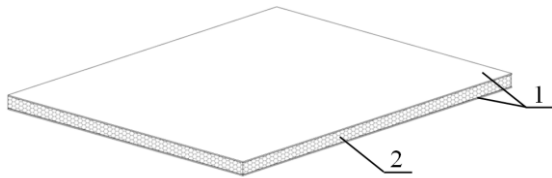


Рис. 1. Сендвіч-панель:
1 – металевий лист; 2 – наповнювач

Fig. 1. Sandwich panel:
1 – metal sheet; 2 – filler

Для поліпшення міцності сендвіч-панелі доцільно виготовити металеві листи, які її утворюють, із прямокутними гофрами (рис. 2).



Рис. 2. Переріз металевого листа сендвіч-панелі

Fig. 2. Cross-section of a metal sheet of a sandwich panel

Таке рішення обґрунтоване тим, що лист із прямокутною конфігурацією гофр має більший момент опору порівняно з іншими варіантами його виконання. При цьому сендвіч-панель матиме переріз, наведений на рис. 3.

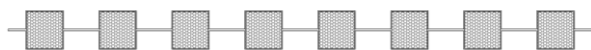


Рис. 3. Переріз сендвіч-панелі стіни контейнера

Fig. 3. Cross-section of the container wall sandwich panel

Тобто сендвіч-панель утворена двома гофрованими листами, а в прошарку, що утворюють гофри, розміщується наповнювач.

Товщину листів визначено за методом Бубнова – Гальоркіна. При цьому лист розглянуто як тонкостінну плиту з відповідними параметрами ширини та висоти. Напруження, які виникають у плиті, визначаються за виразом:

$$\sigma = P \cdot \frac{96}{\pi^4} \cdot \frac{(b^2 + \mu \cdot a^2) \cdot a^2 \cdot b^2}{(a^2 + b^2)^2 \cdot \delta^2}, \quad (1)$$

де P – тиск, що діє на плиту; a – ширина плити; b – висота плити; μ – коефіцієнт Пуассона; δ – товщина плити.

Звідси можна записати:

$$\delta = \sqrt{\frac{P \cdot 96 \cdot (b^2 + \mu \cdot a^2) \cdot a^2 \cdot b^2}{\sigma \cdot \pi^4 \cdot (a^2 + b^2)^2}}. \quad (2)$$

Під час визначення товщини листів сендвіч-панелей, які утворюють стіни контейнера, враховано нормативні схеми його навантажень в експлуатації (рис. 4) [4]. На рис. 4 літерою P позначено вантажопідйомність контейнера.

Розрахунок здійснено за умови виготовлення листів сендвіч-панелей зі сталі 09Г2С.

$a - a$

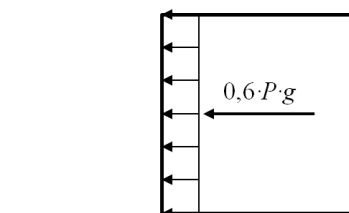
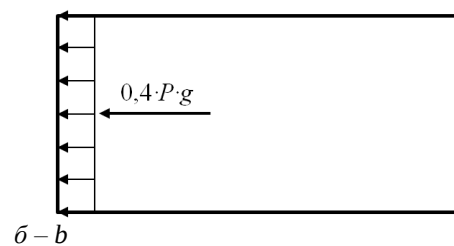


Рис. 4. Навантаження, які сприймає контейнер, розміщений на вагоні-платформі:

a – поздовжній; b – поперечні

Fig. 4. Loads perceived by the container, placed on a platform car:

a – longitudinal; b – transverse

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Основні характеристики матеріалу наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Основні характеристики сталі марки 09Г2С

Table 1

Main characteristics of steel grade 09G2S

Назва параметру	Значення
Модуль пружності, МПа	2,1
Коефіцієнт Пуассона	0,28
Масова щільність, кг/м ³	7 800
Межа міцності, МПа	490
Межа пластичності, МПа	345

Результати

З урахуванням проведених розрахунків товщина листа бокової обшивки склала 1,6 мм, а торцевої – близько 3,0 мм. Допустимі напруження під час визначення товщини листа бокової стіни взято рівними 210 МПа (III розрахунковий режим), а торцевої – 310,5 МПа (I розрахунковий режим) [3].

Застосування прямокутних гофр можливість зменшити товщину листів торцевої та бокової стін до 1,0 мм.

Для визначення міцності несної конструкції контейнера зі стінами із сендвіч-панелей проведено відповідні розрахунки за методом скінченних елементів у програмному комплексі SolidWorks Simulation [2, 6]. Як розрахунковий застосовано критерій Мізеса (IV теорія міцності). Просторову модель контейнера створено в SolidWorks (рис. 5).



Рис. 5. Просторова модель контейнера

Fig. 5. Spatial model of the container

Прозорим кольором на рис. 5 показано несну конструкцію контейнера, а матовим сірим – наповнювач, що знаходиться у стінах. Тобто під час проведення розрахунку на міцність контейнер розглянуто як конструкцію, яка складається з металокаркасу та металевих листів, що утворюють сендвіч-панель, а також наповнювача. При цьому наповнювач змодельовано постановкою прямокутних елементів із відповідними фізико-механічними властивостями в прошарок, який утворюють гофри листів.

Як наповнювач застосовано піноалюміній – один із найбільш поширених типів енергопоглинальних матеріалів, що знайшов використання в сучасному машинобудуванні [9]. Основні характеристики матеріалу наведено в табл. 2.

Таблиця 2

Основні характеристики наповнювача

Table 2

Main characteristics of the filler

Назва параметру	Значення
Модуль пружності, МПа	$2,42 \cdot 10^5$
Коефіцієнт Пуассона	0,394
Модуль зсуву, МПа	318,9
Межа міцності в напрямку волокон, МПа	1 100 – 1 300
Межа міцності в поперечному напрямку волокон, МПа	650

Як скінченні елементи використано просторові ізопараметричні тетраедри. Оптимальну кількість елементів визначено за графоаналітичним методом. Кількість вузлів сітки склала 7 1701, елементів – 223 937. Максимальний розмір елементу дорівнює 80 мм, мінімальний – 16 мм. Мінімальна кількість елементів у колі склала 9, співвідношення збільшення розмірів елементів у сітці – 1,7. Скінченно-елементу модель контейнера наведено на рис. 6. У місцях округлень та спряжень складових контейнера здійснено автоматичне ущільнення сітки.

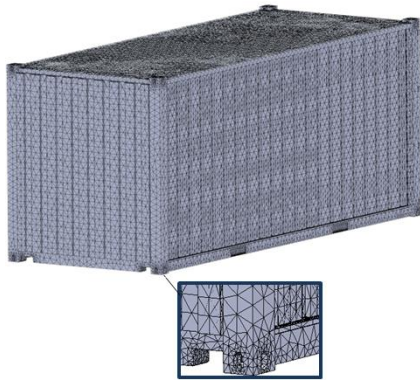


Рис. 6. Скінченно-елементна модель контейнера

Fig. 6. Finite element model of the container

Визначення міцності контейнера за поздовжньої навантаженості проведено за умови розміщення його на вагоні-платформі.

Під час складання розрахункової схеми враховано, що на несну конструкцію впливає вертикальне навантаження P_v з урахуванням використання повної вантажопідйомності контейнера, поздовжня сила P_n , прикладена до фітингів, а також тиск розпору насипного вантажу P_p (зерно) на бокові та торцеві стіни (рис. 7). Тиск розпору насипного вантажу розраховано за методикою, наведеною у [5].

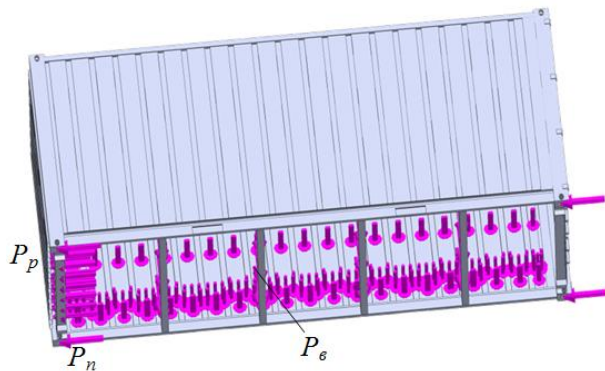


Рис. 7. Розрахункова схема контейнера

Fig. 7. Design scheme of the container

Закріплення моделі здійснено за фітинги.

За результатами проведених розрахунків установлено, що максимальні напруження виникають у фітингах контейнера і складають 268,3 МПа (рис. 8), що нижче за допустимі на 13,6 %. У зонах взаємодії торцевих стін із кутковою стійкою контейнера напруження склали близько 215 МПа.

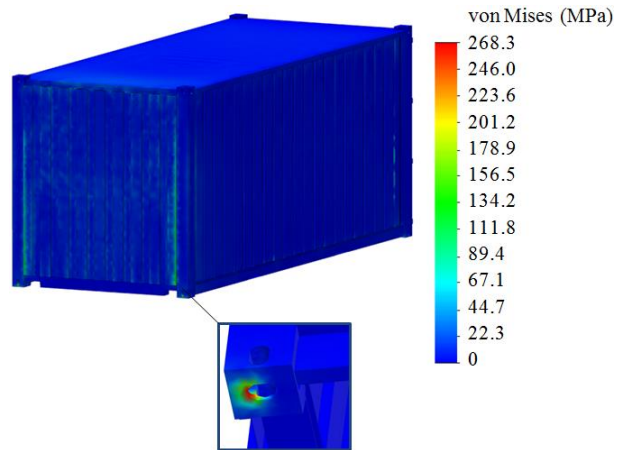


Рис. 8. Напружений стан контейнера

Fig. 8. Stressed state of the container

Максимальні переміщення зафіксовані в нижній частині торцевої стіни контейнера і склали 2,6 мм (рис. 9).

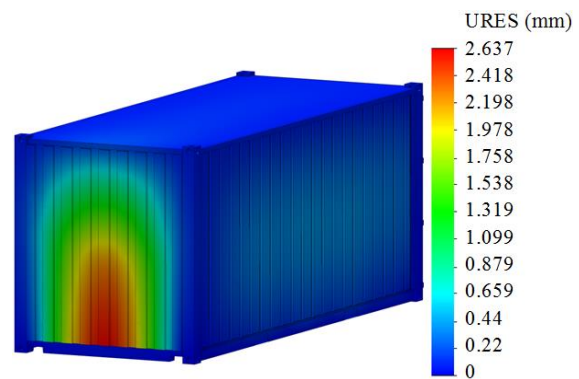


Рис. 9. Переміщення у вузлах контейнера

Fig. 9. Movement in container nodes

Також розрахунок на міцність проведено за навантаження бокової стіни контейнера відповідно до схеми, наведеної на рис. 4, б). Результати розрахунку представлено на рис. 10, 11. Максимальні напруження в контейнері зафіксовані в зонах взаємодії бокової стіни з кутковими стійками і склали 178 МПа (рис. 10), що на 15,2 % нижче за допустимі.

Максимальні переміщення виникають у середній частині бокової стіни і дорівнюють 3,1 мм (рис. 11). Отже, міцність контейнера забезпечується.

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

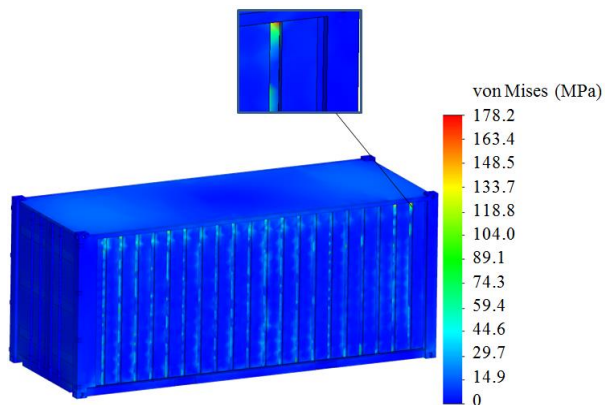


Рис. 10. Напружений стан контейнера

Fig. 10. Stressed state of the container

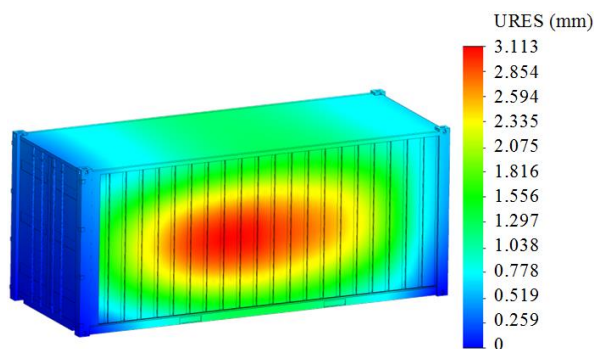


Рис. 11. Переміщення в вузлах контейнера

Fig. 11. Movement in container nodes

Наукова новизна та практична значимість

Науково обґрунтовано використання сендвіч-панелей як стін контейнера.

Проведені дослідження сприятимуть створенню рекомендацій щодо проектування сучас-

них конструкцій транспортних засобів модульного типу та підвищенню ефективності функціонування транспортної галузі.

Висновки

1. Визначено товщину металевих листів, які утворюють сендвіч-панель, із використанням методу Бубнова – Гальоркіна. Товщина листа бокової обшивки стін контейнера склала 1,6 мм, а торцевої – близько 3,0 мм. Важливо сказати, що застосування прямокутних гофр дає можливість зменшити товщину листа торцевої стіни до 1,0 мм. Такою ж узятю і товщину листа бокової стіни.

2. Проведено визначення міцності контейнера зі стінами із сендвіч-панелей за поздовжньої навантаженості його конструкції. Максимальні напруження при цьому виникають у фітингах контейнера і складають 268,3 МПа, що нижче за допустимі на 13,6 %. У місцях сполучення торцевих стін із кутовою стійкою контейнера напруження склали близько 215 МПа.

Максимальні переміщення спостерігають в нижній частині торцевої стіни контейнера, вони склали 2,6 мм.

3. Проведено визначення міцності контейнера зі стінами із сендвіч-панелей за поперечної навантаженості його конструкції. Максимальні напруження при цьому виявлено в місцях сполучення бокової стіни з кутовими стійками. Чисельне значення цих напружень склало 178 МПа, що на 15,2 % нижче за допустимі. Максимальні ж переміщення спостерігаються в середній частині бокової стіни, вони становлять 3,1 мм. Таким чином, міцність контейнера забезпечується.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Ватуля Г. Л., Ловська А. О., Краснокутський Є. С. Математичне моделювання вертикальної навантаженості контейнера типу хопер, розміщеного на довгобазній конструкції вагона-платформи. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Динаміка і міцність машин. 2022. № 1. С. 34–39. DOI: <https://doi.org/10.20998/2078-9130.2022.1.264323>
2. Ватуля Г. Л., Ловська А. О., Мямлін С. С., Павлюченков М. В. Дослідження навантаженості зйомного модуля для довгомірних вантажів при перевезенні у складі комбінованого поїзда залізничним поромом. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Динаміка і міцність машин. 2022. № 1. С. 27–33. DOI: <https://doi.org/10.20998/2078-9130.2022.1.264322>
3. ДСТУ 7598:2014. Вагони вантажні. Загальні вимоги до розрахунків та проектування нових і модернізованих вагонів колії 1520 мм (несамохідних). [Чинний від 2015-07-01]. Київ, 2015. 250 с.
4. ДСТУ ISO 8323:2015. Вантажні контейнери. Контейнери універсальні (інтермодальні) для повітряних і наземних перевезень. Технічні умови та методи випробувань. [Чинний від 2016-01-01]. Київ, 2015.

5. Ловська А. О. Визначення зусиль розпору насипного вантажу на стіни кузова напіввагону при перевезенні залізничним поромом. *Збірник наукових праць УкрДАЗТ*. 2014. Вип. 143. С. 54–57.
6. Ловська А. Оцінка динамічних зусиль на кузова вагонів при перевезенні залізничними поромами. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2014. Том 3, № 4 (69). С. 36–41. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2014.24997>
7. Al-Sukhon A., ElSayed M. S. Design optimization of hopper cars employing functionally graded honeycomb sandwich panels. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. 2021. Vol. 236. Issue 8. P. 920–935. DOI: <https://doi.org/10.1177/09544097211049640>
8. Chuan-jin O., Bing-tao L. Research and application of new multimodal transport equipment-swap bodies in China. *E3S Web of Conferences*. 2020. Vol. 145. P. 1–4. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202014502001>
9. Fomin O., Gerlici J., Gorbunov M., Vatulia G., Lovska A., Kravchenko K. Research into the Strength of an Open Wagon with Double Sidewalls Filled with Aluminium Foam. *Materials*. 2021. Vol. 14. Iss. 12. P. 1–10. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma14123420>
10. Fomin O., Gerlici J., Vatulia G., Lovska A., Kravchenko K. Determination of the Loading of a Flat Rack Container during Operating Modes. *Applied Science*. 2021. Vol. 11. Iss. 16. P. 1–13. DOI: <https://doi.org/10.3390/app11167623>
11. Giriunas K., Sezen H., Dupaix, R. B. Evaluation, modeling, and analysis of shipping container building structures. *Engineering Structures*. 2012. Vol. 43. P. 48–57. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.05.001>
12. Khadjimukhametova M. A., Merganov A. M. Development of the Design and Conditions of Operation of Containers for Transportation of Fruit and Vegetable Products. *International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE)*. 2020. Vol. 8. Iss. 5. P. 252–256. DOI: <https://doi.org/10.35940/ijrte.e4856.018520>
13. Płaczek M., Wróbel A., Olesiejuk M. Modelling and arrangement of composite panels in modernized freight cars. *MATEC Web of Conferences*. 2017. Vol. 112. P. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1051/matecconf/201711206022>

G. L. VATULIA¹, A. O. LOVSKA^{2*}, YE. S. KRASNOKUTSKYI³, P. V. RUKAVISHNIKOV⁴

¹Educational and Scientific Institute of Construction and Civil Engineering, O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Marshala Bazhanova St., 17, Kharkiv, Ukraine, 61002, tel. +38 (097) 560 91 30, e-mail glib.vatulia@kname.edu.ua, ORCID 0000-0002-3823-7201

^{2*}Dep. «Wagon Engineering and Product Quality», Ukrainian State University of Railway Transport, Feuerbach Sq., 7, Kharkiv, Ukraine, 61500, tel. +38 (057) 730 10 35, e-mail alyonalovskaya.vagons@gmail.com, ORCID 0000-0002-8604-1764

³Branch «Scientific Research and Design Technological Institute of Railway Transport» Joint stock company «Ukrzaliznytsia», Jerzy Giedroyc St., 5, Kyiv, Ukraine, 03150, tel. +38(044) 309 61 36, e-mail ek1520mm@gmail.com, ORCID 0000-0001-6978-4489

⁴Dep. «Heat Engineering, Heat Engines and Energy Management», Ukrainian State University of Railway Transport, Feuerbach Sq., 7, Kharkiv, Ukraine, 61050, tel. +38 (057) 730 10 21, e-mail Rukavishnikov@kart.edu.ua, ORCID 0000-0002-9670-3071

Determination of the Strength of a Container with Sandwich Panel Walls under Operational Loading Conditions

Purpose. The main purpose of this work is to present the results of determining the strength of a container with sandwich panel walls under the main operating modes of loading. **Methodology.** To ensure the strength of the bearing structure of the container, it is proposed to make its end and side walls from sandwich panels. This involves the creation of sandwich panels from two metal sheets, between which there is a filler in the form of an energy-absorbing material. The thickness of the sandwich panel sheets is determined by the Bubnov-Galerkin method. The sheet is considered as a thin-walled plate with the corresponding width and height parameters. To determine the strength of the load-bearing structure of a container with sandwich panel walls, the corresponding calculations were performed using the finite element method in the SolidWorks Simulation software package. The Mises criterion (IV theory of strength) was used as a calculation criterion. The spatial model of the container was created in SolidWorks. **Findings.** Taking into account the calculations, the rational thickness of the sheets, in terms of strength, of the side and end walls was established, which was 1.6 and about 3.0 mm, respectively. It is important that the use of rectangular corrugations makes it possible to reduce the thickness of the end wall sheet to 1.0 mm. The thickness of the side wall sheet is the same. The maximum stresses in the container in the case of its longitudinal loading occur in

the fittings and amount to 268.3 MPa, which is 13.6 % lower than the permissible ones. The maximum stresses in the container under transverse loading were recorded in the areas of interaction between the side wall and the corner posts. The numerical value of these stresses was 178 MPa, which is 15.2 % lower than the permissible ones. **Originality.** The paper scientifically substantiates the use of sandwich panels as the walls of a uni-versal container. **Practical value.** The research will contribute to the creation of recommendations for the design of modern modular-type vehicle structures and improve the efficiency of the transport industry.

Keywords: ISO container; sandwich panel; container load; container strength; container transportation

REFERENCES

1. Vatulia, G., Lovska, A., & Krasnokutskyi, Y. (2022). Mathematical modeling of the vertical load of a hopper-type container placed on a long-base structure of a platform car. *Bulletin of the National Technical University «KhPI» Series: Dynamics and Strength of Machines*, 1, 34-39. DOI: <https://doi.org/10.20998/2078-9130.2022.1.264323> (in Ukrainian)
2. Vatulia, G., Lovska, A., Myamlin, S., & Pavliuchenkov, M. (2022). Research into the loading of a removable module for transportation of long freight in a combined train by the train ferry. *Bulletin of the National Technical University «KhPI» Series: Dynamics and Strength of Machines*, 1, 27-33. DOI: <https://doi.org/10.20998/2078-9130.2022.1.264322> (in Ukrainian)
3. *Vagoni vantazhni. Zagalni vimogi do rozrahunkiv ta proektuvannya novih i modernizovanih vagoniv koliyi 1520 mm (nasamohidnih), 250 DSTU 7598:2014* (2015). (in Ukrainian)
4. *Vantazhni konteinery. Konteinery universalni (intermodalni) dlia povitrianykh i nazemnykh perevezhen. Tekhnichni umovy ta metody vyprobuvan, DSTU ISO 8323:2015* (2015). (in Ukrainian)
5. Lovska, A. O. (2014). Vznachennya zusal rozporu nasipnogo vantazhu na stini kuzova napivvagonu pri perevezenni zaliznichnim poromom. *Zbirnik naukovih prats UkrDAZT*, 143, 54-57. (in Ukrainian)
6. Lovskaya, A. (2014). Assessment of dynamic efforts to bodies of wagons at transportation with railway ferries. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(4(69)), 36-41. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2014.24997> (in Ukrainian)
7. Al-Sukhon, A., & ElSayed, M. S. (2021). Design optimization of hopper cars employing functionally graded honeycomb sandwich panels. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 236(8), 920-935. DOI: <https://doi.org/10.1177/09544097211049640> (in English)
8. Chuan-jin, O., & Bing-tao, L. (2020). Research and application of new multimodal transport equipment-swap bodies in China. *E3S Web of Conferences*, 145, 1-4. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202014> (in English)
9. Fomin, O., Gorbunov, M., Gerlici, J., Vatulia, G., Lovska, A., & Kravchenko, K. (2021). Research into the Strength of an Open Wagon with Double Sidewalls Filled with Aluminium Foam. *Materials*, 14(12), 1-10. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma14123420> (in English)
10. Fomin, O., Gerlici, J., Vatulia, G., Lovska, A., & Kravchenko, K. (2021). Determination of the Loading of a Flat Rack Container during Operating Modes. *Applied Sciences*, 11(16), 1-13. DOI: <https://doi.org/10.3390/app11167623> (in English)
11. Giriunas, K., Sezen, H., & Dupaix, R. B. (2012). Evaluation, modeling, and analysis of shipping container building structures. *Engineering Structures*, 43, 48-57. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.05.001> (in English)
12. Khadjimukhametova, M. A., & Merganov, A. M. (2020). Development of the Design and Conditions of Operation of Containers for Transportation of Fruit and Vegetable Products. *International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE)*, 8(5), 252-256. DOI: <https://doi.org/10.35940/ijrte.e4856.018520> (in English)
13. Płaczek, M., Wróbel, A., & Olesiejuk, M. (2017). Modelling and arrangement of composite panels in modernized freight cars. *MATEC Web of Conferences*, 112, 1-6. DOI: <https://doi.org/10.1051/matecconf/201711206022> (in English)

Надійшла до редколегії: 03.11.2023

Прийнята до друку: 06.03.2024

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

УДК 624.01:624.042

Д. О. БАННІКОВ^{1*}, А. В. РАДКЕВИЧ², С. М. КОСЯЧЕВСЬКА³

^{1*}Каф. «Будівельне виробництво та геодезія», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (063) 400 43 07, ел. пошта d.o.bannikov@ust.edu.ua, ORCID 0000-0002-9019-9679

²Каф. «Будівельне виробництво та геодезія», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 42, ел. пошта a.v.radkevich@ust.edu.ua, ORCID 0000-0001-6325-8517

³Каф. «Будівельне виробництво та геодезія», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (050) 855 00 93, ел. пошта s.m.kosiachevska@ust.edu.ua, ORCID 0000-0001-5539-2847

Зміни щодо нормативного визначення кліматичних навантажень і впливів на будівельні конструкції

Мета. Основною метою публікації є якісний та кількісний аналіз змін щодо кліматичних навантажень, які пов'язані з уведенням в дію у вітчизняній нормативній базі стандарту ДБН В.1.2–2:2006, порівняно з попереднім стандартом, а також подальших змін до цього стандарту. **Методика.** Для досягнення цієї мети були розглянуті як самі стандарти з визначення навантажень і впливів на будівельні конструкції, так і введені в дію Зміни, що передбачали низку новацій. Основний акцент при цьому зроблено на методології визначення різних видів кліматичних навантажень, зокрема навантажень від власної ваги ґрунтів, снігового та вітрового навантажень, ожеледно-вітрового навантаження, а також системи складання сполучень цих навантажень. Охоплено питання термінологічного забезпечення процесу визначення навантажень. **Результати.** На основі виконаного порівняльного аналізу встановлено, що запропонований у Змінах підхід до складання сполучень навантажень дозволяє отримати більш високі їх значення, ніж всі попередньо використані підходи. Методика визначення навантаження від власної ваги ґрунтів залишилась без змін. Методика визначення снігового та вітрового навантажень змінена принципово. При цьому остаточні значення навантажень є в 2,5–3 рази вищими за значення в попередньому стандарті. Найбільше це проявилось для Сумської та Чернігівської областей України. Методика визначення ожеледно-вітрового навантаження доповнена в частині врахування вітрового напору за наявності ожеледних відкладень. При цьому кореляція з вітровим напором за умови відсутності ожеледних відкладень не є досить чіткою. **Наукова новизна.** Якісно та кількісно оцінено зміни в методиці визначення основних видів кліматичних навантажень на будівельні конструкції для умов України, зокрема навантажень від власної ваги ґрунтів, снігового та вітрового навантажень, ожеледно-вітрового навантаження, а також системи складання сполучень цих навантажень. **Практична значимість.** Отримано дані, які дозволяють визначити шляхи та напрями подальшого вдосконалення та уточнення наявних методик розрахунку основних кліматичних навантажень для умов України.

Ключові слова: ДБН В.1.2–2:2006; кліматичні навантаження; будівельна конструкція; снігове навантаження; вітрове навантаження; ожеледно-вітрове навантаження; сполучення навантажень

Вступ

Протягом останніх 5 років, незважаючи на надзвичайно складні умови, пов'язані спочатку з карантинними заходами, а тепер і з воєнним станом, в Україні доволі інтенсивними темпами проходить процес оновлення нормативної бази взагалі і в будівництві зокрема. Постійно відбувається вдосконалення різноманітних будівельних стандартів шляхом уведення в дію змін.

Також розробляють нові будівельні стандарти, що частково або повністю замінюють чинні або взагалі є абсолютно новими, які раніше не існували та не використовували в проєктній практиці.

Одним із базових у частині проєктування будівельних конструкцій є стандарт із визначення навантажень і впливів [6]. Він замінив стандарт, що доволі тривалий час (понад 20

років) використовували в Україні (СНиП 2.01.07–85).

Новий стандарт не тільки окреслює термінологію, яку застосовують для опису процесу визначення навантажень і впливів, але й подає класифікацію навантажень і впливів, регламентує процес їх визначення і формування з них сполучень різних типів. Напевно, на час введення в дію (2007 рік) цей стандарт був практично єдиним нормативним документом у вітчизняній нормативній будівельній базі, що змістовно хоча б якось корелював з європейськими будівельними стандартами. При цьому здебільшого було збережено вітчизняне надбання в частині принципів та правил визначення величин навантажень і впливів, проте почалось і використання європейської термінології та європейських традиційних позначень. Тому з повним правом слід вважати стандарт [6] своєрідним «проривом», який для свого часу був досить значним.

На цей час щодо тексту стандарту двічі введено в дію зміни. Перші з них були підготовлені ще в 2006 році до набуття цим стандартом чинності [7], а другі зміни – нещодавно, у 2020 році [8].

Мета

Зважаючи на вищевикладене, основною метою дослідження є якісний та кількісний аналіз змін щодо кліматичних навантажень, які пов'язані з введенням в дію у вітчизняній нормативній базі стандарту ДБН В.1.2–2:2006 [6], порівняно з попереднім стандартом, а також подальших змін до цього стандарту.

Методика

Для досягнення зазначеної мети були розглянуті як самі стандарти з визначення навантажень і впливів на будівельні конструкції, так і введені в дію Зміни, що передбачали низку новацій.

Насамперед слід зауважити, що в закордонній будівельній практиці питання визначення навантажень і впливів у будівельній галузі взагалі та кліматичних навантажень і впливів зокрема розглядають доволі суттєво. У першу чергу наявна література охоплює спеціалізовані публікації в провідних виданнях, які детально описують окремі аспекти завдання навантажень

і впливів на будівельні конструкції [11, 13, 20]. Більш ґрунтовні дослідження викладено в наявній фаховій літературі у вигляді монографій [14–17]. Також доволі суттєво висвітлені питання визначення навантажень і впливів на будівельні конструкції в чинній нормативній базі. Так, наприклад, європейський стандарт [12] містить чотири основні частини: щодо основних видів дій (EN 1991–1), дій на мости (EN 1991–2), дій кранів і машинного обладнання (EN 1991–3) і дій на силоси, резервуари, трубопроводи (EN 1991–4). У свою чергу перша частина поділяється ще на 7 більш дрібних частин: власна вага і загальні дії на конструкції (EN 1991–1–1), дії на конструкції під час пожежі (EN 1991–1–2), снігові навантаження (EN 1991–1–3), вітрові дії (EN 1991–1–4), теплові дії (EN 1991–1–5), дії під час зведення (EN 1991–1–6), особливі динамічні дії (EN 1991–1–7).

Цікаво також відзначити, що під час перекладу назв частин єврокодів із мови оригіналу у вітчизняній практиці доволі часто використовують термін «дія», який змістовно ближче до вітчизняного терміна «вплив». Проте однозначності в цьому питанні немає.

У вітчизняній практиці питання визначення кліматичних навантажень і впливів на будівельні конструкції доволі широко розглядають у спеціалізованій фаховій літературі, наприклад [9]. Однак вона має вузькоспрямований характер, орієнтований на розгляд окремих питань. До того ж має місце своєрідна нерівномірність у ступені уваги і, відповідно, представлення різних видів навантажень і впливів. Також відсутній комплексний аналіз нормативних документів щодо визначення навантажень і впливів, особливо в частині аналізу змін до цих стандартів.

Так, найбільш досліджуваними є якраз кліматичні навантаження – снігові, вітрові, ожеледні. У меншому ступені розроблені питання розрахунку сейсмічних і температурних впливів. Інші види таких навантажень – хвильові, льодові, тиск ґрунтів – у наш час відносять до важкопрогнозованих, що не мають однозначної теорії опису їх взаємодії з будівельними конструкціями. Це змушує авторів проводити спеціальні дослідження та створювати власні теоретичні моделі [18, 19].

Стосовно техногенних навантажень, які, здавалось би, є більш передбачуваними і прогнозованими, ніж природно-кліматичні, ситуація в цілому гірша. Багато видів таких навантажень мають лише наближені моделі, які продовжують уточнювати та вдосконалювати, як, наприклад, кранове навантаження [10] або динамічні навантаження [5].

Одним із чинників цього є складність у лабораторному моделюванні подібних техногенних навантажень через суттєвий вплив фактора подібності і труднощі в проведенні натурних вимірювань, адже це вимагає доволі значних матеріальних і, головне, часових ресурсів [3, 4]. Додатковим чинником, який ще більше погіршує ситуацію, є своєрідна невизначеність із класифікацією будівельних конструкцій [1]. На практиці це все результується в численні відмови та аварії будівельних конструкцій [2].

Результати

Для більш детального аналізу методики розрахунку кліматичних навантажень виконаємо зіставлення різноманітних версій основного нормативного документа в Україні [6] щодо визначення навантажень і впливів на будівельні конструкції, а також запроваджених Змін до нього [7, 8]. Розглянемо їх за різними складовими частинами.

1. Класифікація навантажень і впливів. Основу стандарту СНИП 2.01.07–85 складала класифікація навантажень і впливів за походженням. При цьому виділено в окремі розділи такі види навантажень і впливів: власну вагу конструкцій і ґрунтів, навантаження на перекриття і підлоги будівель, навантаження від мостових і підвісних кранів, снігові навантаження, вітрові навантаження, ожеледні навантаження і температурні кліматичні впливи. Чинний стандарт України [6] повністю повторив класифікацію навантажень і впливів за їх походженням.

З точки зору складання сполучень навантажень у стандарті використана додаткова класифікація навантажень і впливів за тривалістю дії. При цьому виділено постійні, тривалі, короткочасні й особливі їх види, що дало можливість складати сполучення двох типів – основні та особливі.

У чинному стандарті України [6] в додатковій класифікації за тривалістю дії замість «осо-

бливих» навантажень і впливів був використаний термін «епізодичні». Також замість «особливих» сполучень був використаний термін «аварійні».

Обидві запроваджені Зміни [7, 8] не торкнулися цього питання.

2. Визначення розрахункових характеристик навантажень і впливів. За старим стандартом СНИП 2.01.07–85 як основне значення навантажень вважали нормативне значення. Для отримання розрахункового значення його множили на коефіцієнт надійності за навантаженням, який мав фіксоване постійне значення для кожного виду навантажень.

Відповідно до чинного стандарту [6], замість терміна «нормативне» було запроваджено термін «характеристичне». Крім цього, замість одного розрахункового значення запроваджено 4, які визначають за допомогою чотирьох різних коефіцієнтів надійності за навантаженням: граничним, експлуатаційним, циклічним і квазістатичним. Якщо призначення перших двох є доволі зрозумілим і зазначено чітко, то призначення останніх двох до цього часу є розпливчастим і, на жаль, не знайшло уточнення у введених у дію Змінах [7, 8].

Також спірним у чинних нормах залишається питання прив'язки коефіцієнтів надійності за навантаженням до терміну експлуатації конструкції. На практиці це призводить до відсутності рівнонадійності конструкції щодо строку її служби. Так, наприклад, для конструкцій із терміном експлуатації в 5 років (що є доволі актуальним для умов теперішнього тимчасового відновлення) розрахункове значення снігового навантаження виявляється майже вдвічі нижчим, ніж для конструкцій із терміном експлуатації в 50 років. Проте на практиці немає жодних гарантій того, що за ці 5 років експлуатації снігове навантаження не досягне свого пікового значення, яке спостерігалось за 50 років.

3. Складання сполучень навантажень і впливів. Чинний стандарт України [6] повністю перейняв стару систему складання сполучень навантажень і впливів зі стандарту СНИП 2.01.07–85. Вона передбачає необхідність складання двох типів сполучень – основних та аварійних (особливих – за старим стандартом). При цьому використовують спеціальний коефіцієнт сполучень ψ , що враховує малу «... імовірність одно-

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

часної реалізації розрахункових значень декількох навантажень».

З урахуванням цього для випадку складання основних сполучень навантажень можливими є два варіанти призначення коефіцієнта сполучень для короточасних навантажень $K1$ – $K3$, відповідно до виразів:

$$F1 = 0,9 \cdot K1 + 0,9 \cdot K2 + 0,9 \cdot K3; \quad (1)$$

$$F2 = 1,0 \cdot K1 + 0,8 \cdot K2 + 0,6 \cdot K3. \quad (2)$$

Однак подібні вирази не мають теоретичного обґрунтування в спеціалізованій або фаховій літературі. Також чітко видно, що зниження значення коефіцієнта сполучень не відповідає ідеї, закладеній у сам коефіцієнт – врахування зниженої ймовірності різних видів короточасних навантажень. Наприклад, якщо навантаження $K2$ або $K3$ є меншими за значенням, ніж навантаження $K1$, але їх ймовірність появи вища, ніж для $K1$, то і коефіцієнт сполучень має бути вищим. Ця можливість у чинному стандарті не врахована.

Уведені Зміни № 2 [8] коригують ситуацію, залишаючи тільки один варіант розрахунку з дещо усередненими значеннями коефіцієнта сполучення, проте принципово це ситуацію не змінює:

$$F3 = 1,0 \cdot K1 + 0,9 \cdot K2 + 0,7 \cdot K3. \quad (3)$$

Орієнтовна кількісна оцінка ситуації відповідно до виразів (1) – (3) наведена в табл. 1. Розглянуто найбільш розповсюджений діапазон значень короточасних навантажень на будівлі цивільного і промислового призначення з відносно невеликими прольотами 6–12 м. За навантаження взято: $K1$ – навантаження від ваги людей на перекриття, $K2$ – снігове навантаження, $K3$ – вітрове навантаження. Видно, що практично для всіх розглянутих випадків найгірше значення (виділено в таблиці темним кольором) відповідає виразу (3), тобто внесеним до стандарту Змінам.

4. Визначення навантажень від власної ваги конструкцій і ґрунтів.

Для цього типу навантажень у чинному стандарті України [6] відсутні будь-які коригування порівняно з попереднім стандартом СНИП 2.01.07–85. У введених Змінах [7, 8] також відсутні будь-які коригування. Фактично цей до-

волі простий вид навантажень і не потребує певних коригувань.

5. Визначення снігового навантаження. Відповідно до чинного стандарту України [6], снігове навантаження потрібно визначати за новим виразом (4) на відміну від виразу (5) для попереднього стандарту СНИП 2.01.07–85:

$$S_m = \gamma_{fm} \cdot S_0 \cdot \mu \cdot C_e \cdot C_{alt}; \quad (4)$$

$$S = \gamma_f \cdot S_0 \cdot \mu. \quad (5)$$

Як видно, структурно ці вирази однакові. Відмінність полягає у визначенні коефіцієнта надійності γ_f , який для чинного стандарту, як зазначено вище, прив'язаний до терміну експлуатації конструкції. Унаслідок цього він може змінюватись у діапазоні 0,24–1,44. За попереднім стандартом цей коефіцієнт мав фіксоване значення 1,4 (1,6).

Характеристичне (нормативне) значення снігового навантаження S_0 у чинному стандарті збільшено доволі суттєво, у середньому в 2,5 рази. Тому виникає нестандартна ситуація, коли будівельні конструкції, спроектовані до набуття чинності нового стандарту, продовжують успішно експлуатуватись, «незважаючи» на таке збільшення рівня снігового навантаження (табл. 2).

Значення коефіцієнта форми конструкції μ залишилось без змін у чинному та попередньому стандартах. Додатково введений коефіцієнт C_e призначений для врахування можливого підтаювання снігового покриву для неутеплених конструкцій покриттів на величину 20 %. Додатково введений коефіцієнт C_{alt} передбачає врахування висоти розташування будівельної конструкції над рівнем моря і набуває значення більше ніж 1,0 тільки для висоти понад 0,5 км, що для території України доволі нехарактерно.

Також зазначимо, що останнім часом дані візуальних спостережень свідчать про зниження рівня снігового навантаження та перетворення його в дощове навантаження. Дощові навантаження, до речі, не регламентуються національними нормами України, проте вони регламентуються національними нормами інших країн, наприклад, Канади. Тому виникає потреба в розробці національної методики оцінки дощового навантаження.

Таблиця 1

Кількісна оцінка впливу значення коефіцієнта сполучень навантажень

Table 1

Quantitative assessment of the influence of the value of the load combination factor

Значення навантажень, кН			Сума навантажень, кН			Значення навантажень, кН			Сума навантажень, кН		
K1	K2	K3	F1	F2	F3	K1	K2	K3	F1	F2	F3
100	50	–100	45	80	75	200	50	–100	135	180	175
100	50	–50	90	110	110	200	50	–50	180	210	210
100	50	–25	112,5	125	127,5	200	50	–25	202,5	225	227,5
100	50	0	135	140	145	200	50	0	225	240	245
100	50	25	157,5	155	162,5	200	50	25	247,5	255	262,5
100	50	50	180	170	180	200	50	50	270	270	280
100	50	100	225	200	215	200	50	100	315	300	315
100	100	–100	90	120	120	200	100	–100	180	220	220
100	100	–50	135	150	155	200	100	–50	225	250	255
100	100	–25	157,5	165	172,5	200	100	–25	247,5	265	272,5
100	100	0	180	180	190	200	100	0	270	280	290
100	100	25	202,5	195	207,5	200	100	25	292,5	295	307,5
100	100	50	225	210	225	200	100	50	315	310	325
100	100	100	270	240	260	200	100	100	360	340	360
100	150	–100	135	160	165	200	150	–100	225	260	265
100	150	–50	180	190	200	200	150	–50	270	290	300
100	150	–25	202,5	205	217,5	200	150	–25	292,5	305	317,5
100	150	0	225	220	235	200	150	0	315	320	335
100	150	25	247,5	235	252,5	200	150	25	337,5	335	352,5
100	150	50	270	250	270	200	150	50	360	350	370
100	150	100	315	280	305	200	150	100	405	380	405
300	50	–100	225	280	275	400	50	–100	315	380	375
300	50	–50	270	310	310	400	50	–50	360	410	410
300	50	–25	292,5	325	327,5	400	50	–25	382,5	425	427,5
300	50	0	315	340	345	400	50	0	405	440	445
300	50	25	337,5	355	362,5	400	50	25	427,5	455	462,5
300	50	50	360	370	380	400	50	50	450	470	480
300	50	100	405	400	415	400	50	100	495	500	515
300	100	–100	270	320	320	400	100	–100	360	420	420
300	100	–50	315	350	355	400	100	–50	405	450	455

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

Продовження табл. 1
Continuation of Table 1

Значення навантажень, кН			Сума навантажень, кН			Значення навантажень, кН			Сума навантажень, кН		
K1	K2	K3	F1	F2	F3	K1	K2	K3	F1	F2	F3
300	100	–25	337,5	365	372,5	400	100	–25	427,5	465	472,5
300	100	0	360	380	390	400	100	0	450	480	490
300	100	25	382,5	395	407,5	400	100	25	472,5	495	507,5
300	100	50	405	410	425	400	100	50	495	510	525
300	100	100	450	440	460	400	100	100	540	540	560
300	150	–100	315	360	365	400	150	–100	405	460	465
300	150	–50	360	390	400	400	150	–50	450	490	500
300	150	–25	382,5	405	417,5	400	150	–25	472,5	505	517,5
300	150	0	405	420	435	400	150	0	495	520	535
300	150	25	427,5	435	452,5	400	150	25	517,5	535	552,5
300	150	50	450	450	470	400	150	50	540	550	570
300	150	100	495	480	505	400	150	100	585	580	605

Таблиця 2

Характеристичні (нормативні) значення снігового та вітрового навантажень

Table 2

Characteristic (standard) values of snow and wind loads

№ пор	Обласне місто	Снігове навантаження, Па		Вітрове навантаження, Па		Сума навантажень, Па	
		СНиП 2.01.07–85	ДБН В.1.2–2:2006	СНиП 2.01.07–85	ДБН В.1.2–2:2006	максимум	мінімум
1	Вінниця	700	1 400	300	500	1 900	900
2	Дніпро	500	1 400	380	500	1 900	900
3	Донецьк	500	1 600	380	500	2 100	1 100
4	Житомир	700	1 600	300	500	2 100	1 100
5	Запоріжжя	500	1 200	380	500	1 700	700
6	Івано-Франківськ	500	1 600	380	500	2 100	1 100
7	Київ	700	1 600	300	400	2 000	1 200
8	Кропивницький	500	1 400	300	450	1 850	950
9	Луганськ	500	1 400	380	500	1 900	900
10	Луцьк	500	1 400	380	550	1 950	850
11	Львів	500	1 400	380	550	1 950	850
12	Миколаїв	500	1 000	380	500	1 500	500

Продовження табл. 2
Continuation of Table 2

№ пор	Обласне місто	Снігове навантаження, Па		Вітрове навантаження, Па		Сума навантажень, Па	
		СНиП 2.01.07–85	ДБН В.1.2–2:2006	СНиП 2.01.07–85	ДБН В.1.2–2:2006	максимум	мінімум
13	Одеса	500	1 000	380	500	1 500	500
14	Полтава	700	1 600	300	500	2 100	1 100
15	Рівне	500	1 400	380	550	1 950	850
16	Сімферополь	500	1 000	380	500	1 500	500
17	Суми	700	1 800	300	450	2 250	1 350
18	Тернопіль	500	1 400	380	550	1 950	850
19	Ужгород	500	1 400	230	400	1 800	1 000
20	Харків	700	1 600	300	450	2 050	1 150
21	Херсон	500	800	380	500	1 300	300
22	Хмельницький	500	1 400	380	500	1 900	900
23	Черкаси	700	1 600	300	450	2 050	1 150
24	Чернівці	500	1 400	300	500	1 900	900
25	Чернігів	700	1 800	300	450	2 250	1 350

6. Визначення вітрового навантаження.

Відповідно до чинного стандарту України [6], вітрове навантаження слід визначати за новим виразом (6) на відміну від виразу (7) для попереднього стандарту СНиП 2.01.07–85:

$$W_m = \gamma_{fm} \cdot W_0 \cdot C_{aer} \cdot C_{alt} \cdot C_{dir} \cdot C_d \cdot C_h \cdot C_{rel}; \quad (6)$$

$$W = \gamma_f \cdot W_0 \cdot k \cdot C. \quad (7)$$

Як і у випадку снігового навантаження, структурно ці вирази також схожі. Відмінність полягає у визначенні коефіцієнта надійності γ_f , який для чинного стандарту, як і у випадку снігового навантаження, прив'язаний до терміну експлуатації конструкції. Унаслідок цього він може змінюватись у діапазоні 0,24–1,44. За попереднім стандартом цей коефіцієнт мав фіксоване значення 1,4.

Характеристичне (нормативне) значення вітрового навантаження W_0 в чинному стандарті збільшено в середньому в 1,5 раза. Сумарний ефект від дії снігового і вітрового навантажень відповідно до чинних норм на будівельні конструкції представлений на рис. 1. Кольори відповідають наведеним у табл. 2.

Аеродинамічний коефіцієнт C_{aer} (C) не зазнав змін у чинному і попередньому стандартах. У Змінах № 2 [8] його значення для випадку розрахунку кріплень огорожувальних елементів до несучих конструкцій збільшено із 2,0 до 3,5. Найімовірніше, це обумовлено недостатньою якістю влаштування таких кріплень і відсутністю методики точних розрахунків сучасних видів кріплень, наприклад, кріплень дерев'яних елементів на саморізах.

Нові введені коефіцієнти C_{dir} і C_{rel} враховують специфічні місцеві умови розташування конструкцій – нерівномірність вітрового навантаження за напрямками вітру й умови мікрорельєфу в зоні будівництва. Для більшості практичних випадків ці коефіцієнти дорівнюють 1,0.

Додатково введений коефіцієнт C_{alt} , як і для випадку снігового навантаження, передбачає врахування висоти розташування будівельної конструкції над рівнем моря і набуває значення більше ніж 1,0 тільки для висоти понад 0,5 км, що для території України доволі нехарактерно.

Окремим питанням виявилось визначення коефіцієнта врахування висоти будівельної конструкції C_h (k). Незважаючи на певні уточ-

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

нення формулювань для типів місцевості, зміни в кількісному визначенні цього коефіцієнта представлені в табл. 3. У середньому збільшення значень цього коефіцієнта в остаточному варіанті норм склало 1,5–2 рази. Відмінність у значеннях пов'язана з прийнятою моделлю вітрового потоку. Проте залишається питання щодо експериментального підтвердження цієї моделі.

Також слід відзначити, що Зміни № 2 [8] передбачають виконання спеціального перевірного розрахунку на резонансне вихрове збудження для конструкцій, у яких висота більше ніж у 10 разів перевищує характерний поперечний розмір у напрямку, перпендикулярному швидкості вітру. В один із виразів для цієї перевірки включено коефіцієнт врахування висоти, тому питання його коректного визначення є доволі актуальним.

Таким чином, з урахуванням збільшення характеристик значень вітрового навантаження остаточно його підвищення складає 2,5–3 рази, що є аналогічним до підвищення снігового навантаження.

7. Визначення ожеледно-вітрового навантаження. В чинному стандарті України [6], порівняно з попереднім стандартом СНиП 2.01.07–85, додана значна частина розрахункового матеріалу, присвяченого впливу вітрових навантажень у випадку наявності ожеледі на поверхні конструкції. Також подана сама схема утворення ожеледних відкладень та схема районування території України за тиском вітру в разі ожеледі.

Через це доволі цікавим є зіставлення значень характеристичного вітрового навантаження для випадків наявності та відсутності ожеледних відкладень. Вони представлені у вигляді графіка на рис. 2 (нумерація міст відповідає наведеній у табл. 2). Як видно, кореляційна залежність є не дуже чіткою. При цьому автори неодноразово стверджували, що ожеледні відкладення не впливатимуть на показники вітрового навантаження. Тому це питання залишається відкритим і потребує більш детального вивчення для можливості його узгодження з даними спостережень за вітровим навантаженням.

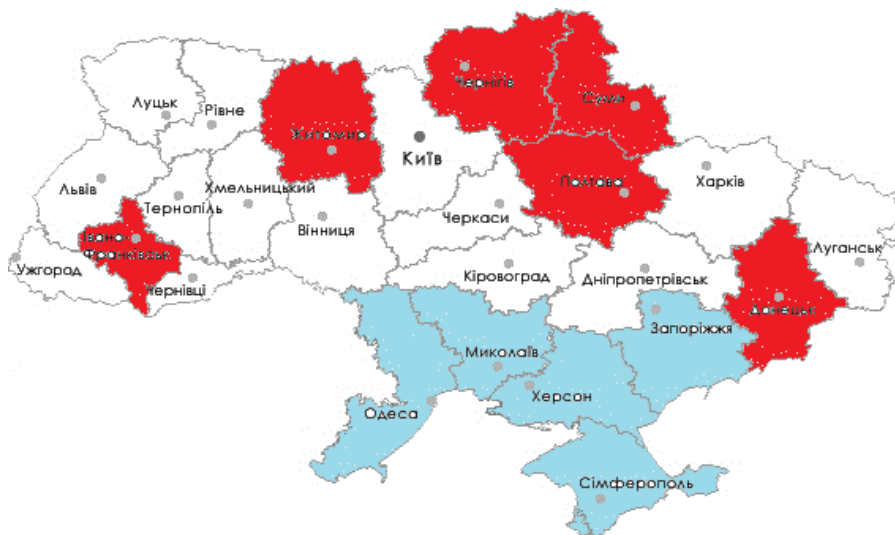


Рис. 1. Розподіл території України за сумарним впливом снігового та вітрового навантажень

Fig. 1. Distribution of the territory of Ukraine by the total impact of snow and wind loads

Таблиця 3

Зміни коефіцієнта висоти конструкції

Table 3

Changes in the construction height factor

Ви-со-та, м	Значення коефіцієнта для типу місцевості											
	I			II			III			IV		
	СНиП 2.01.07–85	ДБН В.1.2–2:2006	Зміни № 1	СНиП 2.01.07–85	ДБН В.1.2–2:2006	Зміни № 1	СНиП 2.01.07–85	ДБН В.1.2–2:2006	Зміни № 1	СНиП 2.01.07–85	ДБН В.1.2–2:2006	Зміни № 1
≤ 5	0,75	2,40	1,40	0,50	1,75	1,20	0,50	1,70	0,90	0,40	1,60	0,60
10	1,00	2,75	1,80	0,65	2,30	1,50	0,65	1,70	1,20	0,40	1,60	1,00
20	1,25	3,25	1,95	0,85	2,75	1,85	0,85	2,25	1,55	0,55	1,60	1,40
40	1,50	3,75	2,25	1,10	3,25	2,20	1,10	2,80	2,00	0,80	2,25	1,95
60	1,70	4,00	2,45	1,30	3,60	2,45	1,30	3,20	2,25	1,00	2,65	2,25
80	1,85	4,20	2,65	1,45	3,80	2,60	1,45	3,35	2,45	1,15	2,80	2,50
100	2,00	4,30	2,70	1,60	4,00	2,70	1,60	3,65	2,60	1,25	3,00	2,70
150	2,25	4,65	2,95	1,90	4,35	3,00	1,90	4,00	2,90	1,55	3,50	3,10
200	2,45	4,80	3,10	2,10	4,60	3,15	2,10	4,25	3,20	1,80	3,75	3,40

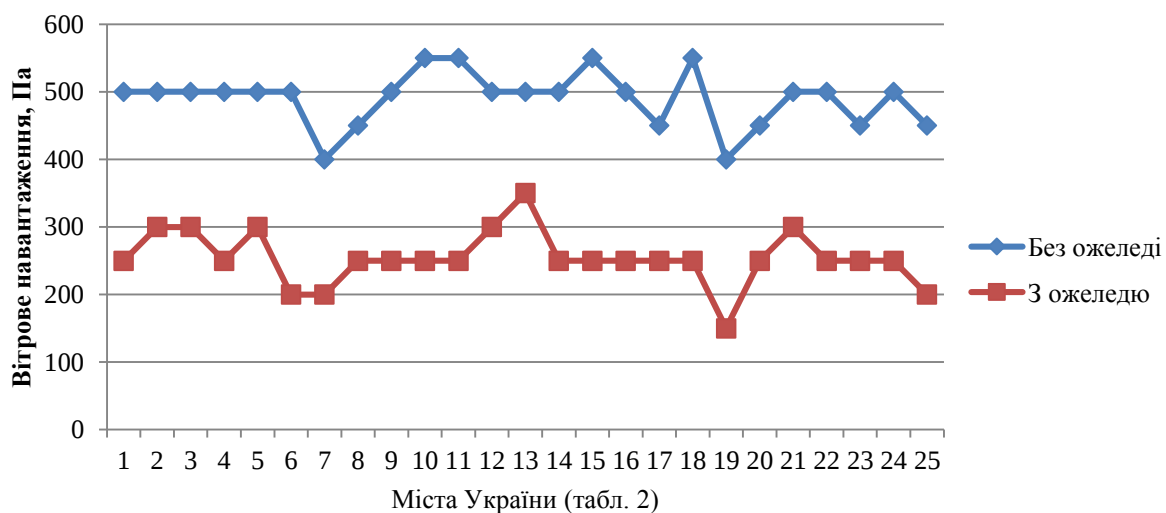


Рис. 2. Зміна вітрового тиску залежно від ожеледних відкладень

Fig. 2. Changes in wind pressure depending on ice deposits

8. *Визначення температурних кліматичних впливів.* В чинному стандарті України [6], порівняно з попереднім стандартом СНиП 2.01.07–85, спрощено визначення середньодобових температур зовнішнього повітря в теплу і холодну пору року – фактично їх рекомендовано бра-

ти сталими незалежно від територіального розташування конструкції. Такий підхід, на нашу думку, фактично нівелює весь зміст температурних розрахунків. У запроваджених Змінах [7, 8] це питання залишається неврегульованим.

Наукова новизна та практична значимість

Таким чином, у цій публікації якісно та кількісно оцінено зміни в методиці визначення основних видів кліматичних навантажень на будівельні конструкції для умов України, зокрема навантажень від власної ваги ґрунтів, снігового та вітрового навантажень, ожеледно-вітрового навантаження, а також системи складання сполучень цих навантажень.

З практичної точки зору, у ході проведеного аналізу отримано дані, які дозволяють визначити шляхи та напрями подальшого вдосконалення та уточнення наявних методик розрахунку основних кліматичних навантажень для умов України.

Висновки

На основі виконаного порівняльного аналізу встановлено, що запропонований у Змінах підхід до складання сполучень навантажень дозволяє отримати більш високі їх значення, ніж усі попередньо використані підходи. Методика визначення навантаження від власної ваги ґрунтів залишилась без змін. Методика визначення снігового та вітрового навантажень змінена принципово. При цьому остаточні значення навантажень є в 2,5–3 рази вищими за значення в попередньому стандарті. Найбільше це проявилось для Сумської та Чернігівської областей України. Методика визначення ожеледно-вітрового навантаження доповнена в частині врахування вітрового напору за наявності ожеледних відкладень. При цьому кореляція з віт-

ровим напором за умови відсутності ожеледних відкладень не є дуже чіткою.

Як основні проблемні питання, на які варто акцентувати увагу в ході подальших досліджень, слід визначити:

1. Необхідність більш чіткого визначення сфер застосування для циклічних і квазіпостійних видів розрахункових значень навантажень.

2. Необхідність забезпечення рівнонадійності кліматичних навантажень незалежно від строку експлуатації конструкцій.

3. Необхідність розробки методики врахування в «ступені впливу» в разі визначення значення коефіцієнта сполучень навантажень такого фактору, як імовірність впливу окремого навантаження на конструкцію.

4. Необхідність розробки національної методики оцінки дощового навантаження та внесення його до переліку нормованих видів кліматичних навантажень України.

5. Уведення до норм експериментально підтверджені моделі зміни вітрового потоку за висотою і визначення на її основі уточненого значення коефіцієнта врахування висоти будівельної конструкції C_h .

6. Вивчення питання впливу вітрових навантажень на елементи будівельних конструкцій із ожеледними відкладеннями та уточнення кореляції цього навантаження для випадку відсутності ожеледних відкладень.

7. Нормативне врегулювання питання визначення середньодобових температур зовнішнього повітря для різних періодів року.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Банніков Д. О., Нікіфорова Н. А., Косячевська С. М. Сучасний стан класифікації транспортних будівельних конструкцій в Україні. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*. 2022. № 21. С. 35–43. DOI: <https://doi.org/10.15802/bttrp2022/258221>
2. Банніков Д. О. Аварії та відмови сталевих тонкостінних циліндричних силосів для зернових культур. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*. 2019. № 15. С. 6–17. DOI: <https://doi.org/10.15802/bttrp2019/172336>
3. Банніков Д. О. Експериментальні дослідження статичної поведінки сипучого середовища в ємнісній конструкції. *Вісник ДНУЗТ*. 2009. Вип. 26. С. 103–111. <https://doi.org/10.15802/stp2009/14319>
4. Банніков Д. О. Експериментальні дослідження динамічних властивостей сталевих ємнісних конструкцій для сипучих вантажів. *Підйомно-транспортна техніка*. 2008. № 4. С. 79–88.
5. Городецький О. С., Гензерський Ю. В. Різні підходи до розрахунку конструкцій на динамічні впливи. *Наука та будівництво*. 2019. № 3 (21). С. 35–41. DOI: <https://doi.org/10.33644/scienceandconstruction.v21i3.112>
6. ДБН В.1.2-2:2006 Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Навантаження і впливи. *Норми проектування*. [Чинний від 01.01.2007]. Київ : Мінбуд. 2007. 60 с.

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

7. Зміна № 1 до ДБН В.1.2-2:2006 Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Навантаження і впливи. Норми проектування. Київ : Мінрегіон розвитку та будівництва, 2007. 2 с.
8. Зміна № 2 до ДБН В.1.2-2:2006 Навантаження і впливи. Норми проектування. Київ : Мінрозвитку громад та територій, 2020. 10 с.
9. Пічугін С. Ф. Тенденції розвитку норм вітрового навантаження на будівельні конструкції. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*. 2022. № 18. С. 98–116.
DOI: [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2022-8\(18\)-12](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2022-8(18)-12)
10. Пічугін С. Ф., Патенко Ю. Е. Вплив кранових навантажень на каркаси виробничих будівель. *Збірник наукових праць Українського науково-дослідного та проектного інституту сталевих конструкцій імені В. М. Шимановського*. 2010. Вип. 5. С. 106–116.
11. Arnold R., Kraus M. On the nonstationary identification of climate-influenced loads for the semi-probabilistic approach using measured and projected data. *Cogent Engineering*. 2022. Vol. 9. P. 1–25.
DOI: <https://doi.org/10.1080/23311916.2022.2143061>
12. CEN (European Committee for Standardization). *EN 1991. Eurocode 1: Actions on structures*. 2002.
URL: <https://eurocodes.jrc.ec.europa.eu/EN-Eurocodes/eurocode-1-actions-structures>
13. Cheng K., Yao J., Lv G., Liu N., Zhang Y. Research on Reliability of Structural Members Subjected to Snow or Wind Load for Design Working Life of 100 Years in China. *Sustainability*. 2022. Vol. 14. Iss. 3. P. 1921–1934. DOI: <https://doi.org/10.3390/su14031921>
14. Fanella D. A. *Rain, Snow, and Ice Loads: Time-Saving Methods Using the 2018 IBC and ASCE/SEI 7-16*. McGraw-Hill Education, 2021. 176 p.
15. Fanella D. A. *Seismic Loads: Time-Saving Methods Using the 2018 IBC and ASCE/SEI 7-16*. McGraw-Hill Education, 2022. 240 p.
16. Fanella D. A. *Structural Load Determination: 2018 and 2021 IBC and ASCE/SEI 7-16*. McGraw-Hill Education, 2021. 576 p.
17. Fanella D. A. *Wind Loads: Time Saving Methods Using the 2018 IBC and ASCE/SEI 7-16*. McGraw-Hill Education, 2020. 256 p.
18. Tiutkin O., Miroshnyk V., Radkevych A., Alkhdour A. Nonuniform Stress State of a Hoisting Shaft Lining as a Result of Disturbance of the Ground Freezing Technology. *E3S Web of Conferences*. 2019. Vol. 109. P. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201910900099>
19. Tiutkin O., Petrosian N., Radkevych A., Alkhdour A. Regularities of Stress State of Unsupported Working Occurring in a Layered Massif. *E3S Web of Conferences*. 2019. Vol. 109. P. 1–7.
<https://doi.org/10.1051/e3sconf/201910900100>
20. Wu X., Cheng R., Liu G., Chan T. H. T. Indirectly measuring the displacements of tension structures under dominant design loads by exerting simple testing loads. *Engineering Structures*. 2021. Vol. 248. P. 11357. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.11357>

D. O. BANNIKOV^{1*}, A. V. RADKEVYCH², S. M. KOSIACHEVSKA³

^{1*}Dep. «Construction Production and Geodesy», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (063) 400 43 07, e-mail d.o.bannikov@ust.edu.ua, ORCID 0000-0002-9019-9679

²Dep. «Construction Production and Geodesy», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 42, e-mail a.v.radkevich@ust.edu.ua, ORCID 0000-0001-6325-8517

³Dep. «Construction Production and Geodesy», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (050) 855 00 93, e-mail s.m.kosiachevska@ust.edu.ua, ORCID 0000-0001-5539-2847

Changes to the Regulatory Definition of Climatic Loads and Impacts on Building Structures

Purpose. The main purpose of the publication is a qualitative and quantitative analysis of changes in climate loads associated with the introduction of the DBN V.1.2–2:2006 standard in the national regulatory framework, compared to the previous standard, as well as further changes to this standard. **Methodology.** To achieve this goal, both the standards for determining loads and impacts on building structures and the Amendments introduced, which provided for a number of innovations, were considered. The main emphasis is placed on the methodology for determining various types of climatic loads, including loads from the self-weight of soils, snow and wind loads, ice and wind loads, as well as the system for compiling combinations of these loads. The issue of terminology for the pro-

cess of determining loads is covered. **Findings.** Based on the comparative analysis, it has been established that the approach to load combinations proposed in the Amendments allows obtaining higher values than all previously used approaches. The methodology for determining the load from the self-weight of soils remained unchanged. The methodology for determining snow and wind loads has been fundamentally changed. The final values of the loads are 2.5–3 times higher than the values in the previous standard. This is most evident in Sumy and Chernihiv regions of Ukraine. The methodology for determining the ice and wind load was supplemented in terms of taking into account the wind pressure in the presence of ice deposits. At the same time, the correlation with wind pressure in the absence of ice deposits is not clear enough. **Originality.** Changes in the methodology for determining the main types of climatic loads on building structures for the conditions of Ukraine, in particular, loads from the self-weight of soils, snow and wind loads, ice and wind loads, as well as the system for compiling combinations of these loads, were qualitatively and quantitatively assessed. **Practical value.** The data obtained make it possible to determine the ways and directions for further improvement and refinement of the existing methods for calculating the main climatic loads for the conditions of Ukraine.

Keywords: DBN V.1.2–2:2006; climatic loads; building structure; snow load; wind load; ice and wind load; load combination

REFERENCES

1. Bannikov, D. O., Nikiforova, N. A., & Kosiachevska, S. M. (2022). Modern state of classification of transport building structures in Ukraine. *Bridges and tunnels: theory, research, practice*, 21, 35-43. DOI: <https://doi.org/10.15802/btrp2022/258221> (in Ukrainian)
2. Bannikov, D. O. (2019). Accidents and failures of steel thin-walled cilindric silos for grain cultures. *Bridges and tunnels: theory, research, practice*, 15, 6-17. DOI: <https://doi.org/10.15802/btrp2019/172336> (in Ukrainian)
3. Bannikov, D. O. (2009). Experimental studies of static behavior of granular media in the capacitive structure. *Science and Transport Progress*, 26, 103-111. <https://doi.org/10.15802/stp2009/14319> (in Ukrainian)
4. Bannikov, D. O. (2008). Experimental studies of dynamic properties of steel container structures for bulk cargoes. *Hoisting and Conveying Equipment*, 4, 79-88. (in Ukrainian)
5. Gorodetsky, A. S., & Genzersky, Y. V. (2019). Different approaches to dynamic analysis of structures. *Science & Construction*, 3(21), 35-41. DOI: <https://doi.org/10.33644/scienceandconstruction.v21i3.112> (in Russian)
6. *Systema zabezpechennya nadiynosti ta bezpeky budivel'nykh ob'yektiv. Navantazhennya i vplyvy. Normy proektuvannya*, 60 DBN V.1.2-2:2006. (2007). (in Ukrainian)
7. *Systema zabezpechennya nadiynosti ta bezpeky budivel'nykh ob'yektiv. Navantazhennya i vplyvy. Normy proektuvannya*, 2 Zmina No. 1 do DBN V.1.2-2:2006. (2006). (in Ukrainian)
8. *Navantazhennya i vplyvy. Normy proektuvannya*, 10 Zmina No. 2 do DBN V.1.2-2:2006. (2020). (in Ukrainian)
9. Pichugin, S. F. (2022). Trends of development of wind load codes for building structures. *Modern technologies and methods of calculations in construction*, 18, 98-116. DOI: [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2022-8\(18\)-12](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2022-8(18)-12) (in Ukrainian)
10. Pichugin, S. F., & Patenko, Yu. E. (2022). The influence of crane loads on the frames of industrial buildings. *Collection of scientific works of the Ukrainian Research and Design Institute of Steel Structures named after V. M. Shymanovsky*, 5, 106-116. (in Ukrainian)
11. Arnold, R., & Kraus, M. (2022). On the nonstationary identification of climate-influenced loads for the semi-probabilistic approach using measured and projected data. *Cogent Engineering*, 9, 1-25. DOI: <https://doi.org/10.1080/23311916.2022.2143061> (in English)
12. CEN (European Committee for Standardization). (2002). *EN 1991. Eurocode 1: Actions on structures*. Retrieved from <https://eurocodes.jrc.ec.europa.eu/EN-Eurocodes/eurocode-1-actions-structures> (in English)
13. Cheng, K., Yao, J., Lv, G., Liu, N., & Zhang, Y. (2022). Research on Reliability of Structural Members Subjected to Snow or Wind Load for Design Working Life of 100 Years in China. *Sustainability*, 14(3), 1921-1934. DOI: <https://doi.org/10.3390/su14031921> (in English)
14. Fanella, D. A. (2021). *Rain, Snow, and Ice Loads: Time-Saving Methods Using the 2018 IBC and ASCE/SEI 7-16*. McGraw-Hill Education. (in English)
15. Fanella, D. A. (2022). *Seismic Loads: Time-Saving Methods Using the 2018 IBC and ASCE/SEI 7-16*. McGraw-Hill Education. (in English)
16. Fanella, D. A. (2021). *Structural Load Determination: 2018 and 2021 IBC and Asce/SEI 7-16*. McGraw-Hill Education. (in English)

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

17. Fanella, D. A. (2020). *Wind Loads: Time Saving Methods Using the 2018 IBC and ASCE/SEI 7-16*. McGraw-Hill Education. (in English)
18. Tiutkin, O., Miroshnyk, V., Radkevych A., & Alkhdour, A. (2019). Nonuniform Stress State of a Hoisting Shaft Lining as a Result of Disturbance of the Ground Freezing Technology. *E3S Web of Conferences*, 109, 1-6. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201910900099> (in English)
19. Tiutkin, O., Petrosian, N., Radkevych, A. & Alkhdour, A. (2019). Regularities of Stress State of Unsupported Working Occurring in a Layered Massif. *E3S Web of Conferences*, 109, 1-7. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201910900100> (in English)
20. Wu, X., Cheng, R., Liu, G., & Chan, T. H. T. (2021). Indirectly measuring the displacements of tension structures under dominant design loads by exerting simple testing loads. *Engineering Structures*, 248, 11357. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113257> (in English)

Надійшла до редколегії: 13.11.2023

Прийнята до друку: 14.03.2024

УДК 624.21.09-047.44:[624.012.4:624.014.2]

Д. С. СПІВАК^{1*}, С. В. КЛЮЧНИК²

^{1*}Каф. «Транспортна інфраструктура», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (099) 200 07 64, ел. пошта d.s.spivak@ust.edu.ua, ORCID 0000-0002-8155-7497

²Каф. «Транспортна інфраструктура», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (050) 667 40 49, ел. пошта ssser05@ukr.net, ORCID 0000-0001-7771-8377

Критичний аналіз розвитку конструкції решітчастих трубобетонних мостів з їздою зверху

Мета. У роботі передбачено висвітлити та обґрунтувати необхідність пошуку раціональних схем конструкцій решітчастих трубобетонних мостів з їздою зверху на основі аналізу останніх досліджень та нормативних документів. **Методика.** Проаналізовано актуальні наукові дослідження для визначення сучасного стану розвитку трубобетонних решітчастих конструкцій. Наведено методи поліпшення конструкцій. Проаналізовано комбінації заповнення елементів решіток бетоном, варіанти перерізів елементів решіток, їхні переваги та недоліки. Розглянуто стан будівельних норм України та інших країн з метою визначення можливих варіантів проектування трубобетонних мостових конструкцій. Через відсутність детальних досліджень із цього питання визначено доцільність реалізації оптимізаційних досліджень для зазначених конструкцій та необхідні для цього кроки. **Результати.** Оптимізація конструкцій трубобетонних мостів є актуальним напрямом досліджень, проте вимагає багатокомплексного підходу та використання сучасних комп'ютерних потужностей. Запропоновано метод лінійної оптимізації та визначено його загальні кроки для пошуку економічних моделей. З'ясовано, що база українських ДБН у сфері трубобетонних конструкцій є обмеженою, але може бути розширена за рахунок використання європейських стандартів та інших міжнародних нормативних документів. **Наукова новизна.** Висвітлено необхідність глобального розвитку та вдосконалення трубобетонних решіток прогонових будов мостів. Акцентовано увагу на перевагах цього напрямку, який сприяє прийняттю рішень на етапі вибору типу мосту та детального проектування решітчастих трубобетонних мостів. Запропоновано методику пошуку оптимальних решіток, у яку можна інтегрувати наявні методи поліпшення конструкцій та вимоги нормативних документів. **Практична значимість.** Результати дослідження можуть бути використані для поліпшення конструкцій трубобетонних мостів на етапі проектування. Оптимізування решіток може сприяти підвищенню ефективності будівництва та надійності цього виду мостових споруд.

Ключові слова: трубобетон; трубобетонні мостові конструкції; композитні решітчасті мости; ферма з їздою зверху; оптимізація

Вступ

Композитний матеріал трубобетон давно зарекомендував себе як головний несний елемент для прийняття екстремальних навантажень. Понад 30 років його використовують у мостобудівництві, особливого поширення він набув у Китаї, що підтверджено історією та досвідом будівництва більше ніж двох сотень мостів. Серед них переважають саме аркові, що підкреслює одну з найвигідніших умов використання, де несний елемент працює переважно на осьовий стиск [2].

Зміни також торкнулися класичних фермових прогонових будов. Загальновідомо, що решітчасті конструкції мають чудове співвідношення несної здатності та власної ваги, а також

хороші економічні показники в цілому. Механізм передачі навантаження в цій конструкції також простий та ефективний: згинальний момент від навантаження перетворюється на осьові сили верхніх та нижніх поясів. Тому заповнення поясів бетоном є хорошим конструктивним рішенням: бетонне осердя поліпшує стійкість сталевих труб до вигину, а заливання бетону в розтягнуті пояси дає переваги для застосування попереднього напруження. Такі рішення призводять до збільшення загальної жорсткості фермових конструкцій та меншої висоти ферми, тим самим скорочують витрату матеріалів [10].

Композитні фермові конструкції з трубобетонними поясами вперше розробив L. Y. Zhang (1999), їх схему показано на рис. 1. [4]. Прогін містить трикутне розташування труб у перерізі

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

та залізобетонну плиту проїзду. Типовим інженерним застосуванням цієї конструкції є міст Сянцзяба (Xiangjiaba, рис. 2, *а*), Зідонг (Zidong, рис. 2, *б*) та Ганхайзі (Ganhaizi, рис. 2, *в*) [4].

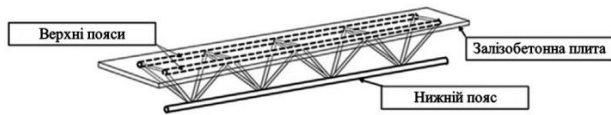
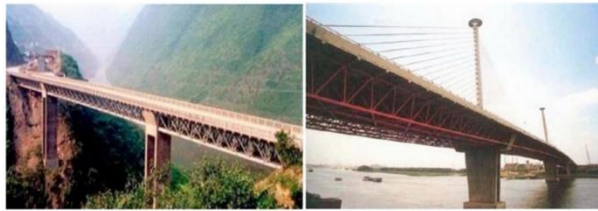


Рис. 1. Композитна трубобетонна ферма

Fig. 1. Composite pipe and concrete truss

Сьогодні найдовшою конструкцією у світі з використанням композитної ферми залишається міст Ганхайзі. Він збудований у 2012 році, має довжину 1 811 метрів, складається з 36 прогонів, найбільший із яких становить 62,5 метри.



а) міст Сянцзяба (Xiangjiaba Bridge)

б) міст Зідонг (Zidong Bridge)



в) міст Ганхайзі (Ganhaizi Bridge)

Рис. 2. Решітчасті мости з трикутним перерізом розташування трубобетонних поясів

Fig. 2. Lattice bridges with a triangular cross-section of the arrangement of pipe concrete belts

Просторові решітки часто застосовують у мостах з обмеженими вимогами до висоти прогонів, тому в них задіяні більш складні з'єднання, які мають забезпечити легкий монтаж конструкції та задовольняти усім необхідним граничним умовам. У такому випадку литі сталеві з'єднання (рис. 3, *а*) часто є хорошою альтернативою зварним.

Трубобетонні ферми з їздою зверху мають більше варіацій поперечних перерізів. Трикутний переріз (рис. 4, *а*) є найпростішим поперечним перерізом, що складається з двох верхніх та од-

ного нижнього пояса. Його зазвичай використовують у малопрогонових мостах у діапазоні довжин прогонів 40–60 м. Трапецієподібний переріз (рис. 4, *б*) складається з трьох верхніх поясів і двох нижніх. Чотири частини одинарної ферми, з'єднані горизонтальними елементами, утворюють просторову систему стабільною як у вертикальному, так і горизонтальному напрямках, що частіше використовують на автомобільних дорогах із наявністю більше ніж дві смуги руху.

а – а



б – б



Рис. 3. Вузол об'єднання елементів решітки в нижньому поясі дворівневого пішохідно-автомобільного мосту р. Незенбах (Nesenbach) у Німеччині:

а – литий вузол з'єднання елементів;

б – загальний вигляд мосту

Fig. 3. The grid element connection unit in the lower girders of the two-level pedestrian and highway bridge on the Nesenbach River in Germany:

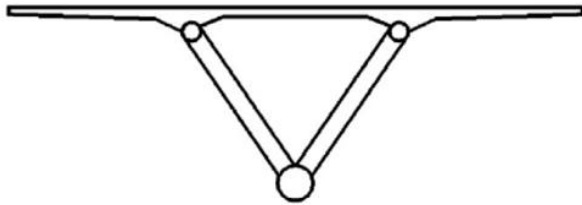
а – cast element connection unit;

б – general view of the bridge

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

Прикладом економічної переваги композитної ферми є експеримент [4], у якому було виконано порівняння трубобетонних ферм мостів Зідонг та Сянцзяба з конструкцією, яку часто використовують у Китаї, а саме залізобетонною балкою коробчастої перерізу. Для мосту Зідонг витрата сталі між композитною фермою та бетонною коробчастою балкою становить 1,11:1, але коефіцієнт використання бетону становить 0,57:1. Аналогічні співвідношення сталі та бетону для мосту Сянцзяба спостерігалися зі значеннями 1,09:1 та 0,47:1 відповідно. Тому використання трубобетонних ферм замість залізобетонних балок значно полегшує конструкцію та зменшує собівартість за матеріалами.

a – a



б – б

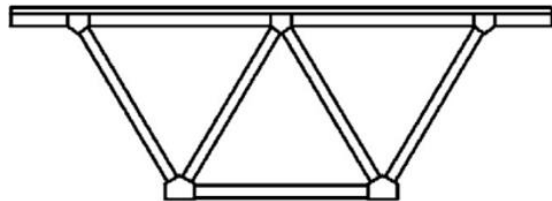


Рис. 4. Поперечні перерізи ферми із їздою зверху:
a – трикутний переріз; *б* – трапецієподібний переріз

Fig. 4. Cross-sections of a truss with a ride on top:
a – triangular section; *b* – trapezoidal section

Елементи решітки зазвичай складаються з круглих або прямокутних перерізів. У наш час круглий переріз елементів став більш популярним через високу ефективність утримання бетону та його сумісну роботу. Однак у такій структурі є недоліки. Вузол об'єднання елементів (рис. 3) із круглих труб дуже складний. Потрібне точне різання на кінцях елементів та значні зварювальні роботи або окреме лиття вузлів (рис. 4, *б*), що призводить до збільшення техніко-економічних витрат. І навпаки, прямокутні з'єднання забезпечують просту геометрію, оскільки для підготовки кінців елемента потрібні

тільки прямі розрізи. Така конструкція більш економна ніж з'єднання з круглих труб.

У пустотних елементах ферм найслабшим місцем є з'єднання, схильні до статичного та втомного руйнування. Для вирішення цих проблем розроблені різні конструктивні рішення, що дозволяють повною мірою використовувати композиційні рішення в першому випадку та оптимізацію конструкції в стикі у другому. Для прямокутних та круглих перерізів це класичний порожній перетин з бетонним наповненням, а для прямокутних можливе посилення сталевим ребром, що додатково позначають як PBL (німецькою Perfobond Leister) (рис. 5).

a – a



б – б



Рис. 5. Вузли об'єднання трубобетонних елементів круглого (*a*) та прямокутного (*б*) перерізу

Fig. 5. Joints of pipe concrete elements of circular (*a*) and rectangular (*b*) cross-section

Зазвичай такі ребра вздовж перерізу мають отвори для поліпшення зчеплення з бетоном. На рис. 6 і 7 представлено типові інженерне застосування моста з композитних ферм із використанням прямокутних елементів, посилені PBL.

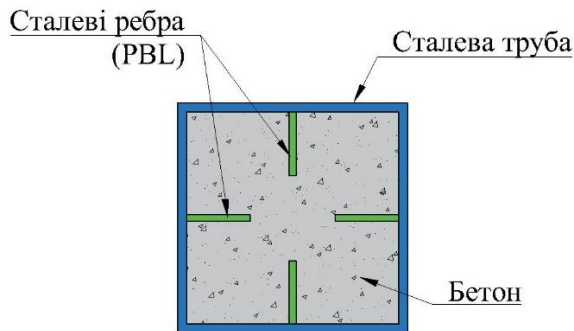


Рис. 6. Посилення прямокутного трубобетонного перерізу сталевими ребрами з отворами

Fig. 6. Reinforcement of a rectangular pipe-concrete section with steel ribs with holes



Рис. 7. Реальне застосування посилення ребрами конструкції мосту

Fig. 7. Real application of rib reinforcement of a bridge structure

Поперечні розміри елементів у звичайних сталевих фермах часто визначають умови міцності вузлів їх об'єднання. У такому випадку елементи проєктують для досягнення пікового стану руйнування у вузлах через наявність згинальних моментів, а не через руйнування пояса, тому елементи решіток інколи мають нераціональні витрати ресурсів [9]. Заповнення вузлів бетоном ефективно знижує концентрацію напруги та поліпшує жорсткість, що призводить до збільшення втомної довговічності та граничної несної здатності, а водночас відкриває можливість до зменшення розмірів постійних перерізів у поясах.

Відомо, що міцність решітки не задовольняється міцністю поясів, адже часто стиснуті елементи в решітках, наприклад, розкоси, мають першочерговий граничний стан за стійкістю. У цьому напрямі виконано лабораторні експерименти в [11], де наповнені бетоном та армовані трубчасті решітки у гратчастих фермах випробувані статичними та циклічними навантажен-

нями. Автори виявили, що втомна міцність трубобетонних в'язів була майже у два рази вищою, ніж у пустотілих варіантах.

Існують випадки, коли для будівництва прогонових будов, зокрема аркових, використовують вторинні труби, що дозволяє істотно зменшити споживання матеріалів. Оскільки процеси демонтажу елементів, відновлення та транспортування впливають на навколишнє середовище, повторне використання не завжди може бути кращим порівняно з новим будівництвом. Залежно від умов будівництва можливі випадки комбінування вторинних та нових труб для будівництва прогону з трубобетону [8].

У випадку додавання до ферми залізобетонної плити поліпшуються характеристики конструкції на вигин. Наявність бетонної плити досліджено в роботі [5], де додатково розглянуто параметри кінця зсуву ферми, кута між розкосом і поясом у разі їхнього заповнення бетоном. Результати показали, що і заповнення бетоном труб, і бетонна плита значно поліпшили характеристики ферми на вигин. На основі цього дослідження та чинних нормативних документів були запропоновані та перевірені спрощені моделі трубобетонних ферм.

Трубобетон як композитний матеріал має недоліки, спричинені взаємодією між бетоном та сталлю, що особливо спостерігається в разі граничних навантажень або згині елементів. Результати дослідження Юн Хуей Хуанг та ін. [3] підтверджують це, дефекти поверхні контакту між сталевією трубою та бетонним осердям істотно впливають на граничну несну здатність ферм CFST. Гранична несна здатність протестованих моделей зі стовідсотковим розділенням в зоні контакту матеріалів нижча ніж із повністю склеєними варіантами. При розділенні контакту по його глибині на 10 та 20 % результати показали зменшення граничної несної здатності на 18 та 37,7 % відповідно. Тому важливо уникати проблеми розділення матеріалів у зоні контакту по глибині у фермових трубобетонних конструкціях.

Загалом використання трубобетону у фермах та його наявний «асортимент» перерізів демонструє кращі показники міцності на розтяг порівняно з пустотілими варіантами. Тому постає питання раціональності та економічності його ви-

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

користання в певній схемі решітки, запровадження нетипових рішень в умовах будівництва. Вирішення цього питання дозволить пришвидшити впровадження композитної конструкції трубобетонних мостів в межах України та доповнити галузь знань за її межами.

Мета

Для кращого розуміння вибору конструкції, визначення пошуку раціональних схем решіток відповідно до певних умов у роботі передбачено висвітлити поточний стан конструювання решічастих трубобетонних мостів.

Методика

Аналіз наукових джерел та нормативних документів крізь призму останніх досліджень мостових решічастих трубобетонних прогонових будов потребує визначення багатьох параметрів для оптимізації геометричних змінних. Методика поєднання сфери наукових досліджень та правил нормативних документів дозволяє якісніше виявити корисні моделі конструкцій для їхнього практичного використання. Вищенаведений огляд актуальних проблем та поліпшення конструкцій, а також огляд нормативних документів щодо їхнього проєктування дозволяє акцентувати доцільність подальшого розвитку цього питання.

Через відсутність прецедентів дослідження мостових трубобетонних прогонових будов, використання методу лінійної оптимізації допоможе створити підґрунтя для виділення більш вузьких векторів розвитку на шляху до визначення оптимальних варіантів конструкцій.

Результати

Стан нормативних документів. Розглянемо нормативну базу України. Найбільш розгорнута інформація згадка про бетононаповнені сталеві труби наявна в ДБН В.2.6–160:2010 «Сталезалізобетонні конструкції. Основні положення». Проте документ містить лише загальні принципи конструювання для стиснутих елементів, що можна охарактеризувати як відсутність власних норм розрахунку у сфері мостобудівництва.

Набагато краще ситуація постає з використанням Єврокоду. Єврокод 4 пропонує достатньо розгорнуту інформацію та підхід до проєктування стискальних та згинальних трубобетонних елементів. Завдяки напряму державної політики на інтеграцію з Євросоюзом маємо компліментовану версію у вигляді ДСТУ–Н Б EN, що робить проєктування трубобетонних конструкцій доступнішим.

Відомо також про китайські, японські та американські норми з цього напрямку. Китайські DBJ/T13–51–2020 та японські «Recommendations for design and construction of concrete filled steel tubular structures» 2008 року є окремими документами, а американські є складовою частиною документа з проєктування сталевих конструкцій ANSI/AISC 360–16. Різниця між ними, включаючи Єврокод 4, полягає в методах розрахунків або модифікації цих методів та мірі врахування особливостей мостобудівного напрямку. Точність цих методів у наш час описують шляхом порівняння результатів лабораторних або математичних експериментів із теоретичними розрахунками цих зразків у багатьох дослідженнях. Спостерігається, що на точність методів розрахунку впливають не тільки їхній підхід, а також закладені в них додаткові коефіцієнти надійності [1]. Тому кінцева модель може суттєво відрізнитись відповідно до використаних норм.

Оптимізація решіток трубобетонних ферм. Конструктивна та архітектурна оптимізація є предметом досліджень понад чотири десятиліття. У галузі мостобудування проведено численні дослідження щодо мінімізації обсягу роботи, ваги та вартості конструкцій. Низка досліджень стосується оптимізації фермових, вантових, підвісних та аркових мостів, що вказує на складність цих систем [7].

Необхідність пошуку раціональних схем трубобетонних решічастих будов із їздою зверху полягає не тільки в більш детальному вивченні ролі трубобетону в решітках прогонових будов мостів, а й у виявленні певних закономірностей для їхнього подальшого аналізу. Цей процес потребує оцінювання результатів розрахунків із комбінацією багатьох змінних, для чого необхідно володіти знаннями багатьох тонкощів у конструюванні. Метою подібного завдання є виявлення певних моделей, які задовольняють

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

експлуатаційні вимоги з мінімальними витратами матеріалів та праці.

За останні 20 років технології реалізації оптимізаційних процесів стали достатньо потужними. Комп'ютерні процеси створення та обчислення розрахункових моделей конструкцій спрощуються, точність результатів розрахунків підвищується, швидкість обробки результатів прискорюється. Особливої уваги варті саме продукти програмного забезпечення, які роблять наведені процеси комфортнішими та зрозумілішими. З іншої сторони, без навичок програмування, а саме готового програмного середовища, неможливо перетворювати великі чисельні дані у візуальну модель із подальшим розрахунком методом скінченних елементів.

Якщо не брати до уваги естетичність конструкції, питання оптимальних схем трубобетонних решіток може бути вирішене звичайними розрахунковими методами та інструментами шляхом аналізу певних об'ємів даних. Через недостатню практику проектування решіток різних форм та їх комбінацій є сенс проаналізувати головні параметри форм конструкції та перерізи елементів взагалі. Тоді сформується точне уявлення про поведінку решіток з урахуванням переваг трубобетону та відмінності роботи цих конструкцій від аналогів зі сталевими пустотними елементами. Подібних результатів можна досягти простим, але доволі об'ємним методом порівняно з наявними – методом звичайного перебору (рівномірного пошуку). Цей метод вимагає визначення усіх пов'язаних змінних параметрів та обмежень. Увесь процес можна описати такими кроками:

1. Розглянути всі можливі варіанти поєднання типів решіток, їхніх геометричних характеристик та перерізів елементів відповідно.
2. Виділити ті варіанти, які задовольняють певним умовам та критеріям.
3. Довести, що інших рішень для цих умов немає.

Наведені вище кроки приховують безліч нюансів та деталей. Перший крок передбачає аналіз та врахування актуальних найновіших досліджень. Другий крок – виявлення граничних умов та точності розрахунків, уточнення максимумів та мінімумів, перевірка моделей та їхнє

порівняння відповідно до актуальних нормативних документів. Третій крок допомагає переконатись, що за заданими умовами та останніми дослідженнями показані вичерпні результати, висвітлити значимість та переваги варіантів трубобетонних прогонових будов з їздою зверху.

Наукова новизна та практична значимість

Проведений аналіз засвідчує необхідність глобального розвитку та поліпшення структур трубобетонних решіток для прогонових будов мостів.

Розвиток цього напрямку має вагомі переваги для прийняття рішень у першу чергу на етапі вибору типу мосту та для детального проектування решітчастих трубобетонних мостів надалі.

Висновки

Сьогодні, актуальним та перспективним напрямом розвитку решітчастих трубобетонних конструкцій залишається доповнення нормативних документів розрахунками, які краще відображають результати експериментальних випробувань та реальних умов їхньої експлуатації. Головними причинами цього є відкриті питання оптимальних схем конструкцій, поліпшення контакту бетонного осердя та сталевий оболонки, простих та надійних комбінацій сучасних способів поліпшення конструкцій. За допомогою апаратного та програмного забезпечення невисокого рівня можливо реалізувати оптимізаційні роботи різної складності, що буде використано для подальших досліджень. Виявлення кращих моделей трубобетонних решіток ґрунтується на достатньо досліджених недоліках, що підтверджено впевненим використанням таких конструкцій у складних, характерних сфері мостобудівництва, умовах.

Пошук оптимізованих решіток із різними структурними рішеннями передбачає більш детальне визначення їхніх позитивних якостей. У подальшому на основі отриманих результатів із цієї тематики заплановано формування більш докладного ланцюга кроків до проектування решітчастих трубобетонних конструкцій.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Ляхоцький В. О., Комісаренко І. М. Деякі методи розрахунку трубобетонних несучих елементів круглого перерізу. *Зб. матеріалів 84-ї міжнар. студент. наук. конф. ун-ту. Секція : Мости, конструкції та будівельна механіка* (Харків, 11-15 квіт. 2022 р.). ХНАДУ. Харків, 2022. С. 100–107.
2. Співак Д. С. Питання довговічності мостових аркових прогонових будов із трубобетону. *Матеріали VIII Міжнародної науково-практичної конференції «Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика»* (Дніпро, 19–20 жовт. 2022 р.). Укр. держ. ун-т науки і технологій. Дніпро, 2022. С. 41–43.
3. Yong-Hui Huang, Ai-Rong Liu, Ji-Yang Fu, Yong-Lin Pi, Experimental investigation of the flexural behavior of CFST trusses with interfacial imperfection. *Journal of Constructional Steel Research*. 2017. Vol. 137. P. 52–65. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2017.06.009>
4. Tian Z., Liu Y., Jiang L., Zhu W., Ma Y. A review on application of composite truss bridges composed of hollow structural section members. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*. 2019. Vol. 6. Iss.1. P. 94–108. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2018.12.001>
5. Chen B., Sheng Y., Fam A., Wei J. Torsional behavior of a new dumbbell-shaped concrete-filled steel tubes. *Thin-Walled Structures*. 2017. Vol. 110. P. 35–46. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2016.10.016>
6. Ganhaizi Bridge. URL: https://www.highestbridges.com/wiki/index.php?title=Ganhaizi_Bridge
7. Korus K., Salamak M., Jasiński M. Optimization of geometric parameters of arch bridges using visual programming FEM components and genetic algorithm. *Engineering Structures*. 2021. Vol. 241. P. 1–17. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112465>
8. Brütting J., Vandervaeren C., Senatore G., De Temmerman N., Fivet, C. Environmental impact minimization of reticular structures made of reused and new elements through Life Cycle Assessment and Mixed-Integer Linear Programming. *Energy and Buildings*. 2020. Vol. 215. P. 1–34. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.109827>
9. Huang W., Fenu L., Chen B., Briseghella B. Experimental study on joint resistance and failure modes of concrete filled steel tubular (CFST) truss girders. *Journal of Constructional Steel Research*. 2018. Vol. 141. P. 241–250. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2017.10.020>
10. Huang W., Lai Z., Chen B., Yao P. Experimental behavior and analysis of prestressed concrete-filled steel tube (CFT) truss girders. *Engineering Structures*. 2017. Vol. 152. P. 607–618. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.09.035>
11. Sakai Y., Hosaka T., Isoe A., Ichikawa A., Mitsuki K. Experiments on concrete filled and reinforced tubular K-joints of truss girder. *Journal of Constructional Steel Research*. 2004. Vol. 60. Iss. 3–5. P. 683–699. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0143-974X\(03\)00136-6](https://doi.org/10.1016/S0143-974X(03)00136-6)

D. S. SPIVAK^{1*}, S. V. KLIUCHNYK²

^{1*}Dep. «Transport Infrastructure», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38(099) 200 07 64, e-mail d.s.spivak@ust.edu.ua, ORCID 0000-0002-8155-7497

²Dep. «Transport Infrastructure», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38(050) 667 40 49, e-mail sser05@ukr.net, ORCID 0000-0001-7771-8377

Critical Analysis of the Development of the Design of Lattice Tube Concrete Bridges with a Ride on Top

Purpose. The paper aims to highlight and substantiate the need to find rational design schemes for lattice tube concrete bridges with a ride on top based on the analysis of recent research and regulatory documents.

Methodology. The current scientific research is analyzed to determine the current state of development of pipe concrete lattice structures. Methods for improving structures are presented. Combinations of filling the grating elements with concrete, variants of cross-sections of the grating elements, their advantages and disadvantages are analyzed. The state of building codes of Ukraine and other countries is considered in order to determine possible options for the design of pipe concrete bridge structures. Due to the lack of detailed research on this issue, the feasibility of implementing optimization studies for these structures and the steps necessary for this are determined. **Findings.** The optimization of pipe-concrete bridge structures is a relevant area of research, but it requires a multicomponent approach and the use of modern computer facilities. The method of linear optimization is proposed and its general steps for finding economic models are determined. It was found that the base of Ukrainian SCSs in the field of pipe and concrete

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

structures is limited, but can be expanded by using European standards and other international regulations. **Originality.** The necessity of global development and improvement of pipe concrete gratings of bridge spans is highlighted. Attention is focused on the advantages of this area, which contributes to decision-making at the stage of selecting the type of bridge and detailed design of pipe-concrete lattice bridges. A methodology for finding the optimal grids is proposed, which can integrate existing methods of structural improvement and the requirements of regulatory documents. **Practical value.** The results of the study can be used to improve the design of pipe concrete bridges at the design stage. Optimization of gratings can help to increase the efficiency of construction and reliability of this type of bridge structure.

Keywords: tubular concrete; tubular concrete bridge structures; composite lattice bridges; truss with a ride on top; optimization

REFERENCES

1. Liakhotskyi, V. O., & Komisarenko, I. M. (2022, April). Deiaki metodyky rozrakhunku trubobetonnykh nesuchykh elementiv kruhloho pererizu. *Zbirnyk naukovykh prats 84-yi mizhnarodnoi naukovoï konferentsii studentiv universytetu. Sektsiia: Mosty, konstruksii ta budivelna mekhanika* (pp. 100-107). KHNADU. Kharkiv, Ukraine. (in Ukrainian)
2. Spivak, D. S. (2022, October). The issue of durability of span structures of concrete filled steel tube arch bridges. *Materialy VIII Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii «Mosty ta tuneli: teoriia, doslidzhennia, praktyka»* (pp. 41-43). Ukraine state University of Science and Technology. Dnipro, Ukraine. (in Ukrainian)
3. Huang, Y.-H., Liu, A.-R., Fu, J.-Y., & Pi, Y.-L. (2017). Experimental investigation of the flexural behavior of CFST trusses with interfacial imperfection. *Journal of Constructional Steel Research*, 137, 52-65. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2017.06.009> (in English)
4. Tian, Z., Liu, Y., Jiang, L., Zhu, W., & Ma, Y. (2019). A review on application of composite truss bridges composed of hollow structural section members. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 6(1), 94-108. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2018.12.001> (in English)
5. Chen, B., Sheng, Y., Fam, A., & Wei, J. (2017). Torsional behavior of a new dumbbell-shaped concrete-filled steel tubes. *Thin-Walled Structures*, 110, 35-46. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2016.10.016> (in English)
6. *Ganhaizi Bridge*. Retrieved from https://www.highestbridges.com/wiki/index.php?title=Ganhaizi_Bridge (in English)
7. Korus, K., Salamak, M., & Jasiński, M. (2021). Optimization of geometric parameters of arch bridges using visual programming FEM components and genetic algorithm. *Engineering Structures*, 241, 1-17. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112465> (in English)
8. Brütting, J., Vandervaeren, C., Senatore, G., De Temmerman, N., & Fivet, C. (2020). Environmental impact minimization of reticular structures made of reused and new elements through Life Cycle Assessment and Mixed-Integer Linear Programming. *Energy and Buildings*, 215, 1-34. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.109827> (in English)
9. Huang, W., Fenu, L., Chen, B., & Briseghella, B. (2018). Experimental study on joint resistance and failure modes of concrete filled steel tubular (CFST) truss girders. *Journal of Constructional Steel Research*, 141, 241-250. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2017.10.020> (in English)
10. Huang, W., Lai, Z., Chen, B., & Yao, P. (2017). Experimental behavior and analysis of prestressed concrete-filled steel tube (CFT) truss girders. *Engineering Structures*, 152, 607-618. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.09.035> (in English)
11. Sakai, Y., Hosaka, T., Isoe, A., Ichikawa, A., & Mitsuki, K. (2004). Experiments on concrete filled and reinforced tubular K-joints of truss girder. *Journal of Constructional Steel Research*, 60(3-5), 683-699. DOI: [https://doi.org/10.1016/s0143-974x\(03\)00136-6](https://doi.org/10.1016/s0143-974x(03)00136-6) (in English)

Надійшла до редколегії: 120.11.2023

Прийнята до друку: 19.03.2024

ЗМІСТ

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

**М. М. БІЛЯЄВ, П. Б. МАШИХІНА,
Р. П. ПОБЕДЬОННИЙ, А. О. ЧІРКОВ, М. В. ЧИРВА**
Математична модель аналізу кисневого режиму
в біореакторі 5

С. В. БОГАЧЕНКО, С. В. ШАТОВ
База даних для моніторингу технічного стану споруд,
як складова частина промислової безпеки 13

В. В. ОНІЩЕНКО, С. М. СУХАЙ
Особливості організаційних і технічних заходів щодо
підвищення рівня живучості і вибухопожежобезпеки
потенційно небезпечних об'єктів 20

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

**О. О. ГОЛОТА, А. М. МУХА, Д. В. УСТИМЕНКО,
С. В. ПЛАКСІН**
Дослідження процесів у колі тягового конденсатора
моделі високошвидкісного магнітолевітаційного
транспорту 30

В. М. КОВАЛЬОВ, Ю. В. КОВАЛЬОВА
Підвищення енергоефективності тягових електроприводів
постійного струму 42

Е. К. МАНАФОВ, Ф. Х. ГУСЕЙНОВ
Моделювання комплексної системи захисту тягових
двигунів 51

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

**М. Б. КУРГАН, О. Ф. ЛУЖИЦЬКИЙ, Р. В. ІВАНОВ,
Н. П. ХМЕЛЕВСЬКА, В. С. ХМЕЛЕВСЬКИЙ**
Упровадження інноваційних технологій під час
модернізації наявних переїздів для організації
швидкісного руху поїздів 62

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

**Г. Л. ВАТУЛЯ, А. О. ЛОВСЬКА,
Є. С. КРАСНОКУТСЬКИЙ, П. В. РУКАВІШНИКОВ**
Визначення міцності контейнера зі стінами
із сендвіч-панелей під час експлуатаційних режимів
навантаження 84

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

**Д. О. БАННИКОВ, А. В. РАДКЕВИЧ,
С. М. КОСЯЧЕВСЬКА**
Зміни щодо нормативного визначення кліматичних
навантажень і впливів на будівельні конструкції 92

Д. С. СПІВАК, С. В. КЛЮЧНИК
Критичний аналіз розвитку конструкції решітчастих
трубобетонних мостів з їздою зверху 105

CONTENTS

ECOLOGY AND INDUSTRIAL SAFETY

**M. M. BILIAIEV, P. B. MASHYKHINA,
R. P. POBIEDONNYI, A. O. CHIRKOV, M. V. CHYRVA**
Mathematical Model of Oxygen Regime Analysis
in a Bioreactor 5

S. V. BOGACHENKO, S. V. SHATOV
Database for Monitoring the Technical Condition of Structures
as an Integral Part of Industrial Safety 13

V. V. ONISHCHENKO, S. M. SUKHAI
Features of Organizational and Technical Measures to
Increase the Level Of Survivability and Explosion and Fire
Safety of Potentially Dangerous Objects 20

ELECTRIC TRANSPORT, POWER SYSTEMS AND COMPLEXES

**O. O. HOLOTA, A. M. MUKHA,
D. V. USTYMENKO, S. V. PLAKSIN**
Investigation of Processes in the Traction Capacitor Circuit of
the Model of High-Speed Magnetolevitation Transport 30

V. M. KOVALOV, Yu. V. KOVALOVA
Increasing the Energy Efficiency of Traction Electric Drives
of Direct Current 42

E. K. MANAFOV, F. H. HUSEYNOV
Modeling of an Integrated Traction Motor Protection
System 51

RAILROAD AND ROADWAY NETWORK

**M. B. KURHAN, O. F. LUZHYTSKYI, R. V. IVANOV,
N. P. KHMELEVSKA, V. S. KHMELEVSKYI**
Implementation of Innovative Technologies During The
Modernization of Existing Level Crossings for High-Speed
Train Traffic 62

ROLLING STOCK AND TRAIN TRACTION

**G. L. VATULIA, A. O. LOVSKA,
YE. S. KRASNOKUTSKYI, P. V. RUKAVISHNIKOV**
Determination of the Strength of a Container with Sandwich
Panel Walls under Operational Loading Conditions 84

TRANSPORT CONSTRUCTION

**D. O. BANNIKOV, A. V. RADKEYVCH,
S. M. KOSIACHEVSKA**
Changes to the Regulatory Definition of Climatic Loads and
Impacts on Building Structures 92

D. S. SPIVAK, S. V. KLIUCHNYK
Critical Analysis of the Development of the Design of Lattice
Tube Concrete Bridges with a Ride on Top 105

ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ СТАТЕЙ

До публікації в журналі приймаються статті українською або англійською мовами проблемного, узагальнюючого, методичного характеру, оригінальні наукові, практичні дослідження, які раніше ніде не видавалися.

Матеріали необхідно надавати в друкованому та електронному вигляді у програмі Microsoft Word. Для набору формул використовується MathType.

Наукова стаття повинна відповідати вимогам п. 3 Постанови ВАК України № 7-05/1 від 15.01.2003 року.

Матеріали рецензуються членами редакційної колегії журналу та сторонніми незалежними експертами, виходячи з принципу об'єктивності та з позицій вищих міжнародних академічних стандартів якості, та редагуються. Редакція залишає за собою право на стилістичну правку рукопису.

Вимоги щодо обсягу наукових статей, повідомлень, відгуків та рецензій:

- оглядові та проблемні статті – до 45 000 знаків з пробілами (7–10 с.);
- загальні статті за рубриками видання – до 30 000 знаків з пробілами (5–7 с.);
- наукове повідомлення – до 8 000 знаків з пробілами (до 2,5 с.);
- відгук або рецензія – до 6 000 знаків з пробілами (до 2 с.).

Матеріал надається у форматі A4, враховуючи таблиці, ілюстрації, список використаних джерел. Статті, більші за обсягом, можуть бути прийняті до розгляду на підставі рішення редколегії.

Для здачі статті до друку авторам необхідно надати наступні документи:

1) файл зі статтею та друкований примірник рукопису з підписами всіх співавторів на останньому аркуші роботи;

2) оригінал Ліцензійного договору з підписами всіх співавторів;

3) файл з відомостями про кожного з авторів – прізвище, ім'я, по-батькові повністю, посада, місце роботи, наукове звання, науковий ступінь, контактна інформація (телефон, адреса електронної пошти), код ORCID. Відомості про авторів подаються двома мовами – українською та англійською.

Увага! Згідно з міжнародними стандартами якості наукових публікацій необхідним є: наявність авторських розширених (250–300 слів) і структурованих резюме (рефератів – abstracts), у т.ч. англійською мовою, рецензій, пристатейних списків літератури в романському алфавіті тощо.

Виклад основного матеріалу статті повинен мати такі елементи:

- **вступ:** постановка проблеми, аналіз останніх досліджень;
- **мету;**
- **методику:** виклад основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів. Докладно описують загальну методику дослідження, щоб його результати могли бути відтворені: описується послідовність виконання дослідження, обґрунтовується вибір використовуваних і викладається суть запропонованих методів і моделей, змістовно визначається, що саме досліджувалося кожним методом;
- **результати:** містять експериментальні чи теоретичні дані, отримані в роботі, для демонстрації того, що отримано нове рішення проблеми, і що робота є значним кроком вперед у порівнянні з попередніми дослідженнями. Дані подаються у формі таблиць, графіків, діаграм, рівнянь, фотографій, рисунків, статистичними оцінками. Результати повинні бути викладені коротко і чітко, при цьому містити досить інформації для оцінки зроблених висновків, також має бути очевидно, чому для аналізу обрані саме ці дані;
- **наукову новизну та практичну значимість.** Наукова новизна отриманих результатів викладається аргументовано, коротко і чітко. До наукової новизни не можна відносити прикладні результати (способи, пристрої, методики, схеми, алгоритми). Практичне значення отриманих результатів становлять відомості про використання результатів досліджень або рекомендації з їх використання;
- **висновки:** необхідно навести досягнуті кількісні та якісні показники дослідження, викласти рекомендації з їх використання.

З усіх питань звертайтеся до редакції журналу за адресою:

Наукова бібліотека (ауд. 166),
Український державний університет науки і технологій,
вул. Лазаряна, 2, м. Дніпро, Україна,
49010
e-mail: stp.journal@ust.edu.ua

Сайт журналу: <http://stp.ust.edu.ua/>

Наукове видання

НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ.

№ 1 (105) 2024

(українською та англійською мовами)

Відповідальний за випуск – О. В. Помінова

Комп'ютерне верстання – О. В. Помінова

Літературна обробка – С. П. Лагдан

Формат 60×84¹/₈. Ум. друк. арк. 13,49. Тираж 100 пр. Зам. №02/04

Український державний університет науки і технологій

Адреса редакції, видавця:

вул. Лазаряна, 2, кім. 267, м. Дніпро, 49010, Україна

Тел.: +38 (056) 371-51-05

E-mail: stp.journal@ust.edu.ua

Друк:

Видавництво «Герда», 49000, м. Дніпро, пр. Д. Яворницького, 60

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи серія ДК № 397 від 03.04.2001 р.



Scientific Edition

NAUKA TA PROGRES TRANSPORTU.

=

SCIENCE AND TRANSPORT PROGRESS

No. 1 (105) 2024

(in Ukrainian and English languages)

Responsible for issue – O. V. Pominova

Desktop publishing – O. V. Pominova

Redaction – S. P. Lahdan

Format 60×84¹/₈. Conventional printed sheet 13,49. Circulation 100. Order no. 02/04

Ukrainian State University of Science and Technologies

Address of editor and editorial office

Lazaryan St., 2, r. 267, Dnipro, 49010, Ukraine

Tel.: +38 (056) 371-51-05

E-mail: stp.journal@ust.edu.ua

Printing

Publishing house «Gerda», 49000, Dnipro, Yavornitsky av., 60

