МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

**ПІВНІЧНО-СХІДНИЙ НАУКОВИЙ ЦЕНТР
ТРАНСПОРТНОЇ АКАДЕМІЇ УКРАЇНИ**

**УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ**

ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ
УКРАЇНСЬКОГО ДЕРЖАВНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

Випуск 212

Харків 2025

УДК 656.2(062)

У Збірнику наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту публікуються результати наукових досліджень, наукові та конструкторські розробки та інші матеріали вчених, фахівців залізничного транспорту і промислових підприємств, спрямовані на вирішення сучасних завдань і проблем організації перевезень та управління на транспорті, рухомого складу і тяги поїздів, транспортного будівництва та залізничної колії, теплоенергетики та матеріалознавства, автоматики, телемеханіки та зв'язку тощо.

Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту призначений для інженерно-технічних працівників, магістрантів, здобувачів вищої освіти і науковців залізничного транспорту та інших галузей промисловості.

З електронною версією збірника можна ознайомитися на сайті: https://bit.ly/3vVHlv3.

Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту включено до міжнародної наукометричної бази Index Copernicus (Польща).

З реєстрацією збірника можна ознайомитися на сайті http://jml2012.indexcopernicus.com.

Google Scholar профиль: https://scholar.google.com.ua

Веб-сторінка збірника: https://kart.edu.ua/unit/zbirnik-ukrsurt

Реферативна база «Наукова періодика України»: http://csw.kart.edu.ua

ISSN (p) 1994-7852
ISSN (online) 2413-3795

Суб'єкт у сфері друкованих медіа R30-06150, за рішенням № 948 Національної ради України з питань телебачення і радіомовлення, протокол № 11 від 01 травня 2025 р. Друкується за рішенням вченої ради університету, протокол № 6 від 1 липня 2025 р.

Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту включено до списку друкованих (електронних) періодичних видань, що внесені до Переліку наукових фахових видань України, у яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук (Наказ МОН України від 15.10.2019 р. № 1301).

ISSN 1994-7852
Зареєстровано 2 червня 2007 р.
у ISSN International Centre 20. Rue Bachaumont, 75002 PAPIS, FRANCE

© Український державний університет залізничного транспорту, 2025.

Редакційна колегія

Головний редактор – Вовк Руслан Володимирович, дійсний член (академік) НАН України, доктор фізико-математичних наук, професор, УкрДУЗТ
Випусковий редактор – Харін Руслан Олександрович, УкрДУЗТ

Залізничний транспорт (273)
Пузир В. Г., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Фомін О. В., д.т.н., доцент (ДУІТ, м. Київ)
Горобченко О. М., д.т.н., доцент (ДУІТ, м. Київ)
Дацун Ю. М., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)
Мартинов І. Е., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Bureika G., dsc, professor (VGTU, Литва)
Михалків С. В., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)
Ловська А. О., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)

Будівництво та цивільна інженерія (192)
Бліхарський З. Я., д.т.н., професор (НУ Львівська політехніка)
Борзяк О. С., д.т.н., професор (Західнопомор. технол. ун-т, Щецин, Польща)
Ватуля Г. Л., д.т.н., професор (ХНУМГ)
Лобяк О. В., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)
Орел Є. Ф., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)
Плугін А. А., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Плугін Д. А., д.т.н., доцент (УкрДУЗТ)
Пушкарьова К. К., д.т.н., професор (КНУБА)
Толмачов С. М., д.т.н., професор (ХНАДУ)
Трикоз Л. В., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Шабанова Г. М., д.т.н., професор (НТУ ХПІ)
Русінська Т., д.т.н., професор, Західнопомор. технол. ун-т (Щецин, Польща)
Веньжон Жу, доцент, Університет Західної Шотландії)
Опанасенко О. В., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)

Механічна інженерія (131, 132, 133)
Астанін В. В., д.т.н., професор (НАУ м. Київ)
Воронін С. В., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Геворкян Е. С., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Онопрейчук Д. В., к.т. н., доцент (УкрДУЗТ)
Стефанов В. О., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)
Тимофеєв С. С., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Тимофеєва Л. А., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Федориненко Д. Ю., д.т.н., професор (Tohoku University, Японія)
Dittrich A., PhD, University of Liberec (Czech Republic)

Транспортні технології (275)
Панченко С. В., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Бутько Т. В., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Прохорченко А. В., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Шраменко Н. Ю. д.т.н., професор (ДБТУ)
Мороз М. М. д.т.н., професор (КНУ, м. Кременчук)
Кириллова О. В., д.т.н., доцент (ОНМУ, м. Одеса)
Бабаєв М. М., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Лаврухін О. В., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Потапов Д. О., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)
Ходаківський О. М., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)

Геодезія та землеустрій (193)
Угненко Є. Б., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Eimuntas Paršeliūnas, д.т.н., професор (Вільнюський техн. ун-т ім. Гедімінаса, Литва)
Jūrate Sužiedelytė Visockienė, д.т.н., професор (Вільнюський техн. ун-т ім. Гедімінаса, Литва)
Шарий Г. І., д.е.н., професор (НУ «Полтавська політехніка ім. Юрія Кондратюка)
Савенко В. Я., д.т.н., професор (НТУ, м. Київ)
Мамонов К. А., д.е.н., професор (ХНУМГ)
Коростельов Є. М., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)
Ужвієва О. М., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)
Малащук О. С., к.е.н., доцент (Одеський держ. аграрний ун-т)
Капінос Н. О., к.е.н., доцент (Сумський нац. аграрний ун-т)
Маланчук М. С., к.т.н., доцент (НУ «Львівська політехніка»)

Теплоенергетика (144)
Каграманян А. О., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)
Мороз В. І., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Фалендиш А. П., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Грицук І. В., д.т.н., доцент (ХМДА, м. Херсон)
Сотник М. І., д.т.н., доцент (СДУ, м. Суми)
Дешко В. І., д.т.н., професор (НТУ, м. Київ)
Редько І. О., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Бабіченко Ю. А., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)
Pavlenko A., dsc. tech., profesor (KUT, Poland)
Bartoszewicz J., dsc. tech., profesor (PUT, Poland)
Tomaszewski F., phd, profesor (PUT, Poland)

ЗМІСТ

Механічна інженерія (131, 132, 133)

Козар Л. М., Романович Є. В., Євтушенко А. В., Козар М. Л. Обґрунтування раціональної конструкції барабана шахтного підйомника 7

Теплоенергетика (144)

Пасічник П. О., Погосов О. Г., Кулінко Є. О., Юзьков Д. В. «Сонячні» перспективи України 18

Будівництво та цивільна інженерія (192)

Андрух С. Л., Сопов В. П. Біокомпозитний матеріал на основі відходів деревини 27

Атинян А. О., Джалалов М. Н., Ткаченко Р. Б., Пустовойтова О. М., Орел Є. Ф. Застосування технології торкретування для ремонту і реконструкції підземних споруд 36

Півненко Ю. О., Бурда Ю. О., Чайка Ю. І., Ткаченко Р. Б., Редько І. О. Впровадження теплонасосного обладнання в системах вентиляції будівель закладів охорони здоров'я з метою зниження енергоспоживання 44

Бражник Г. В. Морозно-сольовий вплив на цементобетон 54

Гаркуша М. В. Заходи з попередження та гасіння небезпечних форм руху потоків води в нижньому б'єфі дорожніх водопропускних труб 60

Калмиков О. О., Шматко В. В. Планування експерименту для визначення фізико-механічних характеристик сталевої сітки 69

Резнік П. А., Лугченко О. І., Володимиров А. В., Тенесеску В. В., Алатаєв Д. А., Булдаков О. О. Чисельне моделювання залізобетонних балок із незнімною 3D-друкованою опалубкою 82

Панченко С. В., Дудін О. А., Коваленко І. С., Фоменко О. А., Філімонов О. О. Електрокорозія бетону і залізобетону: аналіз впливу та методів захисту 100

Берестянська С. Ю., Галагуря Є. І., Кравців Л. Б., Ковальов М. О. Підготовка фібробетонних кубиків, які зазнали впливу високої температури, до експериментальних досліджень 110

Плугін О. А., Плугін А. А., Геворкян Е. С., Муригін М. А. Механізм і кінетика електрокорозії рейкової сталі та ресурс рейок у залізничних тунелях 114

Геодезія та землеустрій (193)

Мамонов К. А., Метешкін К. О., Штерндок Е. С., В'яткін Р. С. Організаційно-просторовий механізм забезпечення територіального розвитку використання земель регіонів 133

Шарий Г. І., Угненко Є. Б., Шара С. Ю., Сорочук Н. І. Інвайроментальна економічна система – базис сталого просторового розвитку України 141

Коростельов Є. М., Коваленко Л. М. Геоінформаційна система для визначення оптимального маршруту в умовах навігаційних обмежень 153

Гой В. В., Крохмаль А. М., Харів В. В. Застосування регресійного аналізу для виявлення основних чинників землекористування в житловій і громадській забудові регіонів 165

Ступень О. І., Прокопенко Н. І., Шевчук С. М. Цифрова трансформація системи землеустрою: автоматизація управлінських процесів у сфері використання та охорони земельних ресурсів 172
Нестеренко С. В., Міщенко Р. А. Комплексне застосування даних ГНСС-спостережень і супутникової радіолокації для визначення динаміки рухів придніпровської низовини 185
Боровий В. О., Браславська О. В., Рожі Т. А. Інтеграція аналогового та цифрового знімання в системах землеустрою: нові можливості для геодезичних досліджень 195

Залізничний транспорт (273)

Візняк Р. І., Бондаренко В. В. Вивантаження з залізничних напіввагонів насипних вантажів удосконаленим способом перекидання 208
Ананьєва О. М., Лазарєв О. В., Слєпченко О. О., Парфьонов Р. О. Впровадження інновацій для покращення системи автоматичної ідентифікації рухомого складу 216
Стефанов В. О., Савченко А. Д. Розрахунок подавання мастильного матеріалу в моторно-осьовий підшипник локомотива із застосуванням примусового змащення 234
Крашенінін О. С., Шапатіна О. О., Обозний О. М., Анацький О. О., Бондаренко К. С. Визначення і оптимізація запасів для функціонування ремонтного господарства локомотивного депо 242
Мартинов І. Е., Труфанова А. В., Литовченко О. М., Фрейліх Д. В. До питання прогнозування відмов букс вантажних вагонів 249
Головко Т. В., Долгополов П. В., Ляпін Д. Ю., Демченко І. С. Прогнозування обсягів вагонопотоків пунктів взаємодії з використанням методу Random Forest 259
Шовкун В. О., Дмитренко М. В., Жерновенков О. А., Мартишко Р. О., Шульга Є. О. Аналіз пошкоджень візків універсальних напіввагонів 267
Гриценко Н. В., Козодой Д. С. Теоретичні передумови економічного забезпечення охорони праці на транспортних підприємствах 274
Маслієв В. Г., Якунін О. О. Виявлення первинної причини зростання зносу гребенів коліс локомотивів і пропозиції щодо його зменшення 281
Семененко О. І., Семененко Ю. О., Семененко О. Д. Дослідження активного фільтра-стабілізатора на базі широтно-імпульсного перетворювача 292
Кустов В. Ф. Фундаментальні недоліки базових моделей небезпечних відмов для розрахунку функціональної безпеки систем керування рухом поїздів 301
Shcherbak Y. V., Ivakina K. Y., Nerubatskyi V. P. Dynamics of a pulse-width converter using the theory of generalized functions 315

Транспортні технології (275)

Калініченко О. П., Севідова В. В. Підвищення ефективності операцій крос-докінгу для міжнародних автомобільних перевезень на основі розроблення спільних операційних графіків 331

МЕХАНІЧНА ІНЖЕНЕРІЯ (131, 132, 133)

УДК 621.863.2

ОБҐРУНТУВАННЯ РАЦІОНАЛЬНОЇ КОНСТРУКЦІЇ БАРАБАНА ШАХТНОГО ПІДЙОМНИКА

Кандидати техн. наук Л. М. Козар, Є. В. Романович, А. В. Євтушенко, асп. М. Л. Козар

SUBSTANTIATION OF THE RATIONAL DESIGN FOR THE MINING HOIST'S DRUM

Phd (Tech.) L. Kozar, Phd (Tech.) Y. Romanovych, Phd (Tech.) A. Yevtushenko, postgraduate student M. Kozar

DOI: https://doi.org/10.18664/1994-7852.212.2025.336284

Анотація. *До розрізних барабанів шахтних канатних підйомників висунуто підвищені вимоги жорсткості, оскільки в процесі роботи машини один із канатів переходить через щілину між частинами барабана, і не можна допускати розширення щілини понад 5 мм. Однією з причин розширення щілини є деформація переставної (вузької) частини барабана від зусилля гальмових колодок, які розпирають її зсередини.*

У середовищі програмного комплексу «Ліра» побудовані три скінченно-елементні моделі переставної частини барабана різних конструкцій. Для цих моделей отримані ізополя переміщень по осі вала барабана та еквівалентних напружень (за Губером-Мізесом) під дією рівномірно розподіленого навантаження в зонах контакту гальмівного обода з колодками.

З аналізу результатів моделювання зроблено висновок про те, що для шахтних підйомників із розрізним барабаном і внутрішніми колодковими гальмами для забезпечення допустимого розширення щілини між частинами барабана в конструкції переставного з однією лобовиною останню раціонально встановлювати біля гальмівного обода. При цьому розширення щілини перевищує норму лише на 13,4 %, але економія маси порівняно з конструкцією з двома лобовинами становить 25 %.

Ключові слова: *шахтний підйомник, розрізний барабан, жорсткість, деформація, напруження, метод скінченних елементів.*

Abstract. *Rigidity requirements are higher for the split drums of mine rope hoists, since during the operation of the machine one of the ropes passes through the gap between the drum parts, while the gap must not widen by more than 5 mm. One of the reasons for the expansion of the gap is the deformation of the adjustable (narrow) part of the drum caused by the force applied by the brake pads, which expand the drum from the inside. Determining the stress-strain state of the adjustable part of the split drum of the mine hoist, including by the method of mathematical modeling, is a relevant task.*

The purpose of the study is to substantiate the rational design for the adjustable part of the split drum of the mine hoist from the point of view of ensuring sufficient rigidity at a minimal mass. The rigidity should be such that the gap between the drum parts due to deformation caused by the force applied by the brake pads does not widen beyond the allowed limit.

We built three finite element models of the adjustable part of the drum for different designs using the «Lira» software package: with one plate near the end; with one plate near the brake rim;

and wider drum with two end faces (plates). For these models, we obtained isofields of displacements along the axis of the drum shaft and equivalent stresses (according to Mises) under the action of a uniformly distributed load in the contact zones of the brake rim and the brake pads. The braking moment created by this load corresponds to three times the maximum static moment in accordance with the Safety Rules in Coal Mines.

Based on the analysis of the modeling results, we concluded that for mine hoists with a split drum and internal pad brakes, from the point of view of ensuring the permissible expansion of the gap between the drum parts, for the adjustable drum with a single plate the rational design choice is to install the latter next to the brake rim. In this case, the expansion of the gap exceeds the norm by only 13.4 %, but the mass is lower by 25 % in comparison with the two-plate drum design. In addition, installation of the second face requires an increase in the width of the drum.

Keywords: *mine hoist, split drum, rigidity, deformation, stress, Finite element method.*

Вступ. До розрізних барабанів шахтних канатних підйомників висунуто підвищені вимоги жорсткості, оскільки в процесі роботи машини один із канатів переходить через щілину між частинами барабана, і не можна допускати розширення щілини понад 5 мм. Конструктивні особливості підйомників такого типу описані в статті [1], де подано результати досліджень збільшення проміжку (розширення щілини) внаслідок прогину лобовини переставної (вузької) частини барабана від зусилля навитого каната. Однак причиною розширення щілини також є деформація переставної частини барабана від зусилля гальмових колодок, які розпирають її зсередини.

Отже, визначення напружено-деформованого стану переставної частини розрізного барабана шахтного підйомника, у тому числі методом математичного моделювання, є актуальним завданням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Математичне моделювання з використанням сучасних обчислювальних комплексів широко застосовують для обґрунтування робочих параметрів елементів шахтних підіймальних установок як в Україні, так і за кордоном. Зокрема, з використанням програмного забезпечення SolidWorks Simulation встановлені оптимальні параметри гальмівних систем, створена методика розрахунку розподілу температури нагрівання по площині гальмового обода [2].

На основі скінченно-елементного аналізу розроблена математична модель напружено-деформованого стану тіла намотки бобінних підйомників із гумотросовим канатом для визначення параметрів підйомника, які запобігають виникненню небезпечних динамічних навантажень під час аварійного та робочого гальмування [3].

Для підйомників, що працюють на надглибоких шахтах в умовах багатоточкового підіймання, важливим є питання забезпечення синхронізації намотування канатів. Результати досліджень [4] показують, що деформація барабана значно впливає на синхронізацію канатів, і різниця в їхніх натягах понад 10 % загрожує безпеці роботи підйомника. З використанням методу скінченних елементів побудовано модель барабана, яка дала змогу оптимізувати його конструкцію, зменшити деформацію і розбіжність натягів канатів до прийнятних значень [5].

Розроблено спрощений метод аналізу жорсткості розрізних барабанів шахтних підйомників із використанням пакетів скінченно-елементного моделювання, аналогічних SolidWorks Simulation [6]. Вихідні вузли барабана (обичайка, лобовина, реберне підкріплення, гальмові диски) заміняють на спрощені, із яких складається усереднена модель зі збільшеною товщиною лобовин. Слід зазначити, що цей метод має обмежену сферу використання. Похибка є прийнятною

лише для випадку навантаження барабана рівномірним зовнішнім тиском.

За методами математичного й комп'ютерного скінченно-елементного моделювання, а також шляхом експериментальних досліджень і теоретичного аналізу встановлено залежності максимальних напружень від товщини та положення лобовин у розрізному барабані шахтного підйомника [7], подано рекомендації щодо його раціональних геометричних параметрів. Важливим для нас є висновок автора про те, що для товщини лобовини більше 20 мм напруження мало залежать від товщини лобовини, а за меншої товщини відбувається різке зростання напружень. Також встановлено, що переміщення лобовин барабана разом із маточиною в осьовому напрямку вглиб переставної частини на відстань, що дорівнює двом крокам нарізаної канавки, знижує на 18 % максимальні напруження обичайки в місцях її з'єднання з лобовиною [8].

Разом зі скінченно-елементними моделями в дослідженнях напружено-деформованого стану шахтних барабанів використано і аналітичні моделі. Для розрахунків лобовин використовують теорію пластин, перевіряють стійкість. Уточнений розрахунок з урахуванням змінності натягу канату показав, що дійсні напруження дуже незначні, тому підкріплення лобовини ребрами жорсткості є зайвим [9]. Також отримана методика розрахунку напружень у зоні зварних швів шахтних барабанів, яка враховує нерівномірність навантаження, коефіцієнт тертя між канатом і барабаном, розміри і місця встановлення елементів жорсткості [10].

Варті уваги твердження про те, що традиційні конструкції шахтних барабанів з елементами жорсткості у вигляді ребер, кілець і косинок не є раціональними [9-11]. На думку авторів, ці елементи лише знижують міцність барабана, спричиняють руйнування зварювальних швів із виникненням тріщин, разом із тим підвищуючи масу та складність виготовлення барабана. У запропонованій методиці [11] враховані додаткові фактори, які раніше не розглядали, зокрема жорсткість самих лобовин і коефіцієнт тертя між канатом і барабаном.

Аналітична модель взаємодії барабана з канатом [12] складається з набору співвідношень сила-переміщення, які враховують розтяжність каната і контактну взаємодію барабана з канатом, припускаючи лінійну пружність і кулонівське тертя.

Це дає змогу з підвищеною точністю здійснювати динамічне моделювання підйомників. Поданий підхід перевірений із використанням методу скінченних елементів із високим ступенем збіжності результатів.

Традиційний метод скінченних елементів потребує значної кількості часу для моделювання довгих і геометрично складних канатів, тому в роботі [13] запропоновано еквівалентний метод механічного моделювання канатів. На основі цього методу створено еквівалентну механічну модель каната і скінченно-елементну модель двокінцевого підйомника, адекватність яких підтверджена результатами експериментальних випробувань. Важливим також є аспект взаємодії шахтних канатів із копровими шківами, проте існує низка труднощів у складанні аналітичних моделей, зокрема високий ступінь зв'язку між канатом і шківом, нечіткі граничні умови і незалежність рівнянь обмежень системи. Запропонований метод [14] дає змогу уникнути цих труднощів і ефективно описувати рух шківів з урахуванням зміни натягу каната і положення граничних точок контакту.

Визначення мети та завдання дослідження. Метою дослідження є обґрунтування раціональної конструкції переставної частини розрізного барабана шахтного підйомника для забезпечення достатньої жорсткості за мінімальної маси. Жорсткість має бути такою, щоб збільшення

щілини між частинами барабана внаслідок деформації від зусилля гальмових колодок не виходило за допустиму межу.

Для досягнення поставленої мети потрібно вирішити такі завдання:

- побудувати скінченно-елементні моделі сучасних конструкцій переставної частини барабана та запропонованої нами конструкції;
- отримати значення переміщень і напружень в елементах моделей переставної частини барабана;
- проаналізувати отримані результати;
- дати практичні рекомендації щодо раціональної конструкції барабана.

Основна частина дослідження. Для розгляду взято три конструкції переставної частини барабана:

- модель 1 (рис. 1) – з однією лобовиною товщиною 40 мм біля торця відповідає машині МПУ-6,3×2,8/0,63, виготовленій на Ново-Краматорському машинобудівному заводі. Досвід експлуатації цієї машини показав значну деформацію барабана під час роботи, що призвело до аварії через затиснення каната в щілині [15];
- модель 2 (рис. 2) – запропонована нами конструкція барабана, що є аналогічною моделі 1, за виключенням того, що лобовина встановлена біля гальмового обода, а підкріплювальні елементи (косинки і ребра) встановлені з протилежного боку;
- модель 3 (рис. 3) відповідає машині МПБ-6,3× 3,15/0,63 (НКМЗ). Модель має збільшену ширину, замість однієї встановлені дві лобовини вдвічі меншої товщини. Косинки аналогічні моделям 1 і 2, лобовини з'єднані між собою ребрами.

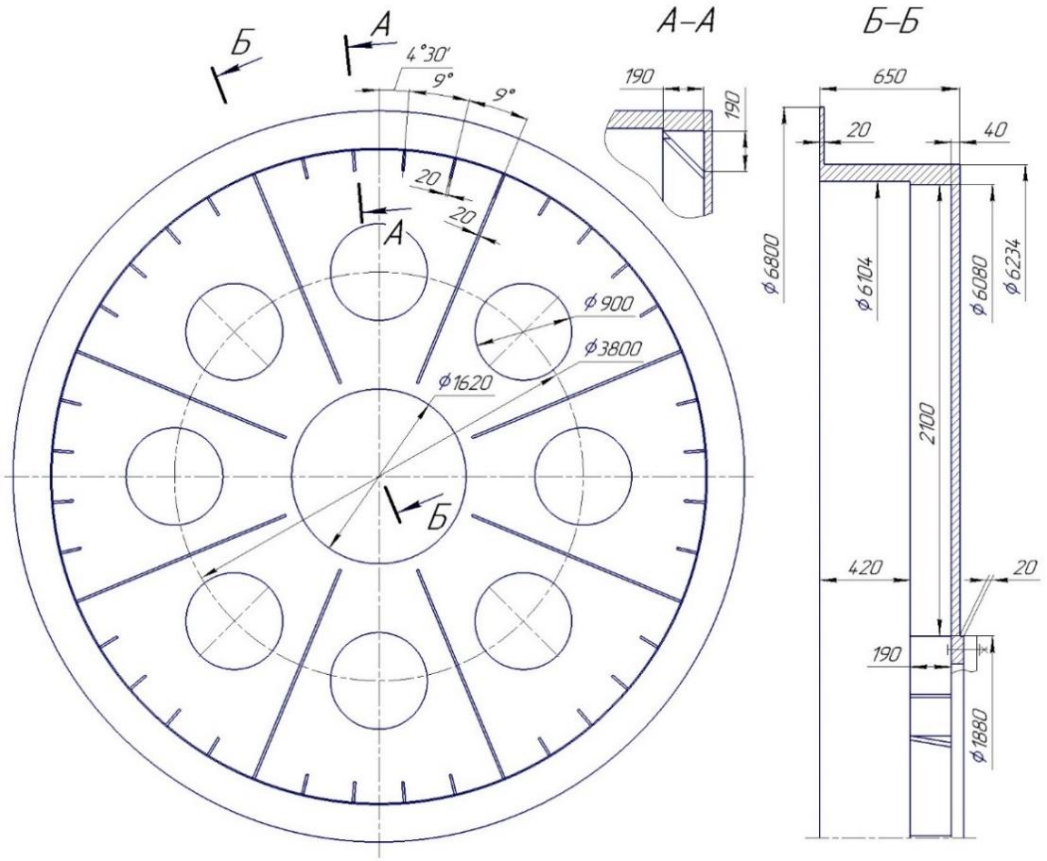


Рис. 1. Конструкція моделі 1

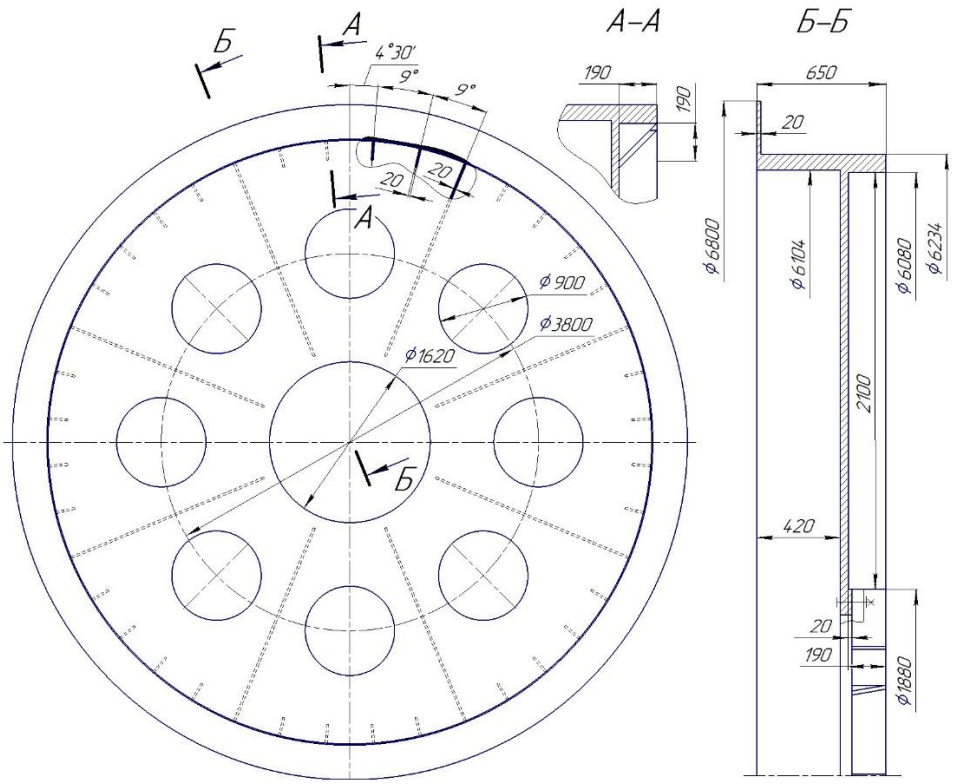


Рис. 2. Конструкція моделі 2

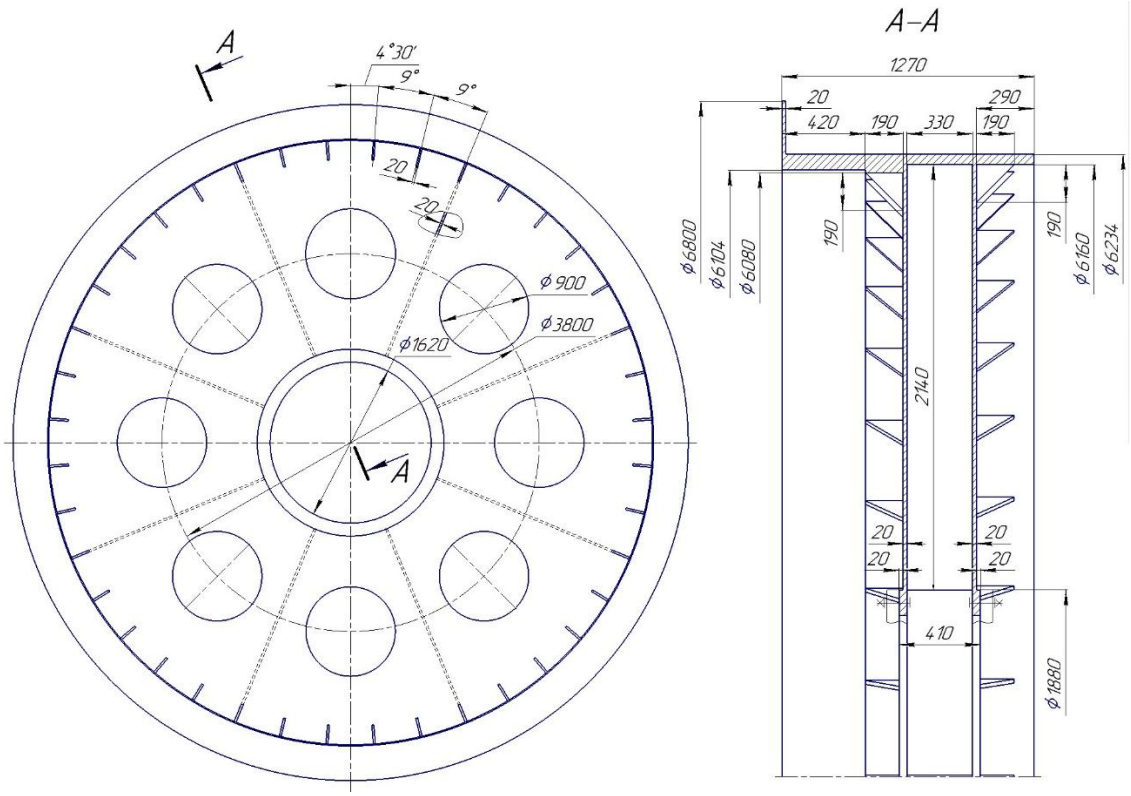


Рис. 3. Конструкція моделі 3

За вимогами Правил безпеки у вугільних шахтах [16], гальмівний пристрій має забезпечувати не менш ніж трикратний максимальний статичний момент. Для розглядуваного підйомника цей момент становить 2200 кН·м. Для забезпечення зазначеного моменту рівномірно розподілене навантаження на поверхню гальмівного обода в зонах його контакту з колодками має становити 3,79 кН·м^2 (рис. 4).

У середовищі програмного комплексу «Ліра» побудовано скінченно-елементні моделі переставної частини барабана розглядуваних конструкцій (рис. 5, табл. 1). Для твердотільних моделей прийнято: матеріал барабана – Сталь 20; модуль пружності E = 2,1·10^5 МПа; коефіцієнт Пуассона ν = 0,3; густина R_0 = 7850 кг/м^3; межа текучості $\sigma_т$ = 250 МПа [17].

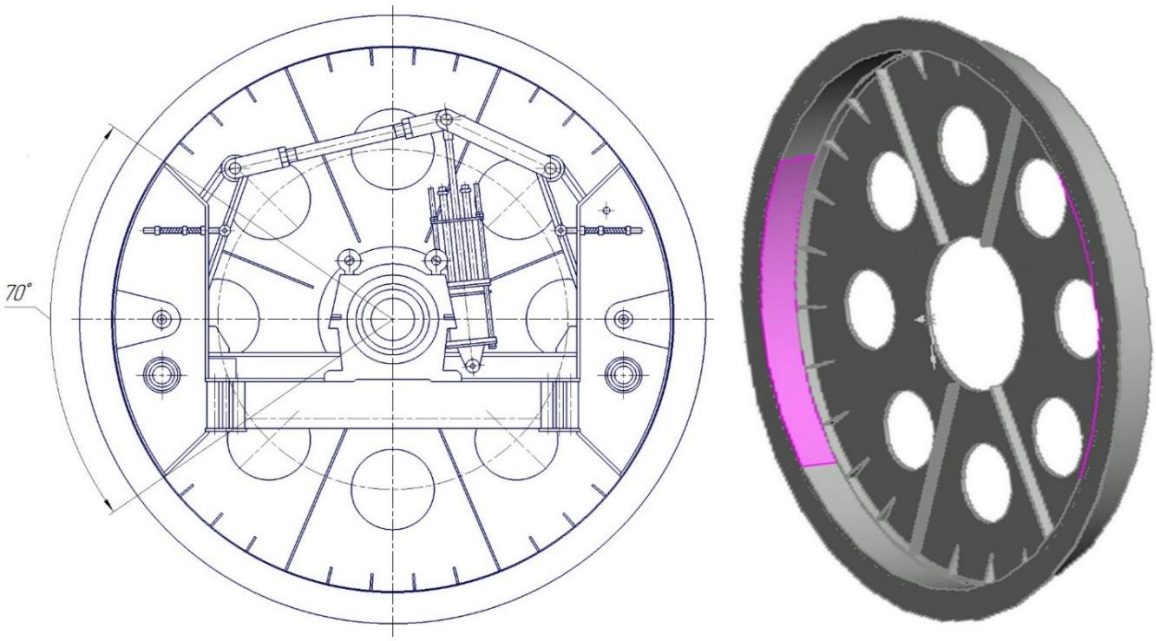


Рис.4. Зони контакту гальмівного обода з колодками

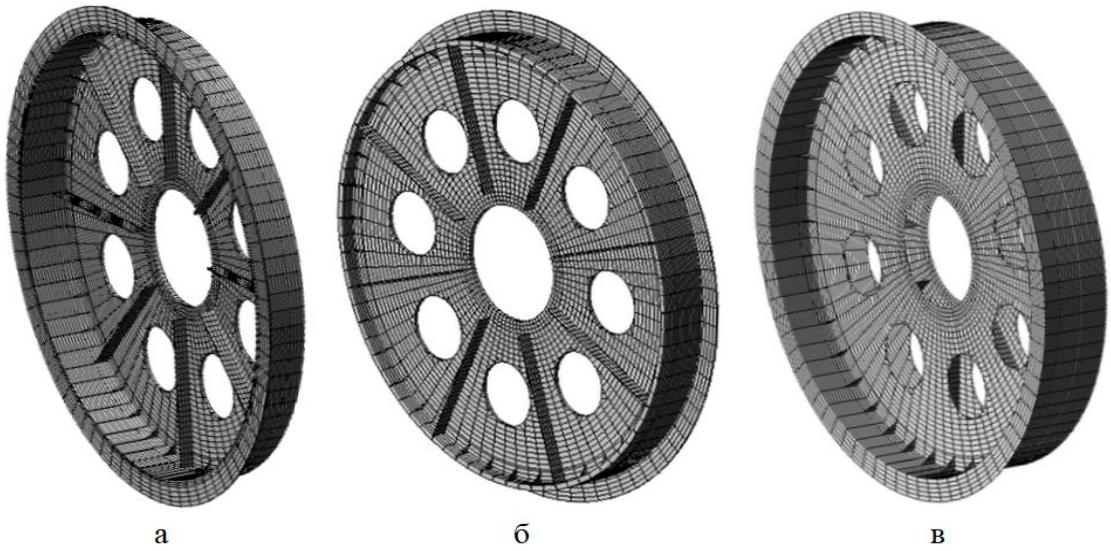


Рис. 5. Скінченно-елементні моделі переставної частини барабана:
а – модель 1; б – модель 2; в – модель 3

Таблиця 1

Кількість вузлів і параметри скінченних елементів у моделях барабанів

Модель	Кількість вузлів, од	Кількість скінченних елементів	Тип і параметри скінченних елементів
Модель 1	5016	5008	Типи скінченних елементів: трикутні і прямокутні пластини. Параметри задані: - модуль пружності E, МПа; - коефіцієнт Пуассона v; - товщина пластини H, м; - густина матеріалу пластини Ro, кг/м^3
Модель 2	5048	5040	
Модель 3	8952	9312	

Шляхом скінченно-елементного моделювання для середнього шару отримані ізополя переміщень по осі Y (осі вала барабана) та еквівалентних напружень (NE04 – четверта теорія міцності, критерій Губера-Мізеса) (рис. 6-8). Рівномірно розподілене навантаження величиною 3,79 кН·м^2 прикладено в зонах контакту гальмівного обода з колодками (рис. 4). Моделі жорстко закріплені по поверхні прилягання лобовин до маточини.

У першу чергу нас цікавить переміщення Δ_Y (рис. 9), тобто збільшення проміжку (розширення щілини) між частинами барабана. Результати моделювання подані в табл. 2.

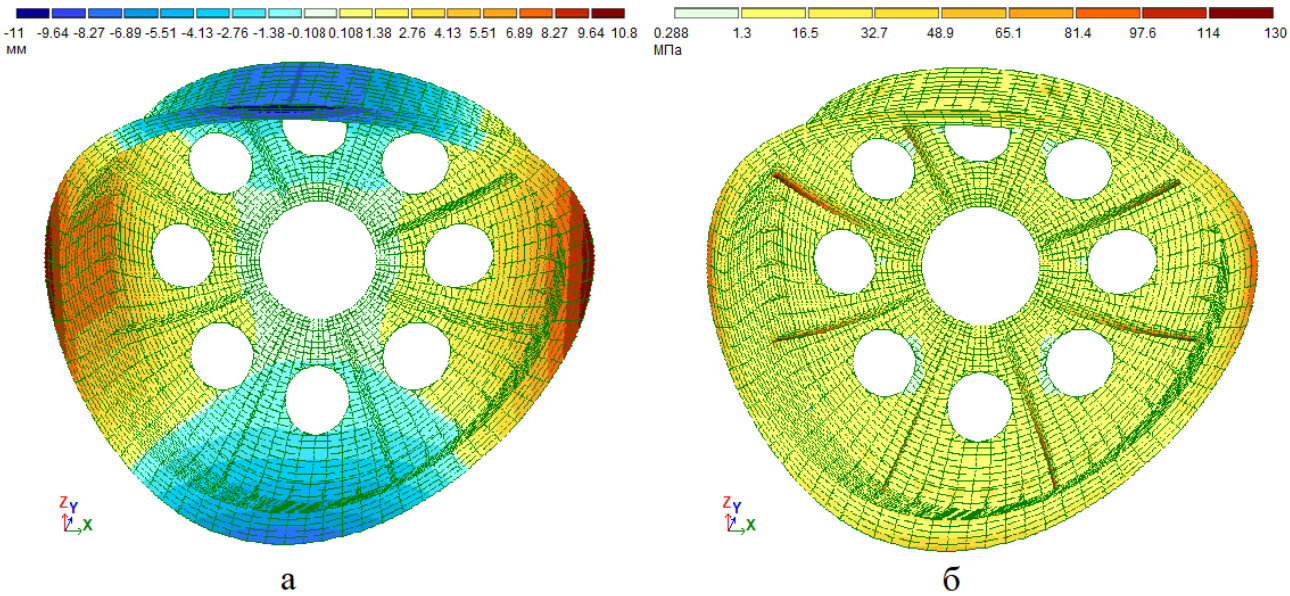


Рис. 6. Модель 1:
а – ізополя переміщень по осі Y; б – ізополя еквівалентних напружень (NE04)

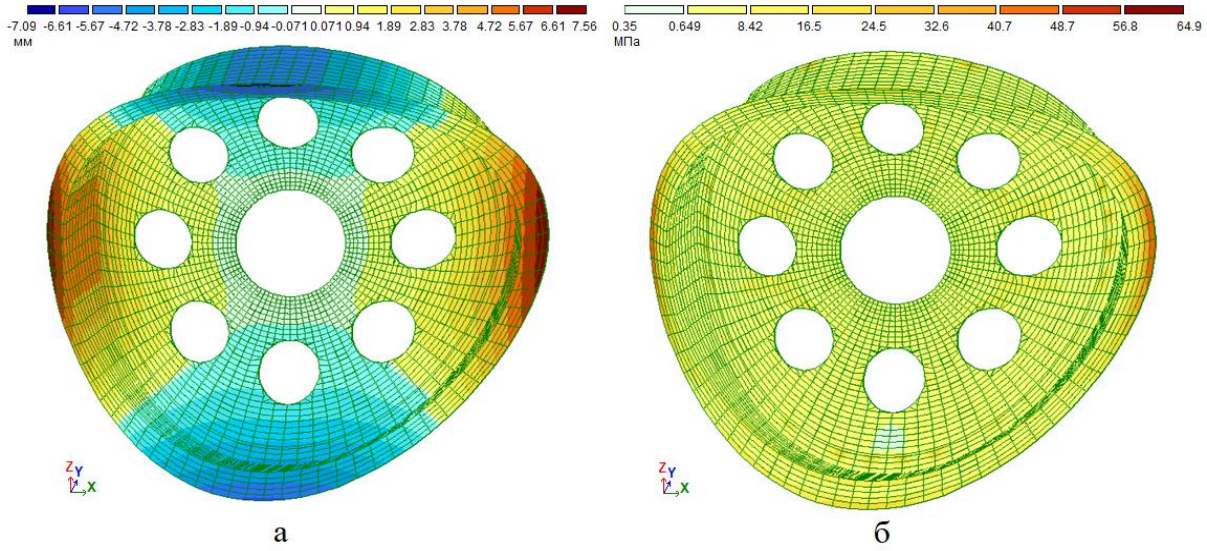


Рис. 7. Модель 2:
а – ізополя переміщень по осі Y; б – ізополя еквівалентних напружень (NE04)

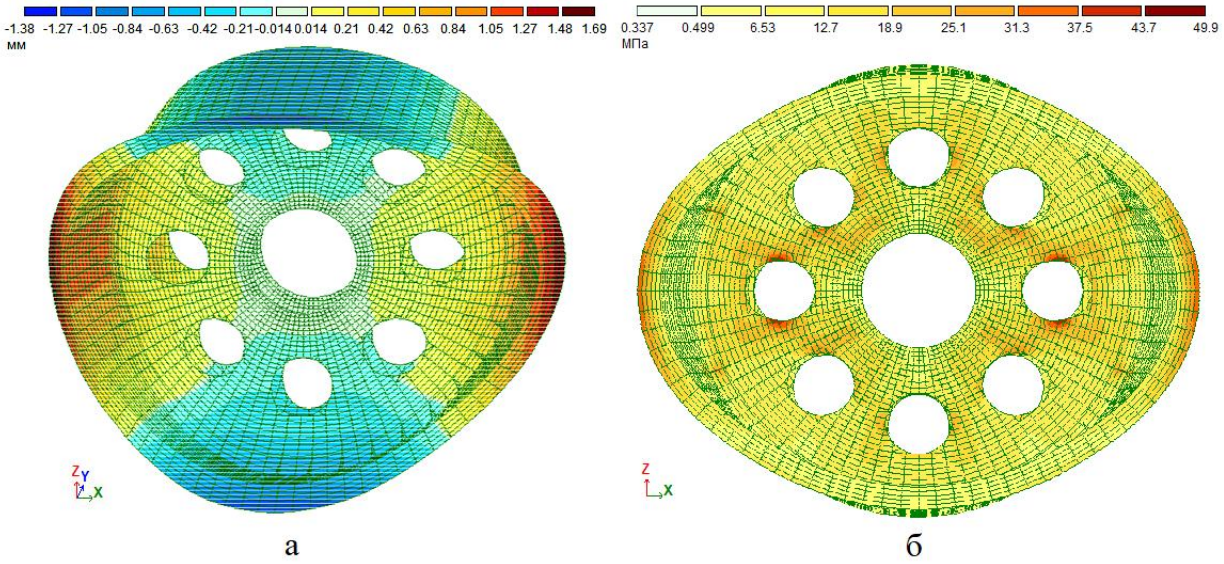


Рис. 8. Модель 3:
а – ізополя переміщень по осі Y; б – ізополя еквівалентних напружень (NE04)

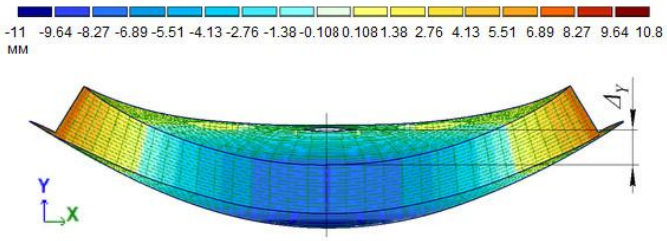


Рис. 9. Модель 1: ізополя переміщень по осі Y, вигляд зверху

Таблиця 2

Результати скінченно-елементного моделювання

Назва моделі	Максимальне переміщення Δ_Y, мм	Максимальне еквівалентне напруження, МПа	Маса, т
Модель 1	9,64	130	15,37
Модель 2	5,67	64,9	15,37
Модель 3	1,05	49,9	19,02

Висновки

1. Побудовано скінченно-елементні моделі трьох конструкцій переставної частини барабана з різними геометричними параметрами.

2. Для розглянутих моделей отримано ізополя переміщень по осі вала барабана та еквівалентних напружень під дією рівномірно розподіленого навантаження від гальмівних колодок.

3. Деформація моделі з однією лобовиною товщиною 40 мм біля торця спричиняє розширення щілини між частинами барабана на 9,64 мм, що майже у два рази перевищує допустиме значення (5 мм). Недостатня жорсткість барабана цієї конструкції підтверджена досвідом експлуатації машині МПУ-6,3×2,8/0,63 виробництва Ново-Краматорського машинобудівного заводу.

4. Перенесення лобовини барабана (товщиною 40 мм) із підкріплювальними елементами з торця обичайки до гальмівного обода зменшує розширення щілини в 1,7 раза (з 9,64 до 5,67 мм), але розширення все одно виходить за межі встановленої норми.

5. Збільшення ширини барабана в 1,95 раза (з 650 до 1270 мм) і встановлення двох лобовин вдвічі меншої товщини і з'єднаних між собою ребрами підвищує масу барабана в 1,24 раза (з 15,37 до 19,02 т), але забезпечує розширення щілини на 1,05 мм, що майже в п'ять разів менше допустимого.

6. Максимальні еквівалентні напруження в усіх розглянутих моделях значно менші за межу текучості Сталі 20, із якої виготовлено барабани.

7. Розроблено практичні рекомендації щодо конструкції шахтних підйомників із розрізним барабаном і внутрішніми колодковими гальмами для забезпечення допустимого розширення щілини між частинами барабана: у конструкції переставного з однією лобовиною останню раціонально встановлювати біля гальмівного обода. При цьому розширення щілини перевищує норму лише на 13,4 %, але економія маси порівняно з конструкцією з двома лобовинами становить 25 %. До того ж встановлення другої лобовини потребує збільшення ширини барабана.

8. Треба обов'язково провести додаткові дослідження з метою обґрунтування допустимих значень ширини щілини для канатів різних діаметрів, а також підсилення конструкції з однією лобовиною за мінімального збільшення маси.

Список використаних джерел

1. Козар Л. М., Кравець А. М., Євтушенко А. В., Козар М. Л. Обґрунтування раціональної товщини обичайки і лобовини канатного барабана. *Науковий вісник будівництва: зб. наук. праць ХНУБА, ХОТВ АБУ*. Харків: ХНУБА, 2024. Вип. 110. С. 102-107. URL: https://svc.kname.edu.ua/index.php/svc/article/view/1765/1746 (дата звернення: 08.04.2025).

2. Symonenko V. V., Zabolotnyi K. S., Panchenko O. Methodology for determining the heat distribution in disc brakes of mine hoisting machines. *Наук. вісн. нац. гірн. ун-ту.* 2024. № 5. С. 82-87. Дніпро: НГУ. URL: https://nvngu.in.ua/jdownloads/ pdf/2024/5/05_2024_Symonenko.pdf (дата звернення: 08.04.2025).

3. Kovyrev M. V., Zabolotnyi K. S., Panchenko O. V., Kukhar V. Y. Development of a model of rubber rope in multilayer winding as a composite material. *Математичне моделювання: наук. журн.* 2024. № 1 (50). С. 64-75. Кам'янське: ДДТУ. URL: https://doi.org/10.31319/2519-8106.1(50)2024.305037 (дата звернення: 08.04.2025).

4. Deng Y., Gong X., Tang T., Wang H. Effect of drum structure of double-rope multi-layer winding hoist on wire ropes' tension difference. *Meitan Xuebao/Journal of the China Coal Society*. 2020. 45 (11). P. 3952–3960. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2019.1236.

5. Gong X.-S., Luo Y.-C., Wu S.-Y. Effect of drum structure of mine hoist on multilayer winding and multipoint lifting ropes' discordance. *Meitan Xuebao / Journal of the China Coal Society*. 2016. 41 (8). P. 2121-2129. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2015.1959.

6. Zabolotnyi K. S., Zhupiiev O. L., Symonenko V. V. Substantiating the methods for calculating the split cylindrical drums of mine hoisting machines with increased rope capacity. *Наук. вісн. нац. гірн. ун-ту.* 2022. № 5. С. 60-66. Дніпро: НГУ. URL: https://nvngu.in.ua/ jdownloads/pdf/2022/5/05_2022_Zabolotnyi.pdf (дата звернення: 08.04.2025).

7. Соснина Е. Н. Вычислительный эксперимент по определению максимальных напряжений неподкрепленных разрезных барабанов шахтных подъемных машин. *Наук. вісн. нац. гірн. ун-ту.* 2012. № 5. С. 71-75. URL: https://nvngu.in.ua/index.php/en/ component/jdownloads/finish/35-05/563-2012-5-sosnina/0 (дата звернення: 08.04.2025).

8. Заболотний К. С., Жупієв О.Л., Сосніна Є. М. Дослідження напружено- деформованого стану розрізних барабанів шахтних піднімальних машин. *Наук. вісн. нац. гірн. ун-ту.* 2012. № 1. С. 82-87. Дніпропетровськ: НГУ. URL: https://nvngu.in.ua/index.php/en/component/ jdownloads/finish/31-01/453-2012-01-zabolot/0 (дата звернення: 08.04.2025).

9. Фідровська Н. М., Лєсовицький К. Ю. Визначення напруженого стану лобовини барабану підйомної машини. *Машинобудування: зб. наук. праць Укр. інж.-пед. акад.* Харків: УІПА, 2017. № 20. С. 19-21. URL: http://repo.uipa.edu.ua/jspui/handle/123456789/5655 (дата звернення: 08.04.2025).

10. Фідровська Н. М., Хурсенко С. О., Бобонець О. І. Обґрунтування доцільності встановлення кілець жорсткості в шахтних барабанах. *Вісн. Харк. нац. автомоб.-дороож. ун-ту.* Харків: ХНАДУ, 2020. Вип. 88, т. 2. С. 67–70. URL: https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2020.88.2.67 (дата звернення: 08.04.2025).

11. Fidrovska N. M., Slepuzhnikov E. Y., Nesterenko V. V., Musaiev Z. R. Main problems of mine drum design. *Вісн. Харк. нац. автомоб.-дороож. ун-ту.* Харків: ХНАДУ, 2023. Вип. 101, т. 2. С. 142-146. URL: https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2023.101.2.142-146 (дата звернення: 08.04.2025).

12. González-Carbajal J. An analytical model for the drum-rope interaction in hoisting mechanisms and cable-driven systems. *Mechanism and Machine Theory*. 2025. 207, 105939. DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2025.105939.

13. Zhou B., Hu Y., Zhu H. Dynamic simulation and experimental investigation of the double-rope winding hoister based on an equivalent mechanical model of wire ropes *Structures: Journal.* 2024. 202469, 107237. DOI: 10.1016/j.istruc.2024.107237.

14. Zhao T., Qi Z., Wang G., Wang T., Xu J. An analysis method for rope-driven multibody systems with pulley blocks. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2024. 38(12). P. 6471–6487. DOI: 10.1007/s12206-024-1105-x.

15. Козарь Л. М. Определение рациональных параметров разрезного барабана подъемника с учетом динамики переходных процессов. *Подъемные сооружения. Специальная техника: науч.-техн. и производствен. ж.* Одесса, 2002. № 4. С. 9-10.

16. НПАОП 10.0-1.01-10. Правила безпеки у вугільних шахтах: затв. Держпромгірнаглядом України 22.03.2010 р. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0398-10#Text (дата звернення: 08.04.2025).

17. Писаренко Г. С., Квітка О. Л., Уманський Е. С. Опір матеріалів: підруч. / за заг. ред. Г. С. Писаренка. Вид. 2-ге, доп. і перероб. Київ: Вища школа, 2004. 655 с.

Козар Леонід Михайлович, кандидат технічних наук, доцент кафедри машинобудування та технічного сервісу машин, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0002-3740-6966. Тел.: +38 (050) 302-42-75. E-mail: leokozar@gmail.com.
Романович Євгеній Валентинович, кандидат технічних наук, доцент кафедри машинобудування та технічного сервісу машин, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0003-2555-5849. Тел.: +38 (067) 427-47-70. E-mail: 0674274770@ukr.net.
Євтушенко Андрій Вікторович, кандидат технічних наук, доцент кафедри машинобудування та технічного сервісу машин, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0002-8575-3030. Тел.: +38 (067) 385-62-94. E-mail: ave65@ukr.net.
Козар Микита Леонідович, аспірант кафедри машинобудування та технічного сервісу машин, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0009-0004-8560-5910. Тел.: +38 (050) 402-65-70. E-mail: nikita.kozar@gmail.com.

Kozar Leonid, PhD, Associate Professor, Department of Mechanical Engineering and Technical Service of Machines, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0002-3740-6966. Tel.: +38 (050) 302-42-75. E-mail: leokozar@gmail.com.
Romanovych Yevhenii, Associate Professor, Department of Mechanical Engineering and Technical Service of Machines, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0003-2555-5849. Tel.: +38 (067) 427-47-70. E-mail: 0674274770@ukr.net.
Yevtushenko Andrii, Associate Professor, Department of Mechanical Engineering and Technical Service of Machines, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0002-8575-3030. Tel.: +38 (067) 385-62-94. E-mail: ave65@ukr.net.
Kozar Mykyta, postgraduate student, Department of Mechanical Engineering and Technical Service of Machines, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0009-0004-8560-5910. Tel.: +38 (050) 402-65-70. E-mail: nikita.kozar@gmail.com.

Статтю прийнято 14.05.2025 р.

ТЕПЛОЕНЕРГЕТИКА (144)

УДК 621.316.1

«СОНЯЧНІ» ПЕРСПЕКТИВИ УКРАЇНИ

**Кандидати техн. наук П. О. Пасічник, О. Г. Погосов,
асист. Є. О. Кулінко, студент Д. В. Юзьков**

«SOLAR» PROSPECTS OF UKRAINE

**Phd (Tech.) P. O. Pasichnyk, Phd (Tech.) O. G. Pogosov, Assist. Y. O. Kulinko,
student D. V. Yuzkov**

DOI: https://doi.org/10.18664/1994-7852.212.2025.336302

Анотація. Мета. *Основним завданням цієї статті є дослідження можливих перспектив і потенціалу розвитку сонячних електричних станцій для досягнення енергетичної забезпеченості, збільшення використання відновлюваних джерел енергії, децентралізації енергогенеруючих об`єктів. У статті акцентовано на основних економічних і життєвих факторах, що визначають перспективи впровадження технологій сонячної енергії.*

Методика. *У статті був використаний комплексний підхід, що передбачає аналіз метеорологічних даних і статистичних показників для обґрунтування впровадження сонячних відновлюваних джерел енергії. Метеорологічні спостереження включали аналіз кліматичних умов і показників сонячної інсоляції в різних регіонах України, які стали основою для оцінювання потенціалу використання сонячної енергії.*

Наукова новизна. *Статистично досліджено можливості децентралізації енергетичного сектору в умовах воєнних реалій. Великі енергогенеруючі об'єкти стають першочерговими цілями обстрілів, що потребує зосередження на розподілених джерелах енергії. Сонячна енергетика завдяки здатності генерувати енергію в будь-якій точці країни, забезпечує стійкість, незалежність енергетичних систем і захист від ризиків, пов'язаних із втратою стратегічних об'єктів.*

Практична значущість. *Практична значущість цієї роботи полягає в наданні фактів, що обґрунтовують впровадження енергогенеруючих приладів, які використовують сонячну енергію. Такі прилади сприяють децентралізації енергосистеми та забезпечують стабільність енергопостачання в різних умовах.*

Ключові слова: *сонячна енергетика, відновлювані джерела енергії, енергетична незалежність, потенціал розвитку, стійкість енергосистеми.*

Abstract. Purpose. *The primary task of this article is to study the possible prospects and potential for the development of solar power plants aimed at achieving energy security, increasing the use of renewable energy sources, and decentralizing energy-generating facilities. The study focuses on key economic and vital factors that determine the prospects for the implementation of solar energy technologies.*

Methodology. *This article employs a comprehensive approach, including the analysis of meteorological data and statistical indicators to substantiate the implementation of solar renewable energy sources. Meteorological observations involved analyzing climatic conditions and solar*

insolation indicators across various regions of Ukraine, serving as a basis for assessing the potential use of solar energy.

Scientific novelty. *Statistical research has analyzed the possibilities for decentralizing the energy sector under wartime conditions. Large energy-generating facilities have been identified as primary targets for attacks, emphasizing the need for decentralized energy sources. Solar energy, due to its ability to generate power anywhere in the country, ensures resilience, independence of energy systems, and protection from risks associated with the loss of strategic facilities.*

Practical value. *The practical significance of this work lies in presenting facts that substantiate the implementation of energy-generating devices utilizing solar energy. These devices promote the decentralization of energy systems and ensure stable energy supply under various conditions.*

Keywords: *Solar energy, renewable energy sources, energy independence, development potential, energy system resilience.*

Вступ. Збройна агресія російської федерації проти України демонструє вразливість централізованих систем генерації енергії до військових атак. Зокрема, першими під прицілом великі вузли енергогенерації (ГЕС, ТЕС, ТЕЦ та ін.), вузли передавання і транспортування енергетичних ресурсів (трансформаторні електропідстанції, лінії електропередач, порти тощо) і безпосередньо джерела енергоносіїв (газові сховища, родовища, шахти і т. д.).

Атаки на українську енергосистему мають кілька наслідків, які суттєво впливають на країну:

- вимкнення електроенергії: атаки призводять до масових вимкнень електрики, що впливають на життєдіяльність населення та промисловості;

- втрати в економіці: пошкодження енергетичної інфраструктури завдає збитків бізнесу і державі, знижуючи продуктивність і уповільнюючи економічний розвиток;

- соціальна нестабільність: відсутність електроенергії може призвести до протестів і невдоволення серед населення, посилюючи соціальну напругу;

- вплив на критичну інфраструктуру: вимкнення електроенергії може загрожувати роботі лікарень, систем водопостачання, зв'язку, що є критично важливими для забезпечення базових потреб населення;

- екологічні наслідки: пошкодження енергосистеми може викликати екологічні проблеми, зокрема витоки пального або забруднення внаслідок зупинки підприємств;

- психологічний тиск: постійні атаки на енергетичну інфраструктуру посилюють стрес і невизначеність у суспільстві, погіршуючи загальний психологічний стан населення;

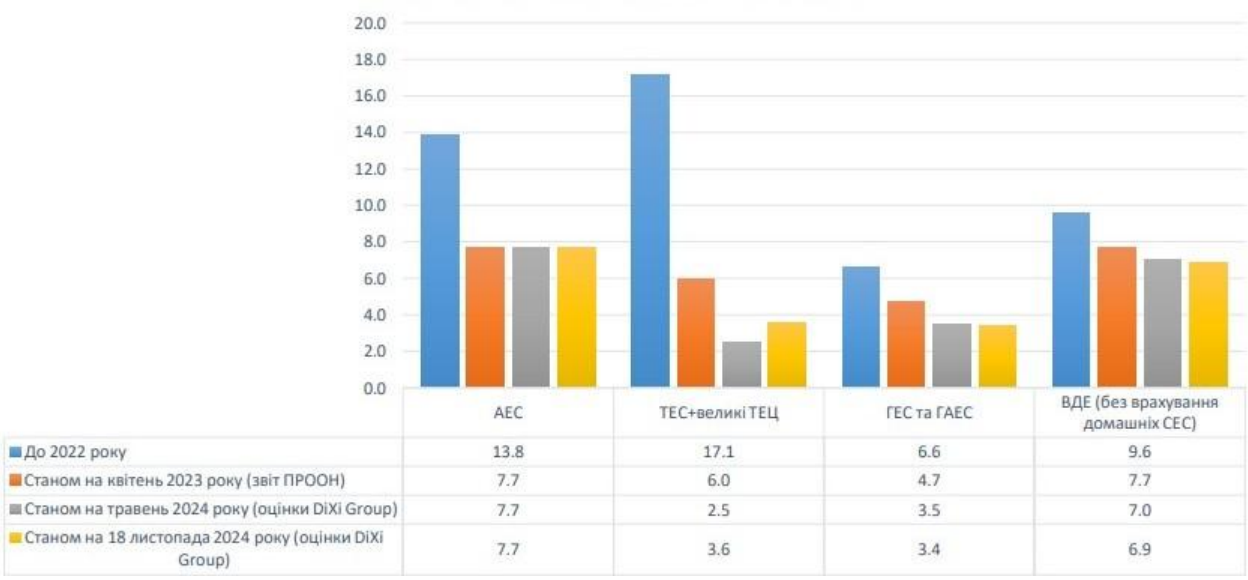
- витрати на відновлення: для відновлення пошкодженої інфраструктури потрібні значні кошти і ресурси, що може вплинути на бюджет країни.

Визначення мети та завдання дослідження. Основним завданням цієї статті є дослідження можливостей розвитку сонячних електричних станцій для досягнення енергетичної незалежності та децентралізації енергогенеруючих об’єктів. У роботі проаналізовано основні фактори впровадження сонячної енергетики та обґрунтовано доцільність використання відновлюваних джерел енергії в умовах сучасних викликів, таких як воєнні дії. Використано статистичні дані, які охоплюють кліматичні умови, показники сонячної інсоляції, економічну ефективність і рівні енергоспоживання в різних регіонах України, що дає змогу оцінити потенціал сонячних енергетичних систем для стабільного енергозабезпечення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Основні показники енергетичної системи України станом на лютий 2025 року демонструють значні втрати генеруючих потужностей, що

зумовлені регулярними обстрілами об'єктів енергетичної інфраструктури. Протягом 2024 року загальні втрати потужності перевищили 9 ГВт. Суттєве зниження виробничих можливостей торік спостерігали в сегменті теплової та гідрогенерації. Масштабна ремонтна кампанія напередодні опалювального сезону 2024/2025 додала в мережу майже 3 ГВт додаткової потужності (рис. 1). У літній період 2024 року відновлювана генерація досягла рекордних показників у загальному балансі (17-18 %), але в зимовий сезон ця частка скоротилася приблизно на 50 % [1].

Така ситуація провокує розвиток децентралізованих і альтернативних систем енергопостачання. Найбільш перспективним альтернативним джерелом енергії, як теплової, так і електричної, без сумніву, є сонячне випромінювання, оскільки воно безкоштовне і повсюдне [2-4].



	АЕС	ТЕС+великі ТЕЦ	ГЕС та ГАЕС	ВДЕ (без врахування домашніх СЕС)
До 2022 року	13.8	17.1	6.6	9.6
Станом на квітень 2023 року (звіт ПРООН)	7.7	6.0	4.7	7.7
Станом на травень 2024 року (оцінки DiXi Group)	7.7	2.5	3.5	7.0
Станом на 18 листопада 2024 року (оцінки DiXi Group)	7.7	3.6	3.4	6.9

Рис. 1. Доступні генеруючі потужності України, ГВт

Основна частина дослідження. Сонячна енергетика – найперспективніша і найдинамічніша галузь сучасної відновлюваної енергетики, оскільки в Україні існують достатньо сприятливі природні умови для використання сонячної енергії. Кількість сумарної радіації – енергії, що потенційно може бути використана на формування всіх природних процесів, перебуває в межах від 1064,9 до 1551,7 кВт·год/м² на рік (рис. 2). Величини середніх річних значень радіаційного балансу, тобто сонячної енергії, засвоєної діяльним шаром земної поверхні, змінюються по території від 330 до 580 кВт·год/м² [5].

Для розрахунку потенціалу потужності встановлення сонячних електростанцій використовують не лише показники надходження сонячної радіації, а і просторові показники, такі як доступна площа для будівництва станцій [3, 6] і коефіцієнт потужності геліополів, який залежить від типу та розташування сонячних колекторів, відстані між їхніми рядами тощо. За результатами наукових досліджень, потенціал потужності встановлення сонячних панелей становить 2 449 тис. МВт, а потенціал річної сонячної електрогенерації в Україні становить близько 3 082 млрд кВт·год/р. [5].

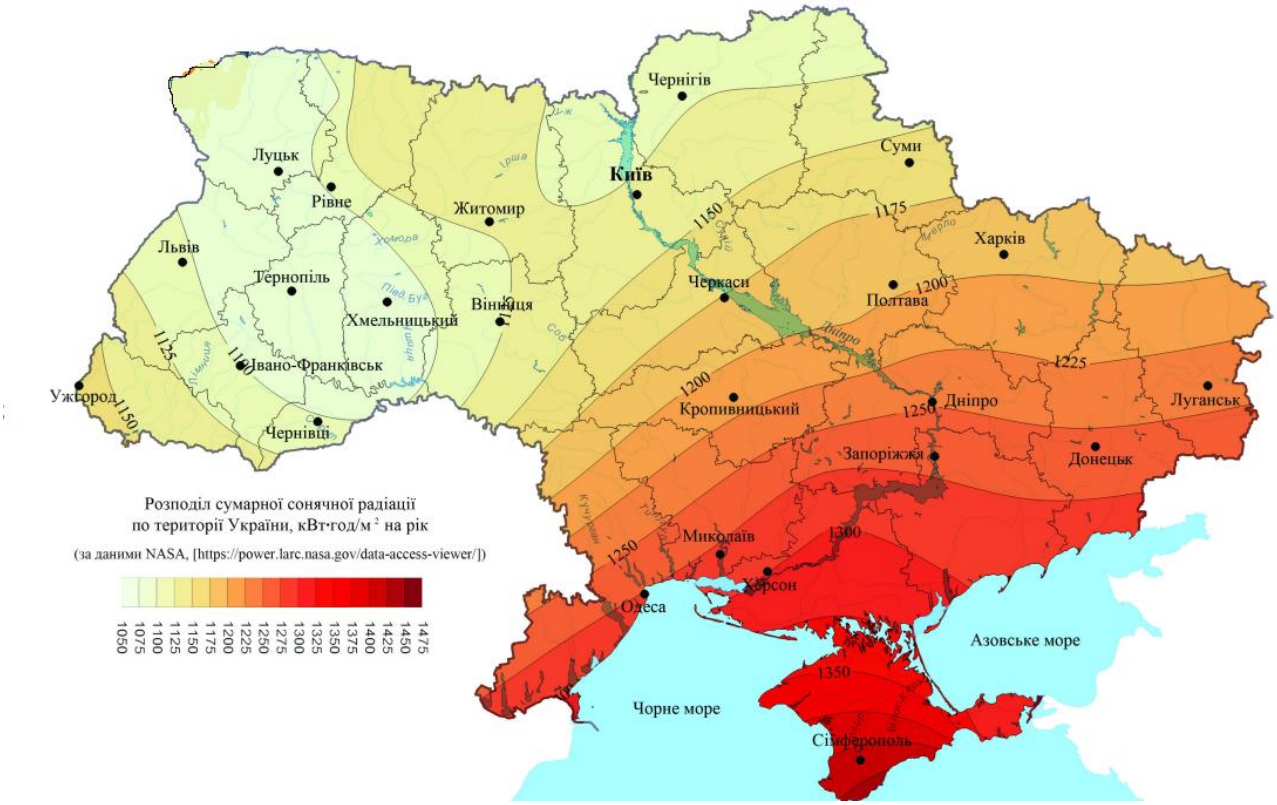


Рис. 2. Розподіл сумарної сонячної радіації по території України

Сонячну енергетику можна поділити на теплову та електричну. Теплова геліоенергетика є доволі нішевою галуззю інженерії, що може бути використана індивідуально під конкретні завдання з теплопостачання, переважно це підігрів води для систем ГВП і басейнового господарства в літній і перехідний періоди року і технологічні системи теплопостачання. Основною проблемою є тотальне неспівпадіння пікового надходження сонячної енергії та споживання теплової енергії (рис. 3) [7]. У свою чергу відсутність ринку теплової енергії для можливості продажу теплової енергії влітку в централізовану мережу теплопостачання обмежує економічну привабливість сонячних систем геліопостачання. Перетворення сонячної теплової енергії в більш ліквідні види енергії є доволі складним і затратним процесом [3, 8].

Більш перспективним для України є використання сонячного випромінювання для отримання електроенергії на сонячних електростанціях (СЕС) великого діапазону потужностей, від 5 кВт на приватних домогосподарствах до 250 МВт комерційної Нікопольської СЕС. Це обумовлено тим, що електрична умова має високий коефіцієнт перетворення в будь-який інший вид енергії, до того ж літні піки електроспоживання (робота кондиціонерів і холодильного обладнання) чітко співпадають із піками активності сонячного випромінювання.

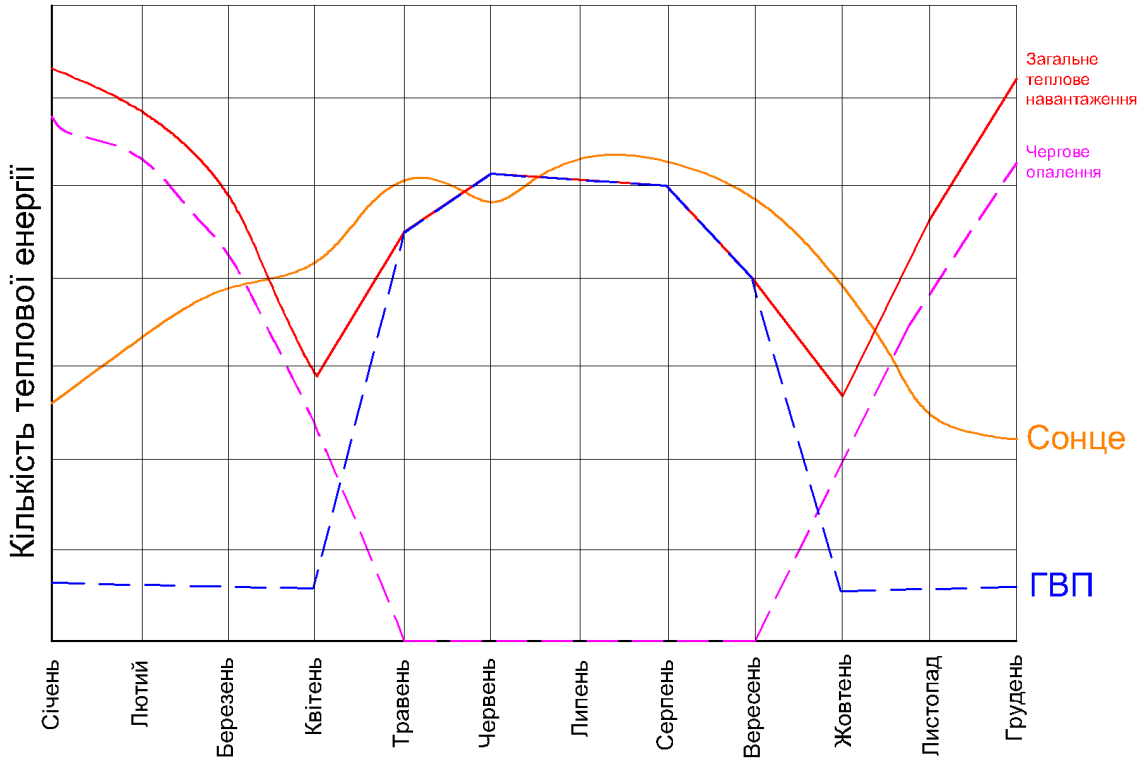


Рис. 3. Орієнтовна кількість теплової енергії для ГПВ і чергового опалення середньостатистичного готелю з оптимальним використанням сонячної енергії

Сонячна електростанція – це енергетичний об'єкт, що перетворює сонячне випромінювання в електроенергію. Основою станції є фотоелементи, які під впливом сонячної радіації генерують постійний струм за рахунок ефекту p-n-переходу [3, 9]. Інвертори цей струм перетворюють у змінний, придатний для використання в електромережі. Основними елементами є фотовольтаїчні панелі, інверторне обладнання, монтажні системи та обладнання для моніторингу.

Сонячні електростанції умовно поділяють на два типи: домашні (до 30 кВт) і комерційні великі СЕС (від 1 МВт). Домашні електростанції можуть забезпечити енергетичну незалежність домогосподарства і можливість отримувати дохід від продажу надлишків електроенергії в загальну мережу. Термін окупності таких станцій складає чотири-шість років за терміну експлуатації геліотехнічного обладнання більше 25 років. За період повномасштабної війни кількість домашніх СЕС зростає на 25-30 % щорічно. У 2025 році кількість просьюмерів складає близько 100 000. Розвиваються енергетичні кооперативи та системи віртуальних електростанцій на базі об'єднаних домашніх СЕС.

Комерційні СЕС – це потужні енергогенеруючі підприємства, що займають значні площі. Такі станції зазвичай розміщують на промислових територіях або малопродуктивних землях. Україна активно розвиває велику сонячну енергетику, маючи десятки потужних промислових СЕС. Загальна встановлена потужність сонячних електростанцій перевищує 6,8 ГВт. Найбільшими комерційними СЕС в Україні є

Нікопольська СЕС (246 МВт, 400 га, Дніпропетровська обл.), Покровська СЕС (230 МВт, 375 га, Дніпропетровська обл.), Кам'янець-Подільська СЕС (120 МВт, 250 га, Хмельницька обл.), СЕС «Сонячна-Кілія» (110 МВт, 220 га, Одеська обл.), СЕС Терновиця (44 МВт, 80 га, Івано-Франківська обл.), СЕС Старокозача (43 МВт, 80 га, Одеська обл.), Димерська СЕС (37 МВт, 60 га, Київська обл.) та ін. Також із 2022 року в окупації опинилися потужні СЕС Tokmak Solar Energy (50 МВт, Запорізька обл.) і ФЕС Костогризове (40 МВт, Херсонська обл.), а з 2014 року окуповані кримські СЕС «Перове» (105 МВт), «Охотникове» (82 МВт) і «Миколаївка» (69,7 МВт). Перспектива вироблення електроенергії наявними СЕС станом на 2021 рік подана на рис. 4 [5].

В Україні розповсюджена система підтримки за «зеленим» тарифом, що гарантує викуп електроенергії від відновлюваних джерел енергії до 2030 року. Тарифна ставка для комерційних СЕС становить 0,12 євро/кВт·год, а домашніх, що встановлені у 2024 році (до 30 кВт) – 0,16 євро/кВт·год. Виплати проводять у національній валюті за курсом НБУ [10]. Для розрахунків за сонячну електроенергію для домашніх СЕС у країні діють два просьюмерські методи розрахунку – NET Metering і NET Billing.

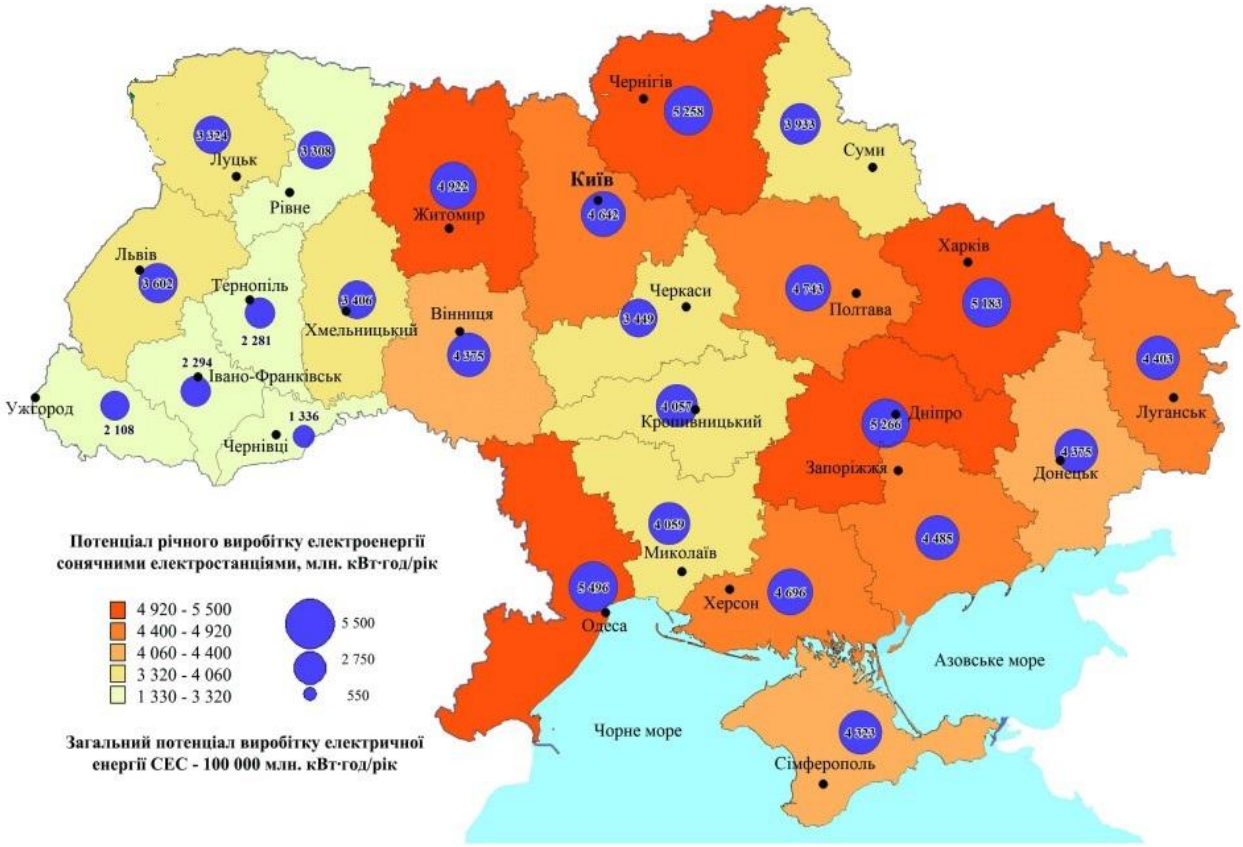


Рис. 4. Орієнтовна кількість теплової енергії для ГПВ і чергового опалення середньостатистичного готелю з оптимальним використанням сонячної енергії

Щомісячні виплати здійснюють автоматично через ДП «Гарантований покупець» [11].

NET Metering – це аналог «зеленого» тарифу, за допомогою якого домогосподарство використовує згенеровану енергію для власних потреб, а надлишки віддає в єдину енергетичну мережу України. Кількість енергії, що віддають, зараховують на індивідуальний баланс споживача. У подальшому накоплену енергію можна забирати назад, споживаючи електроенергію із загальної мережі в періоди недостатньої власної генерації (ніч, зима, висока хмарність тощо).

NET Billing – це система, аналогічна до NET Metering з однією відмінністю – накоплену енергію зараховують не у вигляді енергії, а вигляді грошей. Кількість грошей залежить від вартості електроенергії на момент передавання надлишків до об'єднаної мережі. Особливістю цього методу є те, що накопичені кошти можна використати лише для оплати спожитої з мережі електроенергії [11].

На основі оброблених даних і аналізу економічного та енергетичного стану України було проведено SWOT-аналіз розвитку сонячних енергетичних систем в нашій країні (рис. 5).

Рис. 5. SWOT-аналіз перспектив розвитку геліосистем в Україні

Висновки. Воєнні реалії України погіршують економічний і технологічний потенціал країни, а варварські атаки на українську енергетику створюють масу проблем, фінансових і соціальних збитків. Проте руйнація традиційних централізованих джерел енергії спонукає до децентралізації систем енергозабезпечення та розвитку відновлюваних джерел енергії, зокрема сонячних енергетичних систем. Україна має достатній природний потенціал для розвитку сонячних енергетичних установок і певне технічне, комерційне і правове підґрунтя для реалізації цього величезного потенціалу. Динаміка зростання енергогенерації від домашніх і комерційних СЕС дає надію на ефективне заміщення традиційних джерел енергії та «одужання» української енергосистеми.

Список використаних джерел

1. DiXi Group / Офіційний сайт аналітичного центру (2025). URL: https://dixigroup.org/.
2. Приймак О., Пасічник П., Білан Р., Нагорний С. (2016). Визначення частки теплового навантаження, що заміщується енергією сонця та вітру для системи теплопостачання з комбінованим сонячно-електричним повітропідігрівачем. *Енергоефективність в будівництві та архітектурі*. (8). 292-296.
3. Duffie J. A., Bachman W. A. (2020). Solar Engineering of Thermal Processes, Photovoltaics and Wind. 5th edition. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
4. Пасічник П., Погосов О., Кулінко Є. (2024). Аналіз стану світового ринку сучасних повітряних геліоколекторів. *Collection of Scientific Papers «ΛΟΓΟΣ»*. February 2, 2024. Oxford, UK. 188–194. https://doi.org/10.36074/logos-02.02.2024.038.
5. Кудря С. О. (2024). Атлас енергетичного потенціалу відновлюваних джерел енергії України / Інститут відновлюваної енергетики НАНУ. https://doi.org/10.36296/atlas-2024.
6. Погосов О., Пасічник П., Кулінко Є. (2023). Вплив деяких проектних рішень на клас енергетичної ефективності будівлі. *Collection of Scientific Papers «SCIENTIA»*. December 22, 2023; Coventry, UK. 214–217. URL: https://previous.scientia.report/index.php/archive/article/view/1526.
7. Kulinko Y., Skochko V., Pohosov O. (2019). Diagnostic technique for wells of soil heat pumps in terms of thermal potential depending on the type of soil. *Energy-Efficiency in Civil Engineering and Architecture*. (12). 20–29. https://doi.org/10.32347/2310-0516.2019.12.20-29.
8. Solrico. Agency for solar market research and international communication (2024). URL: http://www.solrico.com.
9. Кудря С. О. Нетрадиційні та відновлювані джерела енергії: підручник. Київ: Національний технічний університет України «КПІ», 2012. 492 с.
10. Про внесення змін до деяких законів України щодо відновлення та «зеленої» трансформації енергетичної системи України: Закон України № 3220-IX (2024). URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3220-20#Text.
11. ДП «Гарантований покупець» (2025). URL: https://www.gpee.com.ua/.

Пасічник Павло Олександрович, кандидат технічних наук, доцент кафедри теплотехніки, Київський національний університет будівництва і архітектури. ORCID iD(https://orcid.org/0000-0001-8499-6949).
Погосов Олександр Григорович, кандидат технічних наук, доцент кафедри теплотехніки, Київський національний університет будівництва і архітектури. ORCID iD(https://orcid.org/0000-0003-2158-8897).
Кулінко Євген Олександрович, асистент кафедри теплотехніки, Київський національний університет будівництва і архітектури. ORCID iD(https://orcid.org/0000-0002-8834-3600).

Юзьков Денис Валерійович, студент, Київський національний університет будівництва і архітектури. ORCID iD(https://orcid.org/0009-0001-2857-7325).

Pavlo Oleksandrovych Pasichnyk, PhD in Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Heat Engineering, Kyiv National University of Construction and Architecture. ORCID iD (https://orcid.org/0000-0001-8499-6949).
Oleksandr Hryhorovych Pogosov, PhD in Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Heat Engineering, Kyiv National University of Construction and Architecture. ORCID iD (https://orcid.org/0000-0003-2158-8897).
Yevhen Oleksandrovych Kulinko, Assistant at the Department of Heat Engineering, Kyiv National University of Construction and Architecture. ORCID iD (https://orcid.org/0000-0002-8834-3600).
Denis Valeriovych Yuzkov, Student at Kyiv National University of Construction and Architecture. ORCID iD (https://orcid.org/0009-0001-2857-7325).

Статтю прийнято 17.06.2025 р.

БУДІВНИЦТВО ТА ЦИВІЛЬНА ІНЖЕНЕРІЯ (192)

УДК 691.3:691.176:691.175

БІОКОМПОЗИТНИЙ МАТЕРІАЛ НА ОСНОВІ ВІДХОДІВ ДЕРЕВИНИ

Канд. техн. наук С. Л. Андрух, д-р техн. наук В. П. Сопов

BIOCOMPOSITE MATERIAL BASED ON WOOD WASTE

PhD (Tech.) S. Andrukh, Dr. Sc. (Tech.) V. Sopov

DOI: https://doi.org/10.18664/1994-7852.212.2025.336310

Анотація. *Дослідження присвячене розробленню інноваційного будівельного матеріалу на основі деревної стружки з використанням натурального казеїнового клею як зв'язуючого. У роботі описано методику виготовлення дослідних зразків у формі цегли, проведено випробування на визначення міцності, щільності, водопоглинання, морозо- і термостійкості, а також порівняно їх із властивостями традиційних будівельних матеріалів. Отримані результати підтверджують потенціал такого біокомпозитного матеріалу для використання в малоповерховому будівництві для внутрішніх огороджувальних систем і декоративних елементів інтер'єру. Розглянуто практичну значущість і перспективи виробництва в умовах малих підприємств.*

Ключові слова: *біокомпозит, казеїновий клей, деревна стружка, будівельні матеріали, міцність, морозостійкість, водопоглинання, сталий розвиток.*

Abstract. *The study is dedicated to the development and comprehensive examination of an innovative building material based on natural casein adhesive and wood shavings, aimed at improving the environmental friendliness and sustainability of construction materials. The research describes in detail the preparation method of experimental samples in the form of bricks, including the formulation of casein adhesive using technical casein and lime, the selection and pretreatment of wood shavings, the mixing process, pressing, thermal treatment, and drying stages. The paper outlines the procedures used to evaluate the physical and mechanical properties of the obtained material, such as compressive and flexural strength, density, water absorption, thickness swelling, frost resistance under cyclic freezing and thawing, as well as thermal resistance under high-temperature exposure. Special attention is paid to the comparative analysis of the obtained biocomposite with commonly used building materials, such as oriented strand boards (OSB), particle boards, clay and sand-lime bricks, and lightweight concrete (arbolite), which allows to identify competitive advantages and limitations of the proposed material. The study also highlights the key factors affecting the performance of the material, including the ratio of adhesive to filler, the moisture content of raw materials, and the conditions of pressing and curing. The results demonstrate that the developed biocomposite material achieves a compressive strength of 10–15 MPa, a density of 800–900 kg/m³, water absorption of 30–40 %, and moderate frost and thermal resistance, making it suitable for use in low-rise construction, non-load-bearing walls, and interior partitioning. The conclusions emphasize the scientific novelty of the proposed approach, its practical significance for the development of sustainable construction technologies, and the potential for further optimization and scaling of the manufacturing process to improve water and frost resistance, enhance durability,*

and broaden application areas. The article serves as a foundation for future research on eco-friendly biocomposite materials.

Keywords: *biocomposite, casein adhesive, wood shavings, building materials, strength, frost resistance, water absorption, sustainable development.*

Вступ. На сучасному етапі розвитку виробництва будівельних матеріалів зростає інтерес до екологічно чистих біокомпозитів на основі відновлюваних сировинних ресурсів. Вичерпання традиційних ресурсів і проблеми охорони довкілля спонукають до пошуку альтернативних матеріалів, у тому числі на основі промислових відходів [1]. Наприклад, створення біокомпозитних матеріалів на основі деревних відходів має важливе значення для сталого розвитку будівництва та охорони довкілля. Використання вторинної сировини, зокрема тирси, дає змогу зменшити кількість промислових відходів, скоротити споживання невідновлюваних ресурсів і знизити вуглецевий слід будівельної галузі. Такі матеріали поєднують доступність, екологічність і потенціал для утилізації, водночас зберігаючи задовільні експлуатаційні характеристики для теплоізоляційних та оздоблювальних робіт.

Одним із перспективних напрямів створення біокомпозитних будівельних матеріалів є використання деревних відходів (стружка) у поєднанні з природними зв’язуючими, зокрема білковими клеями. Казеїновий клей – природний білковий клей, що виготовляють із знежиреного молока (казеїну), здавна відомий своїми високими адгезійними властивостями до деревини. Історично його застосовували ще в стародавньому Єгипті та Римі для склеювання деревини для виготовлення меблів і човнів. Надалі білкові клеї (казеїнові, кісткові, кров’яні тощо) були витіснені синтетичними смолами, які забезпечували кращу водостійкість і технологічність [2]. Проте останнім часом можна спостерігати ренесанс інтересу до природних клеїв через потребу в безпечних для здоров’я та навколишнього середовища матеріалах.

У цьому дослідженні розглянуто можливість отримання нового будівельного матеріалу шляхом змішування казеїнового клею з деревною стружкою та пресування сформованої у вигляді цегли суміші. Такий матеріал потенційно поєднує переваги деревини (мала густина, теплоізоляційні властивості) і натурального полімерного зв’язуючого (відсутність токсичних виділень, біорозкладність). Важливо оцінити його фізико-механічні показники – міцність, густину, водо- і морозостійкість, термостійкість тощо – порівняно з традиційними аналогами (деревно-стружкові плити, OSB, дерев’яні блоки, глиняна та силікатна цегла, легкі бетони). Це дасть змогу визначити перспективні сфери застосування нового матеріалу та удосконалити технологію його отримання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Різні аспекти створення біокомпозитів на основі білкових клеїв і лігноцелюлозних наповнювачів висвітлено в низці наукових джерел. Природні білкові клеї (казеїновий, соєвий, кров’яний, кістковий) активно досліджували як екологічну альтернативу фенол- і карбамідоформальдегідним смолам. Зокрема, дослідження ефективності казеїнових клеїв для склеювання дерев'яних шпонових шарів у виробництві біорозкладних лиж показали, що додавання вапна покращує водостійкість і механічні властивості клею [3].

Вивчення фізико-механічних властивостей легких плит із кори, склеєних казеїновими клеями, показало, що такі плити мають добрі показники міцності та стабільності [2].

Ряд інших дослідників показали можливість одержання казеїново-магнієвого композита як вогнезахисного покриття для деревини із властивостями,

конкурентними порівняно із синтетичними аналогами [4]. Казеїновий клей вважають одним із найбільш перспективних натуральних в'яжучих: він складається з молочного білка казеїну, що утворює у водному лужному середовищі міцну колоїдну структуру з частинками казеїнату кальцію. Для приготування робочого розчину казеїнового клею необхідна присутність лугу (наприклад вапна або борної кислоти), що забезпечує розчинення казеїну у воді і утворення клейової системи.

У міжнародній практиці білкові клеї використовували у виробництві деревних плит ще в першій половині XX ст. (наприклад для виготовлення клеєної фанери та ламелей дерев'яних конструкцій). З розвитком нафтохімічних полімерів їх застосування знизилося, але нині спостерігається новий інтерес у контексті екологічно чистих матеріалів. Так, дослідження [2] продемонструвало успішне виготовлення деревних плит із кори на казеїновому клеї (знежиреному сирі з додаванням вапна) з густиною ~450 кг/м³, що були конкурентними за фізико-механічними показниками плитам на сечовино-формальдегідній смолі. За результатами, плити з казеїновим в'яжучим мали модуль пружності (MOE) ~270–313 МПа і міцність на вигин (MOP) ~1,17–1,45 МПа, що співставно з аналогічними показниками для плит на синтетичному клеї (MOE ~249 МПа, MOP ~1,12 МПа). Водночас товщинне набухання з намочуванням складало 11–12 % для казеїнових плит проти ~15 % для плит на смолі, а водопоглинання – ~46–51 % проти 59 % [2], тобто за вологостійкістю казеїнове в'яжуче виявилося не гіршим, а подекуди і кращим (за рахунок вапняної модифікації клею).

Інше близьке за тематикою дослідження виконане авторами в монографії [1], де як в'яжуче використовували кістковий (колагеновий) клей у поєднанні з дрібнодисперсними рослинними наповнювачами (деревне борошно, подрібнена солома, кавова гуща тощо). В отриманих біокомпозитах досягнуто значної міцності для стиску до 50–51 МПа за оптимального співвідношення компонентів. Наприклад, із вмістом 210 мас. ч. дрібного наповнювача на 100 мас. ч. розчину кісткового клею межа міцності для стиску зросла в 1,6 раза (з ~31,85 МПа до 50,95 МПа). Це перевищує міцність багатьох традиційних стінових матеріалів, таких як глинобитні або навіть деякі види керамічної цегли. Водночас автори зазначили необхідність термічної обробки та оптимального вмісту вологи для досягнення такої міцності – надлишкова волога призводила до пор і тріщин у структурі зразків.

Багато робіт присвячено підвищенню водостійкості білкових клеїв. Додавання мінеральних компонентів (гашеного вапна, бури, силікату натрію) утворює нерозчинні комплекси з казеїном, підвищуючи його стійкість до дії води. Додавання ~16 % вапна в казеїновий клей дало змогу отримати клеєні з'єднання фанери з міцністю на відрив після вимочування у 2,7 раза вищою за показник найстійкішого полівінілацетатного клею D4 [3]. Розроблено також казеїнові клеї холодного твердіння з підвищеною водостійкістю для склеювання лиж і ламелей, що не поступаються епоксидним клеям. Отже, проблему вологостійкості казеїнових композицій можна вирішувати підбиранням складу в'яжучого.

Визначення мети та завдання досліджень. *Метою дослідження* є розроблення технології отримання нового будівельного матеріалу на основі суміші казеїнового клею та деревної стружки і вивчення його фізико-механічних властивостей. Зокрема, виникає завдання визначити оптимальні співвідношення компонентів та умови формування на його основі біокомпозитної цегли; дослідити міцність матеріалу для стиску та згину, його густину; оцінити показники водопоглинання, товщинного набухання, морозостійкості і термостійкості; порівняти

отримані характеристики з традиційними матеріалами та обґрунтувати можливі сфери застосування біокомпозитної цегли.

Для виготовлення зразків було використано такі матеріали:

- *казеїновий клей* – отриманий із технічного казеїну (знежиреного сухого сиру) із додаванням лужного реагенту для розчинення. Як луг застосовували гашене вапно $Ca(OH)_2$ лабораторної чистоти, яке змішували з водою до pH ~11. При цьому казеїн переходив у розчинний казеїнат кальцію. Робочий розчин клею готували концентрацією ~20–25 % сухого казеїну (решта – вода та розчинені солі кальцію). Для підвищення водостійкості клею додатково вводили 3 % (маси казеїну) борну кислоту H_3BO_3 (антипіренова та антисептична добавка) і 5 % силікату натрію (рідкого скла). Одержаний казеїновий клей перед змішуванням із наповнювачем мав в'язкість ~500 МПа за температури 20 °C, що забезпечує рівномірне покриття частинок;
- *деревну стружку* – висушені соснові та букові стружки з розміром частинок 2–10 мм (переважно довжиною ~5 мм і товщиною до 1 мм), побічний продукт деревообробки. Вологість стружки перед використанням < 8 %. Для підвищення однорідності, частину стружки подрібнювали до тирси (розмір < 1 мм) у співвідношенні приблизно 70 % крупної і 30 % дрібної фракції. Насипна густина вихідного заповнювача ~150 кг/м³. Хімічну обробку стружки не здійснювали, але для видалення екстрактивних речовин її вимочували 2 год у розчині борної кислоти (3 %) з наступним сушінням. Це мало покращити адгезію казеїну до деревини та загальну біостійкість композита.

Методика формування зразків. В'яжучий розчин змішували з деревною стружкою в різних співвідношеннях (від 100 до 250 мас. ч. сухої стружки на 100 мас. ч. сухого казеїну) для пошуку оптимальної рецептури. Змішували в планетарному міксері за температури 30 °C протягом 10 хв, щоб відбулося повне обволікання частинок деревини клеєм. Отриману вологу суміш витримували 15 хв для часткового гелеутворення (початку схоплення казеїну). Формування зразків здійснювали методом пресування у металевих формах розміром 50×50×50 мм (для випробувань на стиск) і 40×40×160 мм (балочки для вигину) під тиском 5 МПа. Пресування відбувалося у два етапи: холодне попереднє пресування до видалення надлишку води, далі термічне пресування за температури 120 °C протягом 1 год (що імітує процес гарячого пресування, як у виробництві деревних плит). Після виймання з форми зразки додатково підсушували за температури 80 °C протягом 24 год до постійної маси. Отримані зразки – це твердий біокомпозит у формі цеглинок/брусків світло-коричневого кольору, де деревні частинки рівномірно розподілені в білковій матриці. На рис. 1 подано схематичний зразок матеріалу (структура поверхні), що демонструє нерегулярне розміщення стружки у клейовій масі.

Випробування властивостей. Густину зразків визначали розрахунком за масою і об'ємом після висушування (ГОСТ 29050 / ДСТУ EN 323). Міцність на стиск вимірювали на гідравлічному пресі відповідно до ГОСТ 8462 (аналог EN 772-1 для цегли) – зразки 50×50×50 мм стискали до руйнування, фіксували максимальне напруження. Міцність на вигин визначали на балочках 40×40×160 мм (аналогічно до випробування будівельного гіпсу, триточковий вигин, база 100 мм). Водопоглинання (WA) визначали шляхом занурення зразків у воду на 24 год за температури 20 °C з наступним зважуванням (ДСТУ В В.2.7-170 / EN 317). За зміною товщини призми 50×50×50 мм після замочування обчислювали товщинне набухання (TS). *Морозостійкість* оцінювали циклічним заморожуванням у водонасиченому стані: зразки насичували водою до повного насичення, далі заморожували за температури –20 °C на

4 год і відтавали у воді за температури +20 °С 4 год; таких циклів провели 25. Після циклу визначали залишкову міцність на стиск і масу зразків, порівнюючи з початковими (методика ДСТУ Б В.2.7-47 для цегли). *Термостійкість* (теплостійкість) оцінювали нагріванням зразків у сушильній шафі до температур 100 °С, 150 °С, 200 °С (витримка 2 год) із наступним охолодженням; після кожного нагріву випробували на міцність для стиску, що дало змогу виявити втрату міцності внаслідок термічного розкладу органічного в'яжучого. Також якісно спостерігали горючість матеріалу: зразки підпалювали відкритим полум'ям і спостерігали збереження горіння після усунення джерела вогню (відповідно до методики ДСТУ 4479 для визначення групи горючості).

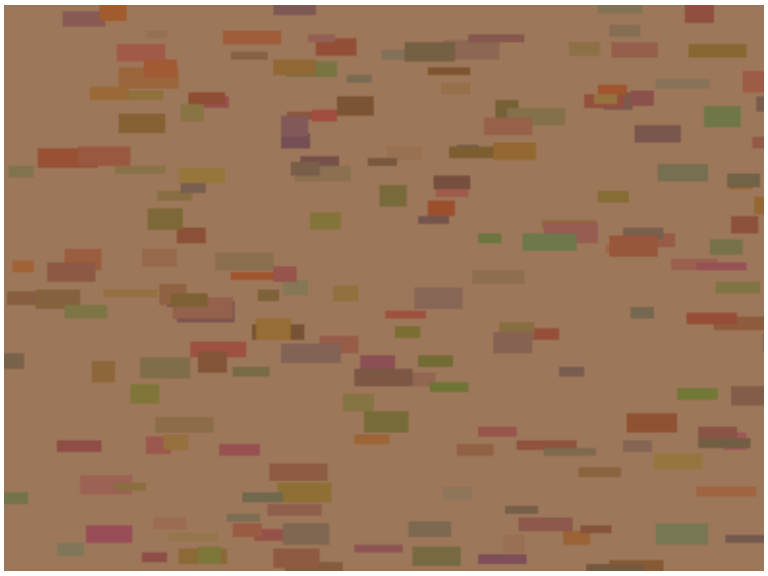


Рис. 1. Зовнішній вигляд біокомпозитного матеріалу
(імітація поверхні цегли з казеїнового клею та деревної стружки)

Результати досліджень та фізико-механічні характеристики матеріалу. Після оптимізації складу та режимів пресування було отримано зразки біокомпозитної цегли з різною густиною і відповідними міцнісними характеристиками. Узагальнені середні показники для матеріалу з оптимальним складом (вміст сухої стружки ~200 мас. ч. на 100 мас. ч. сухого казеїну, модифікований 15 % вапна, 5 % Na_2SiO_3 та 3 % H_3BO_3) наведені в таблиці (порівняно з аналогічними показниками деяких традиційних матеріалів).

Як видно з таблиці, новий біокомпозитний матеріал має густину близько 800–900 кг/м³, тобто майже вдвічі легший за керамічну цеглу. Міцність на стиск – приблизно 10–15 МПа, що вже відповідає маркам стінових блоків для мало- і середньоповерхового будівництва (наприклад пінобетонних або силікатних блоків). У лабораторних зразках малої величини досягнуто навіть 50 МПа, однак для цеглин стандартного розміру такий показник, імовірно, знизиться. Міцність на вигин біоцегли (~3–5 МПа) вища, ніж у керамічної цегли (зазвичай 2–4 МПа), що важливо для тріщиностійкості кладки.

Таблиця

Порівняння властивостей біокомпозитної казеїнової цегли
з деякими аналогами (середні значення)

Матеріал	**Густина, кг/м³**	**Міцність на стиск, МПа**	**Міцність на вигин, МПа**	**WA (24 год), %**	**TS (24 год), %**	**Морозо-стійкість, цикл**	**Тепло-стійкість, °C**	**Група горючості**
Казеїнова цегла (новий матеріал)	800–900	10–15 (до 50*)	~3–5	30–40	8–12	15–20 (умовно)	150 (деструкція за > 200)	Г2–Г3 (важко-горючий)
Деревно-стружкова плита (ДСП)	650	~5 (на стиск)	12–15 (на вигин)	50–80	15–25	–	< 120 (клей розм'якшення)	Г4 (горючий)
OSB-3 плита (вологостійка)	650	~6–10 (на стиск)	18–25 (на вигин)	15–30	10–15	–	< 150	Г4 (горючий)
Арболіт (деревобетон)	500–800	2.5–7.5	–	30–40	–	25–50	> 200 (мінеральне)	НГ (негорючий)
Керамічна цегла повнотіла	~1800	15–20	3–5	8–12	–	25–50	> 600	НГ (негорючий)

Примітка. 50 МПа – максимальне значення міцності на стиск, досягнуте в лабораторних зразках малого розміру за оптимального складу і гарячого пресування. У промислових зразках цегли очікувана міцність нижча через наявність технологічних дефектів і більші розміри.

Пористість і водостійкість. Водопоглинання біокомпозитної цегли склало ~30–40 % за масою після добового замочування. Це істотно вище, ніж у запечених глиняних чи цементних матеріалів (8–15 %), але порівняно з показниками ДСП без гідрофобізаторів. Товщинне набухання цегли після 24 год у воді – 8–12 %, що близько до рівня OSB та дещо краще, ніж у звичайних ДСП. Висока пористість деревного наповнювача забезпечує поглинання значної кількості вологи, тому без захисту від води матеріал не рекомендовано застосовувати у вологих умовах. Втім, завдяки введенню вапна і силікату натрію казеїнове в'яжуче набуває часткової водостійкості: після намочування та висушування міцність на стиск знизилася лише на ~20 %. Це свідчить, що клейова матриця не повністю руйнується водою. Для підвищення водостійкості можливе додаткове просочення готових цеглин гідрофобізаторами (натуральними оліфами, воском, кремнійорганічними складами).

Морозостійкість. Біоцегла, насичена водою, витримала в середньому 15–20 циклів заморожування-відтавання (до руйнування або 25 % втрати міцності). Це поки що невисокий показник (наприклад для зовнішньої цегли нормується F25–F50). Основна причина руйнування з заморожуванням – наявність відкритих пор

у деревині, що, заповнені водою, спричиняють розриви з її кристалізацією. Якщо запобігти насиченню водою, матеріал здатний витримати значно більше циклів. Отже, морозостійкість тісно пов'язана з водопоглинанням: необхідна гідрофобізація або захисне облицювання біоцегли для використання на відкритому повітрі. В іншому разі цей матеріал доцільно застосовувати у внутрішніх конструкціях або зовні тільки в регіонах без сильних морозів.

Термостійкість і горючість. Казеїново-деревний композит належить до помірно горючих матеріалів – за дії відкритого полум'я поверхня обвуглюється, але полум'я поширюється повільно і здебільшого самостійно згасає (група горючості Г2–Г3, за попередніми оцінками). Висока концентрація неорганічних речовин (вапна, борних сполук) сприяє утворенню захисного шару вуглецю та золи з нагріванням, що уповільнює горіння. Відомо, що казеїн містить фосфор і азот, тому може бути натуральним антипіреном, зменшуючи займистість полімерних композитів [3]. Термічна деструкція казеїнового клею починається за температури ~150–200 °C, супроводжуючись зменшенням міцності. Проведені випробування показали, що після нагрівання до 150 °C міцність біоцегли знизилася на ~30 %, а за температури 200 °C зразки втратили цілісність (обвуглювання деревини, розшарування клею). Отже, максимальна робоча температура для такого матеріалу – близько 120 °C (вище вже відбувається деградація). Це обмежує використання в умовах високих температур; однак для звичайних будівельних умов (–30…+50 °C) термостійкості цілком достатньо. Слід зазначити, що, на відміну від термопластичних смол, казеїновий клей з нагріванням не плавиться, а обвуглюється, тому не виділяє токсичних димів, як, скажімо, пінопласти або деякі пластики.

Структура та особливості матеріалу. Мікроскопічне спостереження структури біоцегли показало, що деревні частинки рівномірно вкриті клеєм і утворюють із ним міцні контакти. Вапно, присутнє в складі клею, імовірно, взаємодіє з фенольними гідроксилами лігніну деревини, сприяючи адгезії (ефект дублення вапном). Крім того, вапно реагує з казеїном, утворюючи казеїнат кальцію, який є нерозчинним у воді, – цим пояснено відносно низьке набухання і те, що після висушування міцність майже відновлюється. Борна кислота виконала подвійну функцію: як антисептик, що пригнічує грибок і бактерії в деревині (важливо для біостійкості матеріалу) і антипірен (підвищує вогнестійкість, оскільки бор утворює пригоряння з утворенням склоподібних плівок).

Механізм руйнування біокомпозита на стиск нагадує руйнування деревини: спочатку відбувається ущільнення пор, потім виникають тріщини вздовж межі розподілу «частинка деревини – клей». Однак за рахунок еластичності органічної матриці композит здатний до деформації без миттєвого крихкого руйнування. Спостерігали, що зразки з більшим вмістом дрібної стружки мають більш однорідну структуру і вищу міцність (до 50 МПа), але надлишок клею (надто низький вміст наповнювача) веде до утворення порожнин з висиханням і зниження міцності. Отже, існує оптимум наповнення: приблизно 2–2,2 частини деревини на 1 частину клею (за масою сухих речовин). Це узгоджено з даними авторів роботи [1], які зазначали різке зростання міцності зі збільшенням наповнювача з 200 до 210 ч. і появу мікротріщин – 220–230 ч. наповнювача.

Порівняння з аналогами. Новий матеріал вигідно вирізняється тим, що виготовлений із відновлюваної сировини і не містить синтетичних летких речовин (формальдегіду, фенолу тощо). Він легкий, що знижує навантаження на фундамент і спрощує монтаж. За теплозахистом біоцегла краща за керамічну: завдяки пористості деревини її коефіцієнт теплопровідності

оцінюють як ~0,1–0,15 Вт/(м·К), тоді як у звичайної цегли ~0,6–0,7 Вт/(м·К). Отже, стіна з біоцегли матиме менші тепловтрати. З іншого боку, недоліком є горючість – матеріал належить до горючих (хоч і не підтримує активно горіння), тому в конструкціях, що потребують негорючих матеріалів (шахти, перегородки протипожежні), його застосовувати не можна без спеціального захисту. За показниками міцності та морозостійкості біокомпозит поки трохи поступається традиційним цеглам, але перевищує такі матеріали, як арболіт і деякі види легких бетонів.

На рис. 2 наведено приклад гнучкості та міцності тонкого зразка на казеїновому в'яжучому: панель витримує вагу людини, практично не ламаючись (демонстрація з проєкту Fraunhofer WKI «SuperWood»). Це підтверджує потенціал казеїнових композитів як конструкційних матеріалів з належним підбиранням структури.

Рис. 2. Демонстрація міцності пластини з деревного композита на казеїновому клеї товщиною 15 мм (за даними проєкту «Superwood»)

Висновки

1. Реалізовано концепцію біокомпозитної цегли на основі природного казеїнового клею та деревної стружки. Отриманий матеріал має густину 800– 900 кг/м³, що забезпечує полегшення конструкцій і хороші теплоізоляційні властивості порівняно з традиційною цеглою.

2. Міцність матеріалу на стиск досягає 10–15 МПа (в окремих дрібних зразках до 50 МПа), на вигин – 3–5 МПа, що відповідає вимогам до стінових блоків невисоких будівель. За рахунок еластичності білкової матриці композит має псевдопластичну поведінку та підвищену тріщиностійкість.

3. Водостійкість казеїнового композита без додаткової гідрофобізації є обмеженою: водопоглинання ~40 % може призвести до зниження міцності та пошкоджень з замерзанням. Введення мінеральних добавок (вапна, борної кислоти, рідкого скла) зменшує набухання (TS ~10 %) і дає змогу зберегти до 80 % міцності після висихання зразків, але для зовнішнього застосування рекомендований захист від вологи.

4. Морозостійкість матеріалу в насиченому водою стані склала ~F15, що

недостатньо для зовнішніх стін у холодному кліматі. У ненасиченому стані матеріал не має пошкоджень за дії низьких температур, тому запорукою морозостійкості є запобігання проникненню води в пори. Необхідні додаткові заходи (гідрофобізація, облицювання) для експлуатації біоцегли зовні в умовах циклічного заморожування – відтавання.

5. Термостійкість і вогнестійкість біоцегли є задовільними для внутрішніх конструкцій: матеріал витримує нагрів до ~120–150 °C без критичного руйнування, не підтримує відкрите горіння (самозагасаючий), проте за тривалої дії високих температур органічна складова вигорає. Клас вогнестійкості можна підвищити застосуванням вогнезахисних просочень або облицювань.

6. Перспективи застосування: розроблений біокомпозит доцільно використовувати як стіновий матеріал у малоповерховому будівництві, особливо для екологічних будинків, внутрішніх перегородок, утеплювальних конструкцій. Він може знайти застосування зі зведенням екоспоруд, тимчасових будівель, а також як конструкційний елемент інтер'єру (наприклад декоративні екопанелі). Для широкого впровадження необхідно вирішити питання довговічності в умовах вологи та оптимізації технологічного процесу (прискорення твердіння казеїнового клею, можливо, шляхом введення каталізаторів чи використання мікрохвильового сушіння).

7. Уперше комплексно досліджено матеріал на основі казеїнового в'яжучого у формі будівельної цегли, наведено порівняння з традиційними матеріалами. Показано принципову можливість заміни синтетичних смол біополімерним клеєм у великорозмірному стіновому матеріалі. Отримані результати сприятимуть розвитку технологій екологічно чистих будівельних матеріалів із поновлюваної сировини.

Список використаних джерел

1. Формування високонаповнених біокомпозитних матеріалів на основі модифікованих матриць природного походження: монографія / В. П. Кашицький та ін. Луцьк: Луцький НТУ, 2021. 184 с.

2. Urstöger J., Kain G., Prändl F., Barbu M. C., Kristak L. Physical-Mechanical Properties of Light Bark Boards Bound with Casein Adhesives. *Sustainability*. 2023. 15(18):13530. https://doi.org/10.3390/su151813530.

3. Schwartzenbrunner R., Barbu M. C., Petutschnigg A., Tudor E. M. Water-Resistant Casein-Based Adhesives for Veneer Bonding in Biodegradable Ski Cores. *Polymers*. 2020. 12(8). 1745. https://doi.org/10.3390/polym12081745.

4. Uddin M., Kiviranta K., Suvanto S., Alvila L., Leskinen J., Lappalainen R., Haapala A. Casein-magnesium composite as an intumescent fire retardant coating for wood. *Fire Safety Journal* (2020). doi: https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2019.102943.

5. ДСТУ EN 317:2005. Плити деревностружкові та волокнисті. Визначення ступеня набухання після перебування у воді.

6. ДСТУ Б В.2.7-47-96. Будівельні матеріали. Методи визначення морозостійкості. Чинний від 1996-11-01. 15 с.

7. ДСТУ 4479:2005. Речовини вогнезахисні водорозчинні для деревини. Загальні технічні вимоги та методи випробування. Чинний 2005-11-25.

8. Press Release: Superwood – Recyclable wood-fiber panels with casein binder, Fraunhofer WKI (22.03.2022). URL: https://www.wki.fraunhofer.de/en/press-media/2022/PI_2022-02_superwood-recycling-casein-wood-fiber-panel.html.

9. Pizzi A. Wood Adhesives: Chemistry and Technology. CRC Press, 2nd ed. 2015. 432 p.
10. Клімов Є. М., Солоха В. А. Клеї для деревини: огляд екологічних аспектів. *Вісник НУЛП*. 2020. 25(3).
11. ГОСТ 8462-85. Кирпич и камни керамические. Методы испытаний на сжатие и изгиб. Действующий от 1985-01-18. 5 с.
12. EN 310:1993. Wood-based panels – Determination of modulus of elasticity in bending and of bending strength. 13 p. URL: https://zjz.njfu.edu.cn/DFS//file/2022/07/20/ 20220720174753430vatkga.pdf.
13. EN 319:1993. Particleboards and fiberboards – Determination of tensile strength perpendicular to the plane of the board. Publishe 26-Feb-1993.

Андрух Сергій Леонідович, кандидат технічних наук, доцент кафедри архітектури та інженерних вишукувань, Сумський національний аграрний університет. ORCID iD: 0000-0001-5041-885X. Тел.: +38 (050) 997-27-58. E-mail: sl_a@ukr.net.
Сопов Віктор Петрович, доктор технічних наук, професор кафедри архітектури та інженерних вишукувань, Сумський національний аграрний університет. ORCID iD: 0000-0002-1908-0421. Тел.: +49 (171) 927-62-77. E-mail: vsopov@ukr.net.

Andrukh Serhii, PhD (Tech). Associate Professor, department of Architecture and Engineering Surveys of Sumy National Agrarian University ORCID iD: 0000-0001-5041-885X. Tel.: +38 (050) 997-27-58. E-mail: sl_a@ukr.net.
Sopov Viktor, Dr. Sc. (Tech.), professor, department of Architecture and Engineering Surveys of Sumy National Agrarian University ORCID iD: 0000-0002-1908-0421. Tel.: +49 (171) 927-62-77. E-mail: vsopov@ukr.net.

Статтю прийнято 19.05.2025 р.

УДК 624.05

ЗАСТОСУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ТОРКРЕТУВАННЯ ДЛЯ РЕМОНТУ І РЕКОНСТРУКЦІЇ ПІДЗЕМНИХ СПОРУД

Кандидати техн. наук А. О. Атинян, М. Н. Джалалов, Р. Б. Ткаченко, О. М. Пустовойтова, Є. Ф. Орел

APPLICATION OF SHOTCRETE TECHNOLOGY IN THE REPAIR AND RECONSTRUCTION OF UNDERGROUND STRUCTURES

PhD (Tech.) A. Atynian, PhD (Tech.) M. Dzhalalov, PhD (Tech.) R. Tkachenko, PhD (Tech.) O. Pustovoitova, PhD (Tech.) Y. Orel

DOI: https://doi.org/10.18664/1994-7852.212.2025.336325

Анотація. *У статті всебічно досліджено особливості застосування технології торкретування для ремонту і реконструкції підземних споруд. Проаналізовано сучасні матеріали, методи нанесення торкрет-бетону, їхні технічні характеристики, переваги та недоліки. Розглянуто практичний досвід використання торкретування в умовах різного ґрунтового середовища та гідрогеологічних факторів. Особливу увагу приділено ефективності технології для зміцнення конструкцій і продовження строку їхньої експлуатації.*

***Ключові слова**: торкретування, підземні споруди, реконструкція, ремонт, торкрет-бетон.*

***Abstract.** The article explores shotcrete technology as one of the leading methods for restoration, reinforcement, and waterproofing of underground structures with various purposes. Special attention is paid to the analysis of this method's application features during the repair and reconstruction of structures exposed to moisture, aggressive environments, or significant damage. The physical-mechanical properties of shotcrete, including its adhesion to the substrate, crack resistance, and durability under challenging operational conditions, are examined.*

The study provides a detailed analysis of modern materials used in shotcreting, such as dry and wet mixtures, polymer-modified compositions, reinforcing fibers, and admixtures that enhance wear resistance and coating strength. A comparative evaluation of shotcrete application methods—dry and wet processes—is presented, highlighting their structural differences, efficiency, optimal use cases, advantages, and limitations. Emphasis is placed on surface preparation requirements, the technological sequence of mixture application, safety measures during work, and the impact of human factors on the final coating quality.

A dedicated section of the article showcases practical applications of shotcreting in underground infrastructure projects, including tunnels, mines, utility conduits, pedestrian underpasses, and subway stations. Specific case studies from domestic and international practice demonstrate the technology's effectiveness in real-world conditions. Challenges encountered during shotcrete-based projects and potential solutions are analyzed. In conclusion, the article underscores the promising prospects for further development and refinement of shotcrete technology in modern underground construction and engineering structure rehabilitation.

***Keywords:** shotcreting, underground structures, reconstruction, repair, shotcrete or sprayed concrete.*

Вступ. Забезпечення тривалої експлуатаційної надійності підземних споруд є актуальною науково-технічною проблемою в умовах зростаючих вимог до інфраструктурних об'єктів. Значна частина тунелів, колекторів та інших підземних конструкцій в Україні була збудована в минулому столітті й потребує суттєвого оновлення. Процеси корозії, вилуговування, руйнування бетону та інші деградаційні явища призводять до зниження несучої здатності та зростання ризиків аварійних ситуацій. За таких умов технологія торкретування стає одним із найефективніших методів відновлення та підсилення підземних споруд, за допомогою якої можна створювати міцне, водонепроникне покриття, що здатне витримувати значні навантаження, у тому числі в складних гідрогеологічних умовах.

У світовій практиці підземного будівництва торкретування активно використовують понад 100 років, проте в Україні ця технологія набула поширення лише в останнє десятиліття, особливо з початком реалізації масштабних інфраструктурних проєктів. Незважаючи на очевидні переваги, застосування торкрет-бетону супроводжується рядом технологічних викликів, пов'язаних із забезпеченням якості робіт, правильним вибором складу суміші та врахуванням специфіки підземних умов. Тому дослідження сучасних підходів для використання цієї технології для ремонту та реконструкції підземних об'єктів є важливим науково-практичним завданням [1, с. 24].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблеми застосування торкрет-бетону для будівництва та ремонту підземних споруд досліджували багато вітчизняних і зарубіжних учених. Значний внесок у розвиток технології торкретування

зробили українські науковці, зокрема Гайко Г. І., який у своїх працях детально розглянув питання конструкцій кріплення підземних споруд із використанням торкрет-бетону [2, с. 67]. Важливі аспекти технології нанесення торкрет-бетону в тунелях висвітлено в методичних розробках компанії «Інтербудтехніка» [1, с. 31].

Значну увагу в сучасних дослідженнях приділяють удосконаленню складів торкрет-бетону з метою підвищення їхніх міцнісних характеристик, довговічності та технологічності. Зокрема, розробки концерну BASF, що були використані для будівництва Бескидського тунелю в Україні, демонструють ефективність застосування сучасних хімічних добавок у складі торкрет-сумішей [4, с. 3].

Аналіз спеціальної літератури показав, що наявні дослідження здебільшого зосереджені на технічних аспектах виконання торкретування, проте питання комплексного підходу для вибору технології залежно від стану підземної споруди та умов її експлуатації залишаються недостатньо вивченими. Крім того, потребує систематизації досвід застосування торкретування для ремонту специфічних типів підземних об'єктів, зокрема шахтних стволів, колекторів і комунікаційних тунелів [3, с. 15].

Визначення мети та завдання дослідження. Метою дослідження є аналіз сучасних підходів для застосування технології торкретування для ремонту і реконструкції різних типів підземних споруд і розроблення рекомендацій щодо вибору оптимальних матеріалів і методів виконання робіт залежно від типу конструкції та умов експлуатації.

Основна частина дослідження. Торкретування є процесом нанесення на поверхню бетонної або розчинної суміші під тиском стисненого повітря. За допомогою цієї технології можна створювати монолітні конструкції складної форми на сучасній основі, забезпечуючи високу адгезію до неї. Для ремонту підземних споруд торкрет-бетон виконує різні функції: відновлення геометричних розмірів конструкції, підвищення несучої здатності, забезпечення водонепроникності, захист від корозії тощо. Аналізуючи практику застосування торкретування, можна виділити два основних методи нанесення суміші: сухий і мокрий, кожен із яких має свої особливості.

За сухого методу суху суміш подають по шлангу за допомогою стисненого повітря до сопла, де вона змішується з водою безпосередньо перед нанесенням на поверхню (рис. 1). Основною перевагою цього методу є можливість транспортування суміші на значні відстані (до 300 м по горизонталі та 100 м по вертикалі), що особливо важливо в умовах складної конфігурації підземних споруд. Окрім того, за сухого методу забезпечена висока щільність і міцність покриття, а обладнання можна легко очистити після закінчення робіт. До недоліків слід віднести значний відскок матеріалу (до 25-30 %), високе пилоутворення та складність контролю водоцементного співвідношення [2, с. 73].

Мокрий метод передбачає подавання по шлангу вже готової бетонної суміші, що забезпечує більш точне дозування компонентів і зниження відскоку до 5-10 %, за допомогою чого можна досягати вищої продуктивності (до 20 м³/год) порівняно з сухим (4-6 м³/год), а також забезпечує кращі умови праці через нижче пилоутворення (рис. 2). Проте мокрий метод має обмеження щодо дальності транспортування суміші (до 100 м по горизонталі), потрібне більш складне обладнання та ретельне його очищення після використання [1, с. 42].

Вибір методу торкретування залежить від конкретних умов виконання робіт. Для ремонту локальних пошкоджень у важкодоступних місцях раціональнішим є сухий метод, тоді як для масштабних робіт із підсилення конструкцій доцільно застосовувати мокрий метод, який забезпечує вищу однорідність покриття і продуктивність.

Важливим аспектом технології є склад торкрет-бетону, який має забезпечувати необхідні експлуатаційні характеристики покриття. Для підземних споруд, експлуатованих в умовах постійного впливу вологи та агресивних середовищ, особливе значення має водонепроникність і корозійна стійкість торкрет-бетону. Досягнення цих властивостей можливе за рахунок використання спеціальних добавок: пластифікаторів, прискорювачів тужавлення, добавок, що ущільнюють структуру бетону, тощо [4, с. 5].

Рис. 1. Схема процесу торкретування сухим методом

Рис 2. Торкретування тунелю установкою АС-1 Компанії «ТОРНАДО»

Сучасні склади торкрет-бетону, застосовувані для ремонту тунелів та інших підземних споруд, часто включають мікрокремнезем (5-10 % маси цементу), який суттєво підвищує міцність і водонепроникність матеріалу. Для запобігання утворенню тріщин і підвищення ударної в'язкості в торкрет-бетон вводять сталеві або поліпропіленові фібри в кількості 30-70 кг/м³. Таке армування дає змогу відмовитися від встановлення металевої сітки або суттєво зменшити її діаметр, що спрощує технологію виконання робіт у стиснених умовах підземних споруд

[2, с. 89]. В Україні поширене використання торкрет-сумішей і добавок компанії Sika, які містять надзвичайно дисперсний (близько 0,1 мкм) аморфний, латентно гідравлічно активний діоксид кремнію. Введення цієї добавки сприяє істотному підвищенню внутрішньої когезії та водоутримувальної здатності бетонної суміші, що зумовлено високою питомою поверхнею та здатністю до інтенсивної взаємодії з гідратними фазами цементу.

На особливу увагу заслуговує досвід застосування торкретування для ремонту транспортних тунелів, де важливим фактором є мінімізація часу виведення споруди з експлуатації. У таких випадках ефективним рішенням є використання швидкотверднучих сумішей із прискорювачами тужавлення, що дає змогу досягти міцності 15-20 МПа вже через 3-6 год після нанесення і відновити рух транспорту в найкоротші терміни [4, с. 8].

У разі реконструкції гідротехнічних тунелів і колекторів, де основною проблемою є забезпечення водонепроникності, застосовують двошарове торкретування: спочатку наносять вирівнюючий шар товщиною 30-50 мм, а після його тужавлення – гідроізоляційний шар із підвищеним вмістом гідрофобних добавок. За такої технології можна забезпечити надійний захист конструкції від фільтрації ґрунтових вод [3, 5].

Важливим етапом торкретування є підготовка поверхні, яка включає очищення від слабкого бетону, продуктів корозії, мастил та інших забруднень. За значних нерівностей виконують вирівнювання поверхні шляхом нанесення додаткового шару торкрет-бетону (рис. 3). Для забезпечення високої адгезії між основою і торкрет-бетоном поверхню зволожують, але не допускають утворення водяної плівки [1, 6].

Рис. 3. Етапи підготовки поверхні для торкретування

Для ремонту підземних споруд із найменшим перерізом (колектори, каналізаційні труби) ефективним є застосування торкрет-роботів, що дає змогу механізувати процес нанесення суміші та забезпечити рівномірну товщину покриття. Такі системи обладнані лазерними датчиками, що контролюють відстань до поверхні та корегують подавання матеріалу, що особливо важливо для відновлення складних криволінійних поверхонь [4, 7].

Ремонтуючи відповідальні підземні споруди, для контролю якості торкрет-бетону застосовують комплекс випробувань, що включає визначення міцності на стиск, адгезії до основи,

водонепроникності та морозостійкості. Крім того, важливим показником є відсутність тріщин і відшарувань, що перевіряють візуально та простукуванням поверхні [2, 8].

Досвід застосування технології торкретування для реконструкції Бескидського тунелю в Україні демонструє високу ефективність цього методу. Для нанесення торкрет-бетону були використані сучасні матеріали концерну BASF, що дало змогу створити водонепроникне покриття з високою міцністю і стійкістю до впливу агресивних середовищ. Загальний об'єм виконаних робіт склав понад 5000 м³ торкрет-бетону, що було нанесено на площу близько 43000 м² [4, 9].

Аналогічний підхід був застосований для ремонту колекторних тунелів у Києві, де основною проблемою була корозія бетону внаслідок впливу агресивних газів, утворюваних у результаті гниття органічних речовин. Для відновлення несучої здатності конструкцій був використаний сульфатостійкий торкрет-бетон із додаванням інгібіторів корозії, що дало змогу суттєво продовжити термін експлуатації споруд [3, 10].

Цікавим прикладом є застосування торкретування для ремонту шахтних стволів, де роботи виконують в умовах обмеженого простору та складного доступу (рис. 4). У таких випадках ефективним є використання легких мобільних торкрет-установок, що можуть бути розміщені на підвісних полках. Для забезпечення безпеки робіт торкрет-бетон наносять зверху вниз із послідовним нарощуванням товщини покриття [2, 11].

Рис. 4. Торкретування вертикальної поверхні шахтного ствола

Реконструюючи старі тунелі, збудовані з цегли або природного каменю, торкретуванням можна не тільки відновити несучу здатність конструкції, але й захистити її від подальшого руйнування. У таких випадках перед нанесенням торкрет-бетону виконують ін'єктування тріщин і порожнин спеціальними розчинами на основі цементу або епоксидних смол, що забезпечує монолітність конструкції [1, 12].

Значний прогрес у технології торкретування пов'язаний із розробленням нових типів прискорювачів тужавлення на основі алюмінатів, що не містять лугів. З такими добавками можна досягти високої ранньої міцності без негативного впливу на кінцеву міцність торкрет-бетону, що особливо важливо для ремонту тунелів із високими динамічними навантаженнями [4, 13].

Для підвищення довговічності підземних споруд, експлуатованих в умовах підвищеної вологості та температурних коливань, ефективним є використання

полімерцементних торкрет-бетонів, модифікованих акриловими або стирол-бутадієновими добавками. Такі матеріали мають підвищену еластичність, що запобігає утворенню тріщин за деформацій основи [3, 14].

Висновки. На основі проведеного дослідження можна зробити такі висновки:

1. Технологія торкретування є ефективним методом ремонту і реконструкції підземних споруд різного призначення, що забезпечує відновлення несучої здатності, водонепроникності та довговічності конструкцій.

2. Вибір методу торкретування (сухого чи мокрого) залежить від конкретних умов виконання робіт, обсягу ремонту і доступності об'єкта. Сухий метод більш універсальний щодо логістики, проте мокрий забезпечує вищу якість покриття і меншу кількість відходів.

3. Для підвищення експлуатаційних характеристик торкрет-бетону доцільно використовувати модифікуючі добавки (мікрокремнезем, полімери, фібру), щоб забезпечити необхідні властивості матеріалу залежно від умов експлуатації підземної споруди.

4. Якість торкретування суттєво залежить від підготовки поверхні, правильного вибору складу суміші та дотримання технології нанесення, що потребує високої кваліфікації персоналу та застосування сучасного обладнання.

5. Перспективним напрямом розвитку технології є створення автоматизованих систем нанесення торкрет-бетону, що дасть змогу підвищити якість робіт і розширити сферу застосування методу для ремонту підземних споруд зі складною конфігурацією.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на розроблення нових складів торкрет-бетону з підвищеною стійкістю до агресивних середовищ і удосконалення методів контролю якості покриття в умовах обмеженого доступу до конструкцій підземних споруд.

Список використаних джерел

1. Тренінг з технології нанесення торкрет-бетону в тунелі. URL: https://interbudtechnica.com.ua/treniing-z-tehnologiiyi-nanesennya-torkret-betonu-v-tunelii.html (дата звернення: 05.04.2023).

2. Гайко Г. І. Будівельні матеріали і конструкції підземних споруд: Конструкції кріплення: навч. посіб. для студ. спец. 184 «Гірництво». Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. 134 с.

3. Торкретування. URL: https://www.alpdnepr.com.ua/torkretuvannya.php (дата звернення: 05.04.2023).

4. Інноваційні розробки концерну BASF, використані при будівництві Бескидського тунелю. Прес-реліз. URL: http://surl.li/gixsz (дата звернення: 05.04.2023).

5. DBN B.2.3-6: 2009. Transport facilities. Bridges and pipes. Inspection and testing.

6. Atynian Armen, Makhmudzhan Dzhalalov, Svitlana Butnik, Roman Tkachenko, Inna Hovorukha. Improvement of technology of production of crushed stone-mastic asphalt concrete mixture by adding reinforcing additives. *Veda a perpektivy*. 2024. № 6 (37). Czech Republic.2.

7. Ana Cuesta, SciProfiles, Alejandro Morales, Angeles G. De la Torre and Miguel A. G. Aranda. Recent Advances in C-S-H Nucleation Seeding for Improving Cement Performances. *Journal: Materials*. 2023. Vol. 16. No 1462. P. 24-34.

8. Sharma M., Bishnoi S., Martirena F., Scrivener K. Limestone calcined clay cement and concrete: A state-of-the-art review. *Cem. Concr. Res*. 2021. 149. 106564.

9. Accelerators. In Science and Technology of Concrete Admixtures / Aiticin P. C., Flatt R. J. eds. *Elsevier: Amsterdam, The Netherlands*. 2016. P. 405–413.

10. Methodical instructions for practical classes and independent work of students 'Fundamentals of flow organisation of construction' for students of training direction 6.060101 'Industrial and civil engineering' full-time and part-time / Compiled by: V. V. Saviovskyi, S. V. Butnik, M. I. Kotlyar. Kharkiv: KNUBA, 2014. 24 p.

11. Атинян А. О. Досвід використання ПрАТ «Альпсервіс» новітніх матеріалів на прикладі відновлювального ремонту опорних конструкцій мосту через ріку Лопань. *І Міжн. наук.-практ. конф. ім. П. М. Коваля «Актуальні питання мостового господарства та шляхи його покращення».* Запоріжжя, 2021. С. 91-93.

12. Armen Atynian, Svitlana Bratishko, Svitlana Butnik, Anna Zhyhlo, Volodymyr Buhaevskyi. Use of carbon composites in repair of overpasses and bridges. DOI: https://doi.org/10.52058/2695-1592-2024-8(39)-213-22511a4/16/3X100=23.

13. Atynyan A., Baranov P., Kotlyar I. (2020) Photography as an effective means of field inspection of abandoned buildings. *Proceedings of the International Scientific and Practical Conference «Trends and tendencies in the development of the construction industry»*. Kharkiv. P. 92-93.

14. Grigorovsky P. Organisational and technological principles of determining the parameters of buildings, structures and territories of development by instrumental methods: thesis of Doctor of Technical Sciences: 05.23.08, Kharkiv, 2015. 45 p.

Атинян Армен Овікович, кандидат технічних наук, доцент кафедри технології та організації будівельного виробництва, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова. ORCID iD: 0000-0002-6667-6869. Тел.: +380993584440. E-mail: Armen.Atynyan@kname.edu.ua.
Джалалов Махмуджан Нажимович, кандидат технічних наук, доцент кафедри технології та організації будівельного виробництва, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова. ORCID iD: 0000-0002-6636-8700. Тел.: +380993584440. E-mail: makhmudzhan.dzhalalov@kname.edu.ua.
Ткаченко Роман Борисович, кандидат технічних наук, доцент кафедри теплогазопостачання і вентиляції, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова. ORCID iD: 0000-0003-3899-1826. Тел.: +380993584440. E-mail: Roman.Tkachenko@kname.edu.ua.
Пустовойтова Оксана Михайлівна, кандидат технічних наук, доцент кафедри комп'ютерної графіки, Харківський національний автомобільно-дорожній університет. ORCID iD: 0009-0003-4774-6686. Тел.: +38 (096) 417-89-48. E-mail: : oksana_pustov@ukr.net.
Орел Євген Федорович, кандидат технічних наук, доцент кафедри вишукувань та проектування шляхів сполучення, геодезії та землеустрою, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна. ORCID iD: 0000-0002-6261-1558. Тел.: +38 (057) 730-19-21. E-mail: orel_fisherman@ukr.net.

Atynian Armen, PhD (Tech). Associate Professor, department of Technology and Organisation of Construction Production, O. M. Beketov National University of Urban Economy. ORCID iD: 0000-0002-6667-6869. Тел.: +380993584440. E-mail: Armen.Atynyan@kname.edu.ua.
Dzhalalov Makhmudzhan, PhD (Tech). Associate Professor, department of Technology and Organisation of Construction Production, O. M. Beketov National University of Urban Economy. ORCID iD: 0000-0002-6667-6869. Тел.: +380993584440. E-mail: makhmudzhan.dzhalalov@kname.edu.ua.
Roman Tkachenko, PhD (Tech). Associate Professor, Department of Heat and gas supply and ventilation. O. M. Beketov National University of Urban Economy. ORCID iD: 0000-0003-3899-1826. Тел.: +380993584440. E-mail: Roman.Tkachenko@kname.edu.ua.
Pustovoitova Oksana, Department of Computer Graphics, Kharkov National Automobile and Highway University. ORCID iD: 0009-0003-4774-6686. Тел.: +38 (096) 417-89-48. E-mail: oksana_pustov@ukr.net.
Orel Yevhen, PhD (Tech). Associate Professor, Department of Research and designing of communication, geodesy and land management, Ukrainian State University of Railway Transport in Kharkiv, Feuerbach square 7, 61001, Kharkiv, Ukraine. Tel.: (057) 730-19-21. E-mail: orel_fisherman@ukr.net. ORCID ID: 0000-0002-6261-1558.

Статтю прийнято 24.05.2025 р.

УДК 662.9

ВПРОВАДЖЕННЯ ТЕПЛОНАСОСНОГО ОБЛАДНАННЯ В СИСТЕМАХ ВЕНТИЛЯЦІЇ БУДІВЕЛЬ ЗАКЛАДІВ ОХОРОНИ ЗДОРОВ'Я З МЕТОЮ ЗНИЖЕННЯ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ

Кандидати техн. наук, Ю. О. Півненко, Ю. О. Бурда, Ю. І. Чайка, Р. Б. Ткаченко, д-р техн. наук І. О. Редько

ANALYSIS OF THE DEPENDENCE OF NAPHTHALENE CONTENT IN COKE OVEN GAS ON TEMPERATURE AND PRESSURE

PhD (Tech.) Y. O. Pivnenko, PhD (Tech.) Y. O. Burda, PhD (Tech.) Y. I. Chaika, PhD (Tech.) R. B. Tkachenko, Dr. Sc. (Tech.) I. O. Redko

DOI: https://doi.org/10.18664/1994-7852.212.2025.336332

Анотація. *У статті розглянуто доцільність впровадження теплових насосів типу «повітря-вода» в системи вентиляції будівель закладів охорони здоров'я з метою зниження енергоспоживання. Зважаючи на обмеження ДБН В.2.2-10:2022 щодо застосування рекуператорів у приміщеннях із постійним перебуванням пацієнтів, автори досліджують альтернативний підхід для утилізації теплоти витяжного повітря. Проаналізовано реальні об'єкти: амбулаторія в м. Дергачі, лікарня в м. Ізюм Харківської області. Результати свідчать про енергетичну ефективність і потенціал широкого впровадження запропонованого рішення в медичних закладах.*

Ключові слова*: тепловий насос, вентиляція, енергоефективність, охорона здоров'я, утилізація тепла, витяжне повітря, опалення, припливне повітря, рекуперація, будівлі.*

Abstract. *This article investigates the possibility of integrating air-to-water heat pump systems into the ventilation infrastructure of healthcare facilities with the aim of reducing total energy consumption. Modern supply and exhaust ventilation systems often incorporate heat recovery units such as rotary or plate recuperators, which are effective in general construction practice. However, the Ukrainian national standard DBN B.2.2-10:2022 «Healthcare Facilities. General Provisions» restricts the use of such devices in rooms with permanent patient occupancy due to sanitary and epidemiological considerations. This regulatory constraint creates a challenge in designing energy-efficient ventilation systems for hospitals and outpatient clinics. In this context, the use of heat pump systems that extract thermal energy from exhaust air and transfer it to support space heating and preheating of supply air presents a viable alternative. The paper presents the analysis of three healthcare buildings located in Kharkiv region: an outpatient clinic in Derhachi and hospital in Izium. For each case, the feasibility of using exhaust air as a heat source for the heat pump is assessed, along with its contribution to reducing the building's overall heating demand. Technical and economic indicators are evaluated, and the advantages and limitations of such systems are discussed. The results demonstrate that, under certain conditions, heat pumps can ensure both compliance with hygienic standards and significant energy savings. The proposed approach contributes to the development of sustainable engineering solutions for modernizing healthcare infrastructure, especially in regions with moderate climates and high energy costs.*

Keywords: *heat pump, ventilation, energy efficiency, healthcare, heat recovery, exhaust air, heating, supply air, recuperation, buildings.*

Вступ. Сучасні системи припливно-витяжної вентиляції майже завжди обладнані системами утилізації тепла витяжного повітря із застосуванням

роторних або пластинчастих рекуператорів. Такі системи набули найбільшого розповсюдження з новим будівництвом, реконструкцією та капітальним ремонтом будівель різного призначення.

ДБН В.2.2-10:2022 «Заклади охорони здоров'я. Основні положення» є основним нормативним документом для проєктування і будівництва закладів охорони здоров'я. Так, пунктом 12.2.17 цього ДБН дозволено застосовувати пластинчасті та роторні рекуператори для окремих категорій приміщень, однак у приміщеннях із постійним перебуванням пацієнтів застосування подібних рекуператорів заборонено.

Втрати тепла з витяжним повітрям можуть бути найбільшими серед усіх видів тепловтрат будівлі закладу охорони здоров'я. У роботі буде розглянуто можливість застосування теплових насосів типу «повітря-вода» з використанням як утилізованого середовища витяжного повітря для забезпечення потреб системи опалення та нагрівання припливного повітря на прикладі об'єктів будівель амбулаторії в м. Дергачі, лікарні в м. Ізюм Харківської області.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасна література підтверджує перспективність використання теплових насосів (ТП) для енергоефективного опалення і вентиляції будівель. Так, у статті [1] автори досліджували повітряний тепловий насос «повітря–вода» LG Therma V і виявили, що його коефіцієнт трансформації COP залишається високим за помірного зниження зовнішньої температури (наприклад до –7 °C) і ефективно забезпечує низькотемпературні системи опалення (до ~55 °C на виході). Однак у медицинських закладах через жорсткі санітарні вимоги рекуперація теплоти у звичайних повітрообмінних системах обмежена.

В умовах пандемії дослідники звернули увагу на комбіновані рішення. У моделях Шибуоли й Тамбані змодельовані дві альтернативні системи вентиляції: «звичайний» рекуператор (HRV) і тепловий насос, що використовує витяжне повітря (EAHP). Система HEAHU (комбінація рекуператора і EAHP) продемонструвала значні енергозбереження: від 31 до 46 % за різних кліматичних умов порівняно з використанням тільки теплообмінника [2]. Навіть суто EAHP-система (без рекуператора) у помірному кліматі показала економію 2.5–48 % енергії. Висновок авторів – теплообмінники з додатковим тепловим насосом можуть істотно підвищити ефективність повітрообміну для високих кратностей вентиляції [2]. Суттєвим обмеженням цих робіт є те, що вони базовані на імітаційному моделюванні, без експериментального тестування в реальних умовах лікарень; зокрема, не розкрито питання фізичної ізоляції потоків повітря.

Широкомасштабне моделювання Аалтоського університету (Liu et al.) сфокусоване безпосередньо на лікарнях. Використано програму IDA ICE для імітації госпітальної будівлі у фінському кліматі. Дослідники оцінювали комбіновані системи: традиційні рунераунд-рекуператори разом із витяжним ТП (EAHP) і фотогальванічними панелями. За оптимальної конфігурації 71 % опалювального навантаження будівлі і 92 % навантаження на підігрів вентиляційного повітря покривало утилізоване тепло з вентиляції [3]. Порівнюючи з базовою схемою (ефективність рекуперації ~46 %), запропонована комбінація дала змогу зекономити до ~16.6 % життєвого циклу вартості системи [3]. Водночас автори визнають високу вартість впровадження технологій (особливо баків АКЕСТ та електродних систем), а оцінювання побічних аспектів (обслуговування, безвідмовність) залишається недостатнім.

Інші дослідження на міжсекторальному рівні демонструють великий потенціал теплових насосів. Наприклад, Meyer et al. змоделювали вплив переходу на аеротермальні ТП у містах Західної Європи. Для міста Тулуза автори

показують, що заміна частини газового/електричного опалення на повітряні ТП дає змогу скоротити енергоспоживання на опалення у два-три рази (на 57–76 %) [4]. У США NREL (CaraDonna) проаналізував теплові насоси у дахових кондиціонерах RTU. Впровадження роторних рекуператорів і ТП на витяжці для сучасних комерційних будівель дає ~9 % загальної економії енергії та подібне зменшення викидів CO_2 [5]. Ці роботи показують загальні вигоди ТП, але не враховують специфіку медичних об'єктів.

Нові інженерні рішення продемонстровані Liu S. et al., які запропонували компактний вентилятор з рекуперацією і петлею теплового насоса (тепловою трубою). Експеримент показав, що такий композитний пристрій у зимових умовах має EER ≈ 12.6 (і ≈ 4.8 влітку), значно перевищуючи звичайні системи [6]. Це рішення компенсує зниження ефективності простих вентиляційних рекуператорів у холодному кліматі і забезпечує суттєву економію (до 35 % в енергоспоживанні) [6]. Проте наведені результати отримані на прототипах і в лабораторних умовах; поки не описано інженерних викликів серійного виробництва та гігієнічної сертифікації таких систем.

Слід сказати і про нормативні обмеження. За ДБН В.2.2-10:2022 «Заклади охорони здоров'я», у палатах із постійним перебуванням пацієнтів використання повітряних рекуператорів заборонено; допустимі тільки роторні (або теплоутилізатори першої категорії) у допоміжних і адміністративних зонах [7]. Крім того, рекуперацію теплоти в системах із ТП дозволено лише за умови повного уникнення змішування припливного та витяжного повітря [7]. Ці норми суттєво звужують спектр технічних рішень для медичних будівель, і їх слід ураховувати, проєктуючи системи вентиляції з НР.

Незважаючи на перспективність вищезгаданих розробок, багато аспектів залишаються недостатньо вивченими. Перш за все необхідно більше емпіричних досліджень у реальних умовах лікарень: перевірки запропонованих систем ТП і рекуператорів на об'єктах з урахуванням санітарних вимог. Потрібні експерименти щодо ефективності очищення/фільтрації повітря та можливого перехресного забруднення з застосуванням ізольованих ТП-рекуператорів. Недостатньо вивчено питання оптимального управління гібридними вентиляційно-тепловими установками (регулювання теплового та повітряного потоку з урахуванням змінних навантажень і вимог до мікроклімату). Також бракує комплексних економічних оцінок і техніко-економічних моделей (з урахуванням «біоекономічного» ефекту і довгострокових інвестиційних витрат) [8, 9]. Важливо дослідити вплив повітряних ТП щодо надійності систем життєзабезпечення лікарень, зокрема, як резервувати теплоносій або живлення на випадок аварій. Отже, подальші дослідження мають бути мультидисциплінарними: поєднувати термодинаміку, санітарію і питання експлуатації.

Визначення мети та завдання дослідження. Метою дослідження є оцінювання доцільності та ефективності впровадження теплових насосів типу «повітря-вода» в системи вентиляції будівель закладів охорони здоров'я для зниження енергоспоживання. Дослідження сфокусовано на утилізації теплоти витяжного повітря як альтернативи традиційним рекуператорам, ураховуючи обмеження, встановлені ДБН В.2.2-10:2022, що забороняють їх використання в приміщеннях із постійним перебуванням пацієнтів.

Основні завдання дослідження:

1. Проаналізувати енергетичні характеристики сучасних систем вентиляції в будівлях закладів охорони здоров'я.

2. Дослідити технічну можливість інтеграції теплових насосів типу «повітря-вода» для утилізації теплоти витяжного повітря.

3. Проаналізувати реальні об'єкти: амбулаторії в м. Дергачі та лікарні в м. Ізюм Харківської області, оцінивши їхні теплові навантаження та витрати повітря.

4. Оцінити енергетичну ефективність запропонованого рішення на основі теоретичних розрахунків і моделювання.

5. Визначити технічні та економічні переваги і обмеження впровадження теплових насосів у медичних закладах.

Основна частина досліджень

У роботі розглянуто будівлі закладів охорони здоров'я, проаналізовано споживання теплової енергії, витрати витяжного повітря та кількість тепла у витяжному повітрі, що можна утилізувати.

У табл. 1, 2 наведені основні характеристики розглянутих будівель.

Таблиця 1

Характеристика будівлі Ізюмської лікарні

Будинок				Лікарня
Призначення				Будівля закладу охорони здоров'я
Поверховість, тип				Три поверхи
Площа опалювальна				3260,5
Розташування (температурна зона)				I температурна зона
Розрахункова температура внутрішнього повітря				22 °С
Розрахункова температура зовнішнього повітря				-23 °С
Графік опалення				168 год/тиждень
Архітектурно-планувальні рішення				
Параметр	Висота, м		Площа, м^2	
	загальна	поверху	загальна	опалювальна
Значення	12	2,7	3622,8	3260,5
Розрахунковий опір теплопередачі зовнішніх огороджувальних конструкцій				
Опір теплопередачі зовнішніх стін				R_q = 2,19 м^{2}К/Вт
Опір теплопередачі горищного перекриття				R_q = 4,92 м^{2}К/Вт

Зовнішні стіни будівлі мають багатошарову конструкцію: внутрішня штукатурка товщиною 25 мм, цегляна кладка товщиною 510 мм, утеплювач із мінеральної вати товщиною 100 мм, повітряний зазор 75 мм і зовнішнє облицювання профільним листом С-35 товщиною 0,55 мм, закріпленим на оцинкованому каркасі. Вікна та балконні двері виготовлені з металопластику з подвійним склінням, що забезпечує тепло- та звукоізоляцію. Дах складається з двох типів конструкцій: основна частина виконана з профільованого листа, укладеного на обрешітку поверх крокв із брусів, а також комбінована плоска покрівля, яка включає залізобетонну плиту товщиною 220 мм, пароізоляцію, шар керамзиту товщиною 160 мм, гідроізоляцію та плити з мінеральної вати товщиною 150 мм для утеплення. Підлога будівлі — це бетонна плита товщиною 100 мм без додаткового утеплення. Що стосується систем будівлі, то вона обладнана централізованою системою опалення, однак гаряче водопостачання відсутнє — нагрів води для санітарного блоку забезпечує електричний бойлер. Вентиляція в будівлі природна, без механічних систем.

Таблиця 2

Характеристика будівлі Дергачівської амбулаторії

Будинок				Амбулаторія
Призначення				Будівля закладу охорони здоров'я
Поверховість, тип				Два поверхи
Площа опалювальна				846,52
Розташування (температурна зона)				I температурна зона
Розрахункова температура внутрішнього повітря				22 °С
Розрахункова температура зовнішнього повітря				-23 °С
Графік опалення				168 год/тиждень
Архітектурно-планувальні рішення				
Параметри	Висота, м		Площа, $м^2$	
	загальна	поверху	загальна	опалювальна
Значення	9	3,5	971,92	846,52
Розрахунковий опір теплопередачі зовнішніх огороджувальних конструкцій				
Опір теплопередачі зовнішніх стін				R_q = 3,32 $м^2К/Вт$
Опір теплопередачі горищного перекриття				Rq = 8,48 $м^2К/Вт$

Будівля має зовнішні стіни, виконані з керамічної цегли товщиною 510 мм на клейовій суміші, утеплені системою вентильованого фасаду з мінеральною ватою товщиною 200 мм і густиною 80 кг/м², з зовнішнім опорядженням керамогранітними панелями. Вікна та балконні двері обладнані двокамерними склопакетами з енергозберігаючими покриттями з внутрішнього та зовнішнього боку, заповненими інертним газом аргоном, і профільною системою з полівінілхлориду (ПВХ). Покрівля є суміщеним покриттям, улаштованим із залізобетонних плит перекриття товщиною 220 мм, похилоутворюючого шару полістиролбетону середньою товщиною 120 мм, цементно-піщаної стяжки товщиною 20 мм, мінераловатного утеплювача товщиною 200 мм із щільністю 135 кг/м², ще однієї цементно-піщаної стяжки товщиною 50 мм і покриття руберойдом. Підлога влаштована по ґрунту з наявною основою, що складається з вирівнювального шару будівельного піску товщиною 200 мм, армованої бетонної основи товщиною 100 мм, шару екструдованого пінополістиролу товщиною 40 мм, цементно-піщаної стяжки товщиною 40 мм і покриття керамічною плиткою товщиною 10 мм. Інженерні системи будівлі включають централізовану систему теплопостачання, відсутність системи гарячого водопостачання (замість цього встановлено електричний бойлер для забезпечення потреб гарячої води в санвузлі) і механічну вентиляцію.

Нижче наведена порівняльна таблиця основних показників, що будуть досліджувати (табл. 3).

Таблиця 3

Порівняльна характеристика будівель

Будівля	Теплове навантаження на систему опалення, кВт	Теплове навантаження на систему вентиляції, кВт	Опалювальна площа, м^2	Питомі витрати тепла на потреби систем опалення і вентиляції на 1 м^2 опалювальної площі, Вт/м^2	Витрати витяжного повітря, м^3/год
Амбулаторія	23,97	42,59	846,52	85,72	1265
Лікарня	138,86	193,52	3260,5	101,94	5749

Для побудови моделі скористаємося законом збереження енергії та класичною формою рівняння теплопередачі. Позначимо температури повітря на вході та виході випарника як $T_{\text{вх}}$ і $T_{\text{вих}}$ відповідно, а температуру кипіння холодоагенту – $T_{\text{кип}}$. Масові витрати повітря – $\dot{m}$, питома теплоємність повітря – c_p, площа теплообміну – A, загальний коефіцієнт теплопередачі випарника – U. У стаціонарному режимі тепло, яке віддає повітря, дорівнює теплу, яке поглинає холодоагент. З балансу енергії для повітря маємо

$$Q^{\cdot} = m^{\cdot} c_p (T_{\text{вх}} - T_{\text{вих}}). \qquad (1)$$

Одночасно для теплообмінника справедливо класичне співвідношення

$$Q = UA\Delta T_{\text{LM}}, \qquad (2)$$

де ΔT_{LM} – логарифмічна середня різниця температур гарячого і холодного потоків.

У нашому випадку холодний бік (холодоагент) є майже ізотермічним за температури $T_{\text{кип}}$, а повітря поступає за температури $T_{\text{вх}}$ і виходить за температури $T_{\text{вих}}$. Логарифмічна середня різниця дорівнює

$$\Delta T_{\text{LM}} = \frac{(T_{\text{вх}} - T_{\text{кип}}) - (T_{\text{вих}} - - T_{\text{кип}})}{ln\frac{T_{\text{вх}} - T_{\text{кип}}}{T_{\text{вих}} - - T_{\text{кип}}}}. \qquad (3)$$

Рівняння (2) і (3) дають дві вирази для тієї самої величини $\dot{Q}$. Прирівняємо їх:

$$m^{\cdot} c_p (T_{\text{вх}} - T_{\text{вих}}) = UA \frac{(T_{\text{вх}} - T_{\text{кип}}) - (T_{\text{вих}} - - T_{\text{кип}})}{ln\frac{T_{\text{вх}} - T_{\text{кип}}}{T_{\text{вих}} - - T_{\text{кип}}}}. \qquad (4)$$

Це трансцендентне рівняння відносно $T_{\text{вих}}$. Його можна розв'язати, скориставшись припущенням, що холодоагент залишається за сталої температури кипіння (еквівалент – один флюїд із нескінченною теплоємністю). У такому разі за методом ε–N_TU (що дає ту саму залежність) ефективність теплообміну становить

$$\varepsilon = 1 - exp(-N_t u), \qquad (5)$$

якщо $C_r = 0$, де $N_t u = UA/(\dot{m} c_p)$.

Тоді

$$Q^{\cdot} = \varepsilon m^{\cdot} c_p (T_{\text{вх}} - T_{\text{кип}}) = m^{\cdot} c_p (T_{\text{вх}} - T_{\text{кип}}) \left[1 - e^{-\frac{UA}{m^{\cdot} cp}}\right]. \quad (6)$$

І нарешті, з виразу (1) випливає експоненційний розв'язок для вихідної температури повітря:

$$T_{\text{вих}} = T_{\text{кип}} + (T_{\text{вх}} - T_{\text{кип}}) exp\left(-m^{\cdot} c_p UA\right). \quad (7)$$

Припущення і обмеження моделі: розглядаємо стаціонарний режим, ізотермічний випарник (постійна температура холодоагенту), однорідний і рівномірний потік повітря, а також сталі теплофізичні властивості (c_p, U тощо). Нехтуємо тепловими втратами в навколишнє середовище, змінами фаз і вологістю повітря. Модель не враховує можливе обмерзання випарника або часткове вирощування льоду, опір теплоперенесення сусідніх елементів тощо. У таких умовах $T_{\text{вих}}$ завжди більший за $T_{\text{кип}}$, а разом із площею A та U зростання температурної різниці між повітрям і холодоагентом визначає інтенсивність охолодження.

Коефіцієнт теплопередачі варіюється в діапазоні 30…130 Вт/м^{2}К [11, 12]. Високі показники коефіцієнта теплопередачі визначені теоретичними розрахунками. У цій роботі будуть прийняті більш консервативні значення U =50 Вт/м^{2}К, площа теплообміну буде прийнята 5 м^2.

Витрати витяжного повітря, утилізованого для запропонованих будівель, складають 1265…5749 м^3/год. З метою отримання більш універсальних результатів цей діапазон буде розширено до 500…20000 м^3/год.

Як робочу речовину прийнято холодоагент R410a з температурою кипіння +5 °С за тиску 7 бар.

Нижче наведено графік залежності потужності теплового насоса типу «повітря-вода» від витрат витяжного повітря за сталим значенням площі теплообміну (рис. 1).

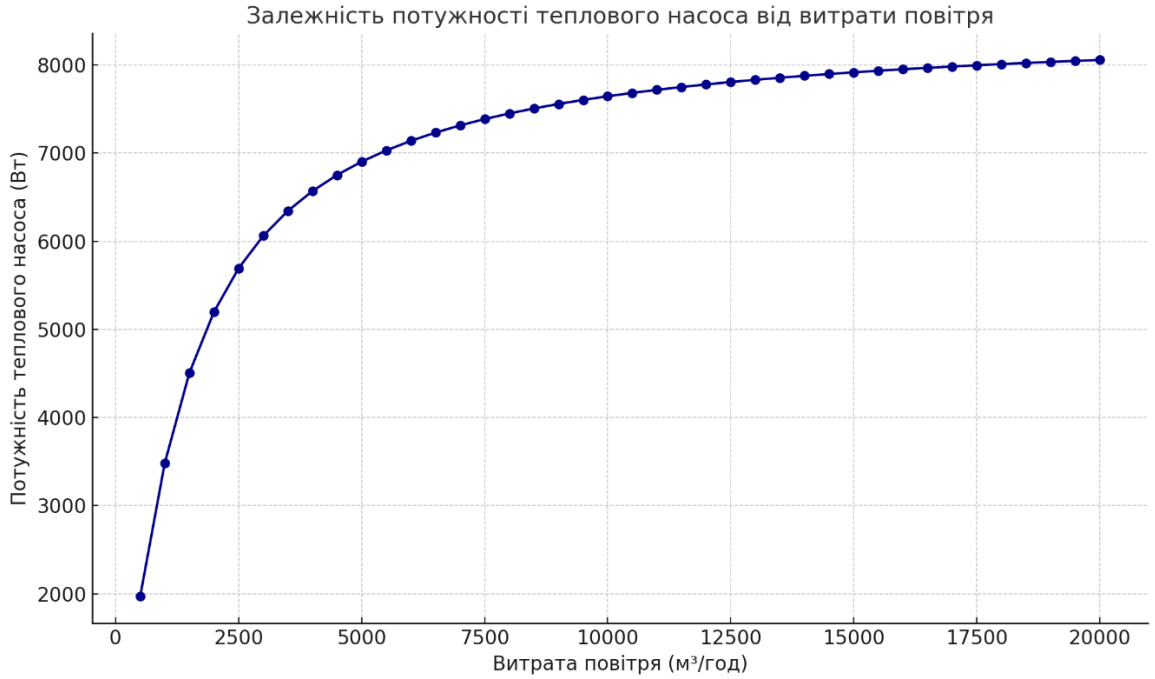


Рис. 1. Залежність потужності теплового насоса від витрат витяжного повітря

Як видно, зі збільшенням витрат повітря потужність теплового насоса зростає не лінійно, однак додатково підвищити ефективність відбору можна збільшенням площі теплообміну.

Нижче наведено графік залежності покриття теплового навантаження будівель амбулаторії і лікарні залежно від температури зовнішнього повітря (рис. 2, 3).

На основі наданих даних графіка залежності покриття теплового навантаження будівель амбулаторії та лікарні від температури зовнішнього повітря можна зробити кілька важливих висновків про їхню енергоефективність та особливості теплоізоляції.

Слід зазначити, що будівля амбулаторії утеплена краще, і питоме теплове навантаження на одиницю площі складає 85,72 Вт/м^2. Питоме навантаження для будівлі лікарні складає 101,94 Вт/м^2. Краща теплоізоляція амбулаторії забезпечує її перевагу в енергоефективності порівняно з лікарнею. Це має прямий вплив на те, як тепловий насос справляється з покриттям теплового навантаження в обох будівлях. Практично для амбулаторії тепловий насос може бути достатнім для більшості погодних умов, тоді як лікарня, імовірно, потребуватиме додаткових ресурсів у періоди пікового навантаження, коли температура зовнішнього повітря значно знижується.

Аналіз показав перспективність застосування теплових насосів із метою утилізації теплоти витяжного повітря. У роботі розглядали стандартні теплові насосі, що мають широке розповсюдження. Для досягнення високих показників утилізації є доцільними наукові дослідження щодо удосконалення теплообмінних поверхонь, застосування нових робочих речовин і схем теплових насосів.

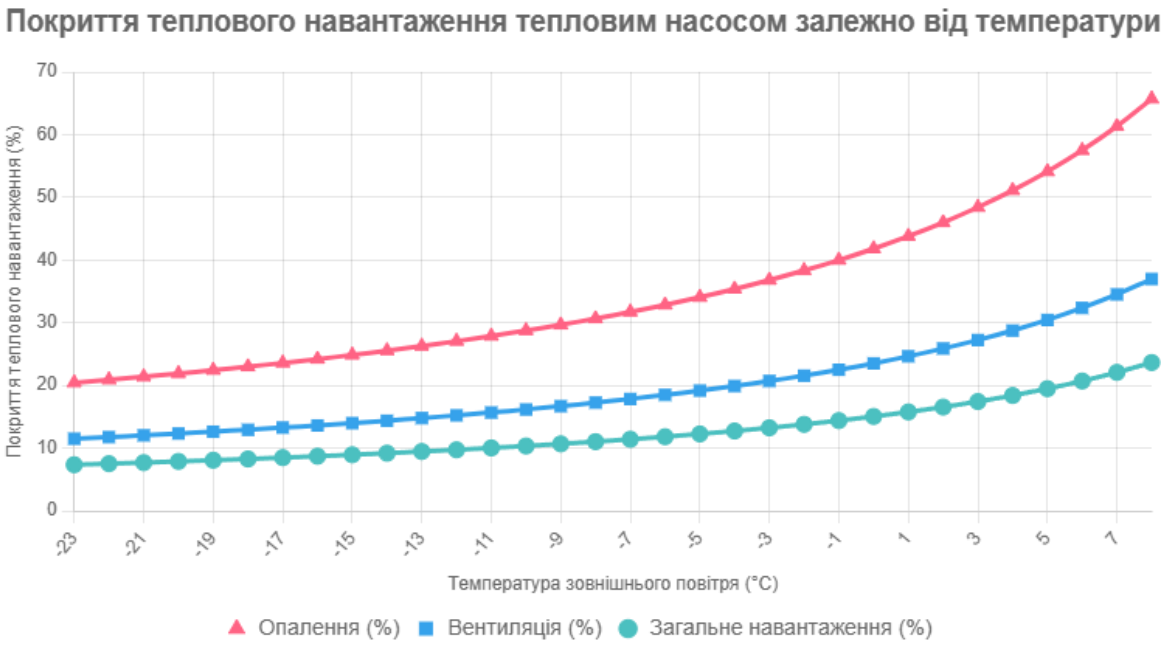


Рис. 2. Покриття теплового навантаження за видом теплового насоса у відсоткових показниках будівлі амбулаторії

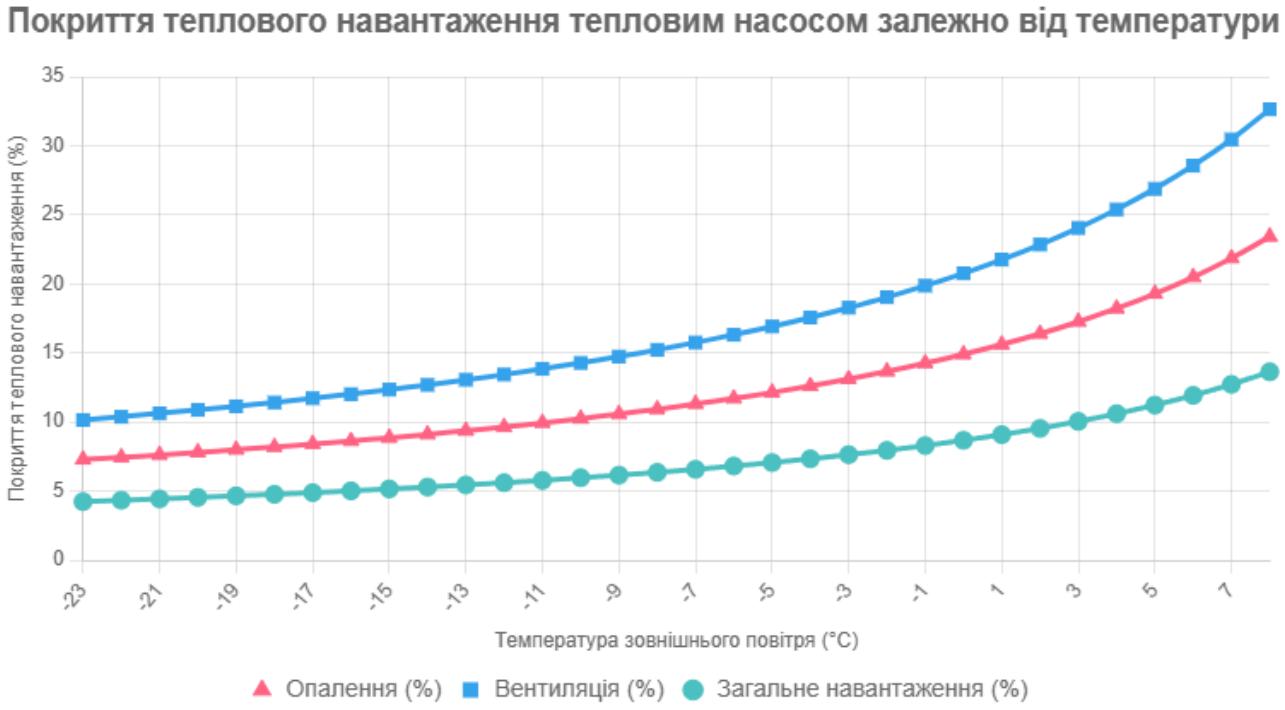


Рис. 3. Покриття теплового навантаження за видом теплового насоса у відсоткових показниках будівлі лікарні

Висновки. Дослідження підтверджують, що впровадження теплових насосів типу «повітря-вода» в системи вентиляції будівель закладів охорони здоров'я є доцільним і ефективним рішенням для зниження енергоспоживання. Аналіз реальних об'єктів — амбулаторії в м. Дергачі та лікарні в м. Ізюм — показав, що теплові насоси можуть забезпечити значну частину теплового навантаження на опалення та підігрів припливного повітря, при цьому відповідаючи вимогам ДБН В.2.2-10:2022, оскільки не передбачають змішування повітряних потоків. Теоретичні розрахунки та моделювання демонструють, що потужність теплового насоса зростає зі збільшенням витрат витяжного повітря, а оптимізація площі теплообміну може додатково підвищити ефективність системи. Запропоноване рішення сприяє підвищенню енергоефективності медичних закладів, що має як екологічні, так і економічні переваги, хоча для повного підтвердження результатів у реальних умовах необхідні подальші емпіричні дослідження.

Список використаних джерел

1. Шаповал О. В., Чепурна Н. В., Кириченко М. А. Аналіз ефективності роботи повітряного теплового насоса залежно від коливань температури зовнішнього повітря. *Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання*. 2021. № 37. С. 24–30.

2. Schibuola L., Tambani C. (2021). Performance comparison of heat recovery systems to reduce viral contagion in indoor environments. *Applied Thermal Engineering*. 190:116843.

3. Liu J., Ju Y., Yuan X., Kosonen R. et al. (2025). Cost-optimal dimensioning of combined run-around heat recovery and exhaust air heat pump systems in a Nordic hospital. *Journal of Building Engineering*. 106:112619.

4. Meyer D., Schoetter R., van Reeuwijk M. (2024). Energy and environmental impacts of air-to-air heat pumps in a mid-latitude city. *Nature Communications*. 15:5474.

5. CaraDonna C. et al. (2023). Heat Pump Rooftop Units With Exhaust Air Energy Recovery. *National Renewable Energy Laboratory*. NREL/TP-5500-89481.

6. Liu S., Ma G., Jia X., Xu S. et al. (2023). The thermal performance and applicability analysis of the composite ventilation system with heat recovery in ultra-low energy buildings. *Energy*. 263:125942.

7. ДБН В.2.2-10:2022. Заклади охорони здоров'я. Основні положення: затв. Наказом Мінрозвитку громад. територ. 26.12.2022 р. № 278; Наказ від 26.12.2022 № 278. URL: https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0278914-22#Text

8 Використання теплових насосів для опалення та гарячого водопостачання будівель підприємств (на прикладі установок Helioterm) / З. С. Сірко, В. А. Коренда, І. Ю. Вишняков та ін. (2020). *Наук. доповіді НУБіП України*. № 5(87). С.59–67.

9. Burda Y. (2025). Comprehensive analysis of thermodynamic and thermophysical processes in heat and gas supply and ventilation systems: theoretical foundations and engineering solutions: monograph. Kharkiv: O. M. Beketov NUUE, 130 p. URL: https://eprints.kname.edu.ua/68140/.

10. Weidlich P., Yamaguchi C., Caggiano A. (2023). Retrofitting for Improving Indoor Air Quality and Energy Efficiency in the Hospital Building. *Sustainability*. 15(4):3464.

11. Brück S., Kuhn S., Bruch R. & Schmidt D. (2016). Investigations into air- and refrigerant-side heat transfer coefficients in fin-and-tube gas cooler coils. *International Journal of Refrigeration*. 67. 234–244.

12. Deng W., Feng Y. & Li R. (2018). Experimental Study of a Novel Shape-Optimized Air-to-Refrigerant Heat Exchanger. *Applied Thermal Engineering*. 138. 548–558.

Півненко Юрій Олександрович, кандидат технічних наук, асистент кафедри теплогазопостачання і вентиляції, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова.
E-mail: yurii.pivnenko@kname.edu.ua. ORCID ID: orcid.org/0000-0002-6675-2649.
Бурда Юрій Олександрович, кандидат технічних наук, доцент кафедри теплогазопостачання і вентиляції, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова.
E-mail: Yurii.Burda@kname.edu.ua. orcid.org/ 0000-0003-3470-1334.
Чайка Юрій Іванович, кандидат технічних наук, в. о. завідувача кафедри теплогазопостачання і вентиляції, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова. ORCID ID: 0000-0003-1021-4662. E-mail: yurii.chaika@kname.edu.ua.
Ткаченко Роман Борисович, кандидат технічних наук, доцент кафедри теплогазопостачання і вентиляції, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова. ORCID ID: 0000-0003-3899-1826. E-mail: roman.tkachenko@kname.edu.ua.
Редько Ігор Олександрович доктор технічних наук, професор кафедри теплотехніки, теплових двигунів та енергетичного менеджменту, Український державний університет залізничного транспорту.
ORCID ID: https://orcid.org/ 0000-0002-9863-4487. E-mail: ihorredko1972@gmail.com.

Yurii Pivnenko, Ph.D., Assistant at the Department of Heating, Gas Supply, and Ventilation, Kharkiv National University of Municipal Economy named after O. M. Beketov. E-mail: yurii.pivnenko@kname.edu.ua.
ORCID ID: 0000-0002-6675-2649.
Yurii Burda, Ph.D., Associate Professor at the Department of Heating, Gas Supply, and Ventilation, Kharkiv National University of Municipal Economy named after O. M. Beketov. E-mail: Yurii.Burda@kname.edu.ua.
ORCID ID: 0000-0003-3470-1334.
Yurii Chaika Ph.D., Head of the Department of Heating, Gas Supply, and Ventilation, Kharkiv National University of Municipal Economy named after O. M. Beketov. E-mail: yurii.chaika@kname.edu.ua. ORCID ID: 0000-0003-1021-4662.

Roman Tkachenko, Ph.D., Associate Professor at the Department of Heating, Gas Supply, and Ventilation, Kharkiv National University of Municipal Economy named after O. M. Beketov. E-mail: roman.tkachenko@kname.edu.ua. ORCID ID: 0009-0005-1556-0830.
Ihor Redko, D.Sc. (Doctor of Technical Sciences), Professor at the Department of Transport Technology, Design and Exploitation of Machines, Ukrainian State University of Railway Transport. E-mail: ihorredko1972@gmail.com. ORCID ID: 0000-0002-9863-4487.

Статтю прийнято 13.06.2025 р.

УДК 69.059.4:625.84

МОРОЗНО-СОЛЬОВИЙ ВПЛИВ НА ЦЕМЕНТОБЕТОН

Канд. техн. наук Г. В. Бражник

FROST-SALT INFLUENCE ON CEMENT CONCRETE

PhD (Tech.) H. Brazhnyk

DOI: https://doi.org/10.18664/1994-7852.212.2025.336346

Анотація. *У статті розглянуто гіпотези морозного руйнування бетонів в умовах змінного замерзання та відтавання. Показано, що з морозно-сольовим впливом середовища NaCl солі відкладаються в порах і дефектах структури бетону. Експериментально доведено, що кристалізація солей призводить спочатку до ущільнення рівнів структури бетону, а потім, з наростанням тиску солі, що кристалізується, - до швидкої втрати міцності і поступового руйнування бетону.*

Ключові слова: *цементобетон, морозостійкість, морозно-сольова дія, розчини солей, міцність.*

Abstract. *The article explores hypotheses concerning frost-induced damage in concrete under alternating freezing and thawing conditions, and examines methods for improving the frost resistance of road cement concretes. It is shown that the primary causes of frost damage in road concrete include the freezing of water in pores and capillaries, loosening of the surface layer, subsequent abrasion, and early layer-by-layer structural destruction that penetrates deeper into the concrete mass. When a pore or capillary is filled with water, ice formation generates stress in the microvolume of cement concrete due to pressure from growing ice crystals on the pore walls. This pressure is initially transmitted to the remaining liquid phase, which does not freeze at –18 °C, as the crystallization of pure ice enriches the remaining liquid with alkalis or salts. Consequently, the impact of temperature cycling is exacerbated by additional effects from salt solutions. The article presents research on the influence of concrete composition incorporating the plasticizer «FM 21» and varying levels of entrained air on the density, strength, and frost resistance of cement concretes. It is demonstrated that under freeze–salt exposure with NaCl, salts are deposited in the pores and defects of the concrete structure. Experiments confirm that salt crystallization initially leads to densification of structural layers, followed by a rapid loss of strength and gradual concrete degradation as crystallization pressure increases. Thus, the study concludes that frost damage to road concretes during operation results from a combined effect of hydraulic pressure from water and crystallization pressure from ice and salts. It is proposed that frost resistance can be enhanced by increasing the density of concrete's*

structure at all levels. Existing concrete mix design techniques can achieve such density by reducing the water-to-cement (W/C) ratio through the use of modern superplasticizers, decreasing cement paste porosity via powdered microstructure modifiers, and lowering capillary porosity by using cements with active mineral additives.

Keywords: *cement concrete, frost resistance, frost-salt action, salt solutions, strength.*

Однією з основних причин руйнування бетону є багаторазове його змінне замерзання та відтавання в насиченому водою стані. Це пояснюють збільшенням обсягу льоду в порах бетону на 9-10 %, внаслідок чого створюється тиск води на стінки пор, і в бетоні виникають значні внутрішні напруження.

Вивченням причин руйнування бетонів і проблем довговічності займалися В. І. Бабушкін, Г. І. Горчаков, В. С. Гладков, І. М. Грушко, Є. А. Гузєєв, Л. М. Добшиц, Г. Г. Добролюбов, П. Г. Комохов, І. М. Красний, Б. О. Крилов, А. В. Лагойда, С. А. Миронов, В. М. Москвін, М. А. Мощанський, А. М. Плугін, О. С. Попова, В. Б. Ратінов, В. П. Сизов, Н. М. Свіриденко, В. І. Соломатов, В. П. Сопов, В. Ф. Степанова, С. М. Толмачов, В. В. Стольников, О. В. Ушеров-Маршак, А. Є. Шейкін, С. В. Шестоперов, А. Г. Шлаєн, А. М. Шейнін та багато інших учених.

Ними встановлені основні фактори, що впливають на морозо- та морозосолестійкість бетонів, основними з яких є величина водоцементного співвідношення, тонкість помелу, мінеральний склад і ступінь гідратації цементу, вид заповнювачів, умови твердіння, склад, щільність і вік бетону, показники пористості бетону та інші. Ступінь морозного впливу в цілому визначений фазовими переходами вологи в бетоні та його капілярно-пористою структурою. Показано, що основними причинами морозного руйнування бетону покриття є замерзання води в порах і капілярах, розпушення поверхневого шару бетону, подальше його стирання та наступне пошарове руйнування структури, яке поширюється в глибину масиву бетону.

З заповненням пори або капіляра водою утворення льоду буде супроводжуватися виникненням напруженого стану в мікрообсязі цементного бетону через тиск зростаючих кристалів льоду на стінки пор. Тиск зростаючих кристалів льоду насамперед передається на рідку фазу, що залишилася не замерзлою за температури -18 ^{0}C, оскільки з випаданням прісних кристалів льоду рідка фаза, що залишилася, збагачується лугами або солями. Тому вплив циклічної зміни температури посилений додатковим впливом розчинів солей.

Оскільки стала поширеною практика застосування солей (NaCl, $CaCl_2$) для видалення льоду з дорожніх покриттів, дифузія солі в бетон призводить до виникнення градієнта її концентрації, що також викликає підвищену напругу, лущення та відшаровування поверхневого шару. За присутності солей збільшуються осмотичні явища в бетоні, що замерзає, підвищується в'язкість рідкої фази. У результаті зростає величина гідравлічного тиску, що прискорює руйнування бетону (відомо, що з замерзанням води за температури -5 ^{0}C створюється тиск близько 5000 МПа. Так само за будь-якої температури замерзання є частина води, що випаровується, розташована в порах цементного каменю. У разі застосування 5 % розчину NaCl утворюються кристали солі, зростання яких можливе з подальшим заморожуванням. Це і може пояснювати зростання міцності бетону до певної кількості циклів замерзання та відтавання, поки зростання кристалів солі не створюватиме додатковий тиск на стінки пор і капілярів, що призведе до локального руйнування бетону.

Для перевірки висловленого припущення досліджено морозостійкість бетону у воді та в розчині 5 % NaCl, за ДСТУ Б В.2.7-47. Склад бетону підібраний за принципом забезпечення найбільшої щільності для цих матеріалів: цемент – 380 кг/м^3, пісок – 560 кг/м^3, щебінь фракції 5-10 – 536 кг/м^3, щебінь фракції 10-20 – 804 кг/м^3, добавка FM-21 – 6 л/м^3. Рухливість бетонної суміші – Р1. У дослідженнях використали цемент ПЦ II/А-Ш М400, пісок кварцовий Вознесенського кар'єру з Мкр = 2,4, щебінь гранітний – «Кіровоградграніт» фракцій 5-10 і 10-20 мм. До складу бетонної суміші вводили суперпластифікатор FM-21 виробництва Німеччини.

Дослідження морозостійкості (рис. 1) показало, що у зразків бетону, які заморожували за температури -50 ^{0}C і розморожували за температури +18 ^{0}C у розчині 5 % NaCl, до 37 циклів випробувань на морозостійкість за прискореною методикою значних змін у міцності не спостерігали. Подальше же заморожування та розморожування – призвело до різкого зниження міцності та руйнування зразків.

У зразків бетону, що досліджували у воді протягом усього експерименту, спостерігали поступове зниження міцності, видимі зовнішні руйнування виявили лише після 50 циклів замерзання та відтавання.

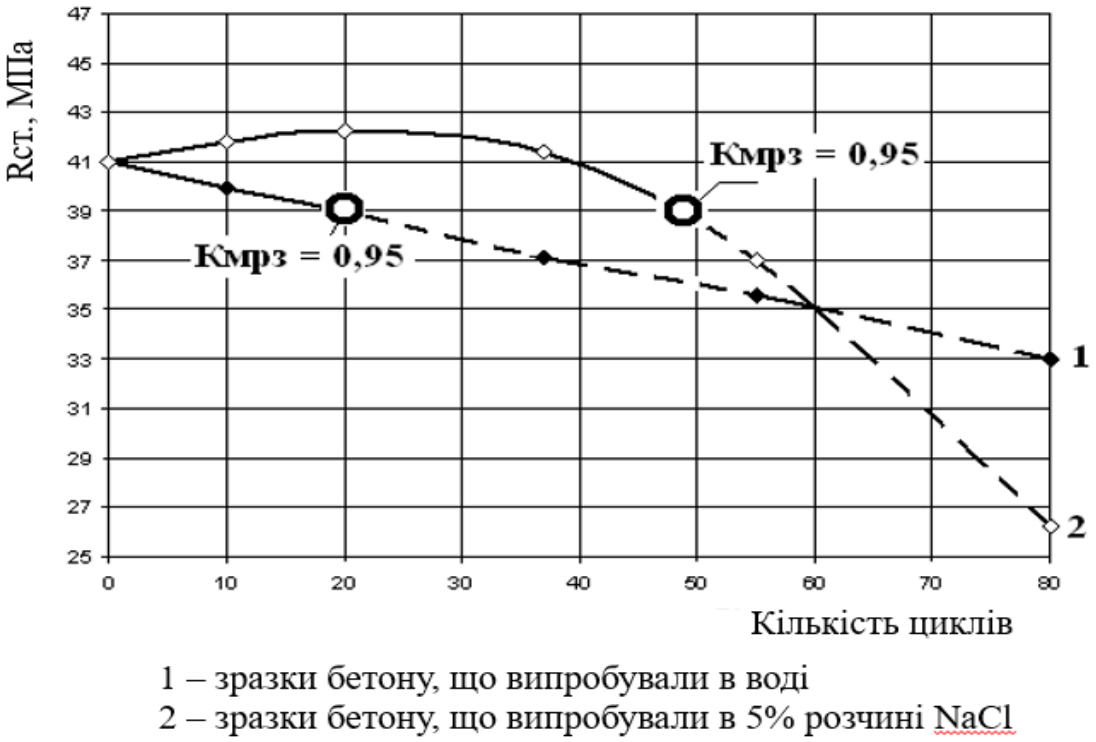


Рис. 1. Залежність міцності бетону від кількості циклів замерзання та відтавання в різних середовищах

Зниження міцності бетонів за морозно-сольового впливу для прийнятого методу випробування починається після 37 циклів і відбувається досить інтенсивно, що опосередковано підтверджує припущення про накладання кристалізаційного тиску солей у порах бетону на тиск льоду та води на стінки пор.

Проведені нами дослідження показали, що за морозно-сольового впливу,

крім описаних явищ, має місце кристалізація солей у порах і капілярах цементного каменю та розчину. Якщо льодоутворення можливе відносно у великих порах і капілярах, то солі можуть кристалізуватися в порожнинах практично будь-яких розмірів. З кристалізацією солей на якомусь початковому етапі кристали сприятимуть «заростанню» пор і капілярів, тобто ущільненню мікроструктури, що призведе до підвищення міцності бетону взагалі, як зазначають багато дослідників. Тобто після певної кількості циклів замерзання-відтавання відбувається зміцнення бетону, яке можна пояснити кристалізацією солей у порах і дефектах структури, а також гідратацією цементу, що триває, за топохімічною схемою в результаті гідравлічного тиску води. Наведене вище підтверджують дані оптичної мікроскопії. На зрізах бетону, зроблених до початку випробувань на морозостійкість, видно його структуру, що включає пори, а також дрібний і крупний заповнювач (рис. 2).

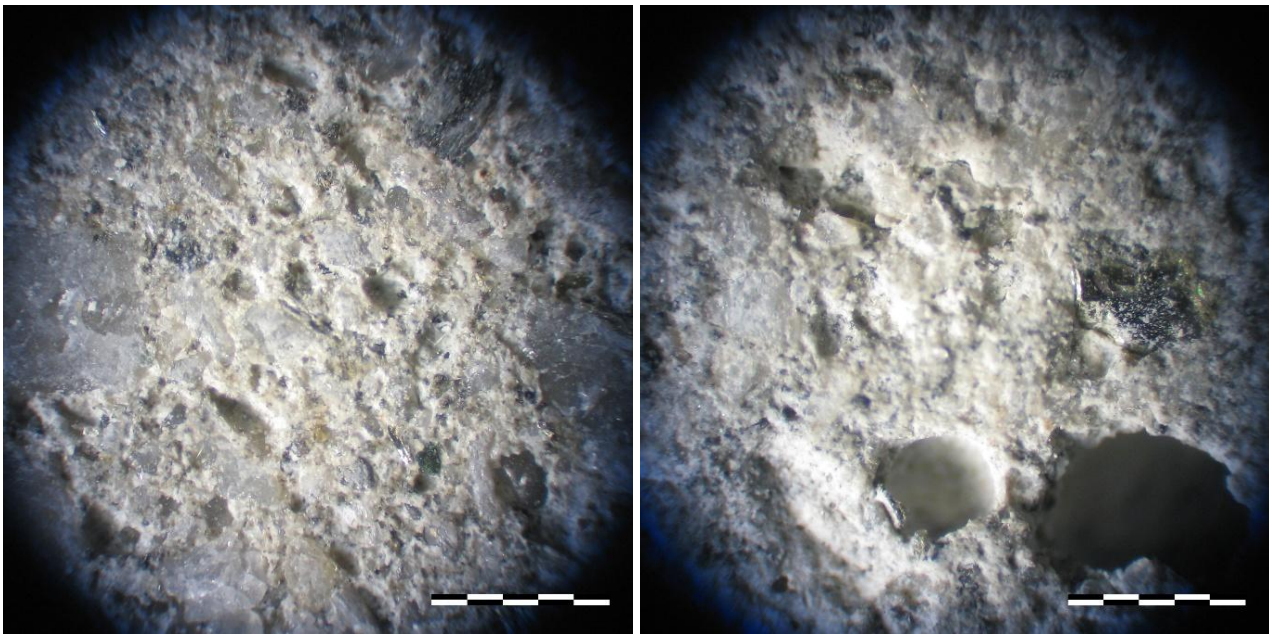


Рис. 2. Зріз зразка бетону до початку випробування (збільшення 32^{x})

Після 37 циклів випробування бетону за прискореною методикою (заморожування за температури -50 ºС у розчині 5 % NaCl, розморожування – у тому самому розчині за температури +18 ºС) на зрізах бетону, збільшених у 32 рази, стають видні блискучі кристали солі, які рівномірно розташовані по всій поверхні зрізу. Ці кристали відкладаються насамперед у різних порожнинах і дефектах структури (рис. 3, 4). На фотографії збільшення в 100 разів наведені пори з сіллю, що кристалізуються, і кристал NaCl, що росте на стінці пори.

На зразках, випробовуваних на морозостійкість у воді, відкладення кристалів солі немає (рис. 5). Це підтверджує висловлене вище припущення про заростання пор з кристалізацією на стінках солі з водного розчину. І в цьому випадку руйнація бетону відбувається через тиск зростаючих кристалів льоду на стінки пор, що виникає за від’ємних температур.

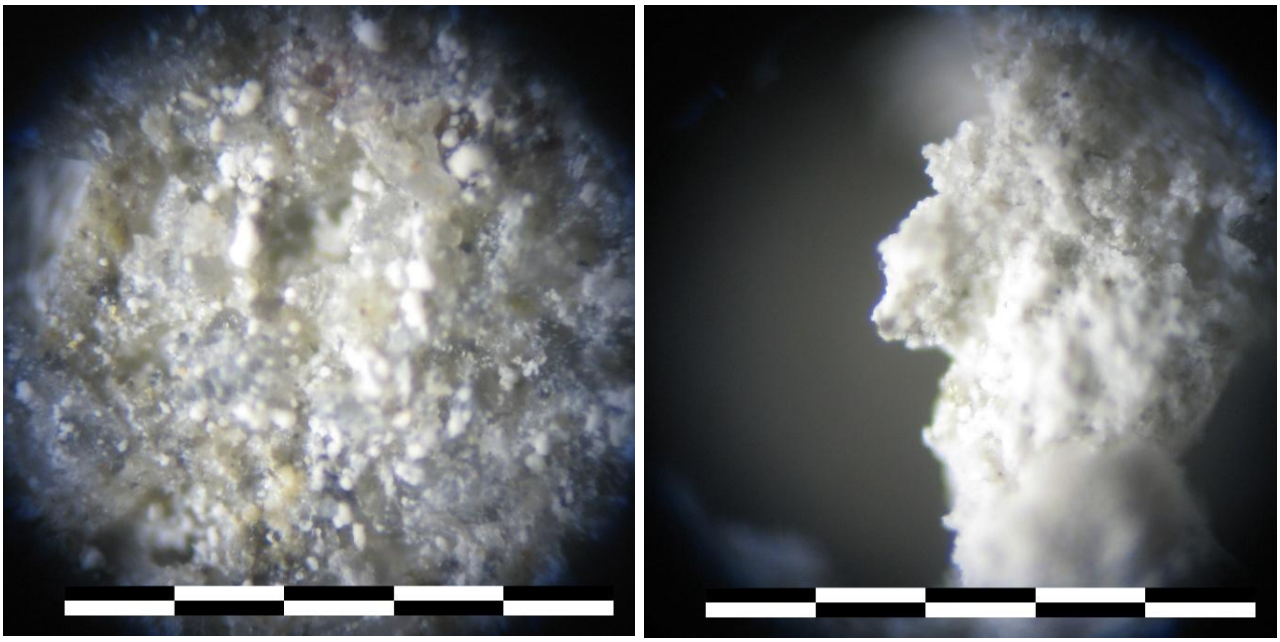


Рис. 3. Зріз зразка бетону після 37 циклів замерзання та відтавання
в розчині 5 % NaCl (збільшення 100^x)

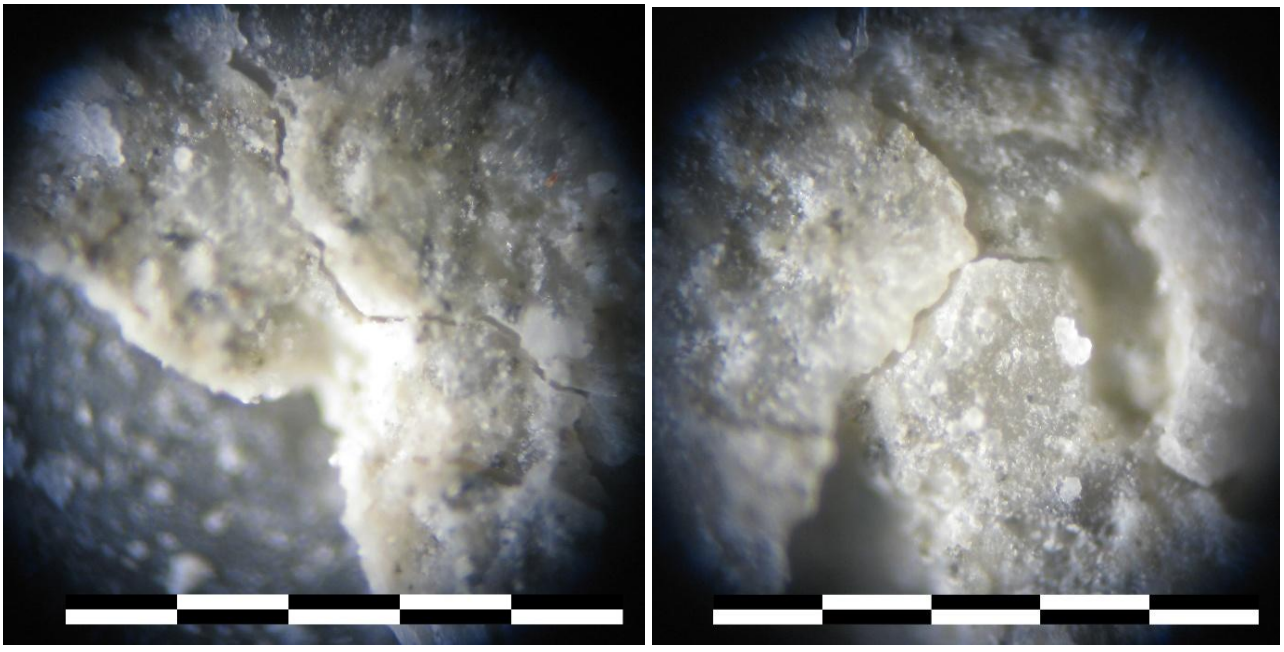


Рис. 4. Зріз зразка після 50 циклів замерзання та відтавання
в розчині 5 % NaCl (збільшення 100^x)

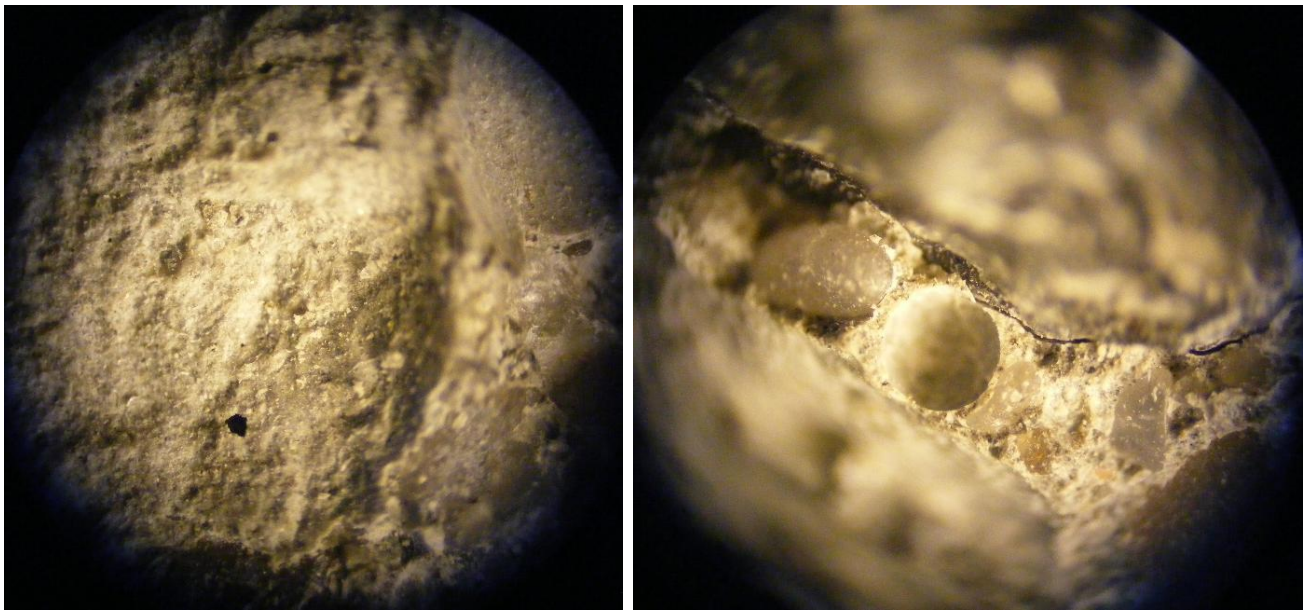


Рис. 5. Зріз зразка бетону після 50 циклів замерзання та відтавання у воді (збільшення 32^x і 100^x)

Отже, можна зробити висновок, що причиною морозного руйнування дорожніх бетонів у період експлуатації є комплекс впливів, викликаний впливом гідравлічного тиску води та кристалізаційних тисків льоду і солей. У цьому випадку логічним буде припущення, що підвищення морозостійкості можна досягти шляхом підвищення густини структури бетону на всіх її рівнях [1, 2], ураховуючи, що з підвищенням щільності бетонів зменшується в першу чергу відкрита пористість бетонів, яка негативно впливає на морозостійкість. Відомі методи підбору складів бетону дають змогу забезпечити таку високу щільність за рахунок зменшення В/Ц шляхом застосування сучасних гіперпластифікаторів, зменшення пористості цементного каменю за рахунок введення порошкоподібних модифікаторів мікроструктури, зниження величини пористості капілярної з використанням цементів з активними мінеральними добавками і т. п.

Висновки. Існує кілька різних гіпотез морозного руйнування бетонів в умовах змінного замерзання-відтавання, за якими руйнування починається в порах і дефектах структури, заповнених водою, і є результатом тиску води або льоду на стінки пор.

Встановлено, що для дорожніх бетонів механізм руйнування може відрізнятися від вищезгаданого через те, що вони зазнають морозно-сольового впливу серед NaCl. При цьому солі, відкладаючись у порах, можуть мати додатковий кристалізаційний вплив на стінки пор.

Експериментально доведено, що кристалізація солей у порах та інших дефектах структури призводить спочатку до ущільнення рівнів структури бетону та зміцнення бетону, а потім, з наростанням тиску солі, що кристалізується, – до швидкої втрати міцності та поступового руйнування бетону.

Список використаних джерел

1. Морозостійкі дорожні бетони з оптимізованим повітроутягненням / С. М. Толмачов, І. Г. Кондратьєва, О. А. Бєліченко, Г. В. Матяш. *Будівельні конструкції: матеріали VII науково-технічного семінару «Структура, властивості та склад бетону» «Бетони і розчини з використанням ефективних добавок та відходів промисловості».* Київ: НДІБК, 2009. Вип. 72. С. 553–560.
2. Взаимосвязь воздухосодержания бетонной смеси и морозостойкости бетона / А. В. Матяш, С. Н. Толмачев, И. Г. Кондратьева, А. Ю. Вялых. *Науковий вісник будівництва*. Харків: ХДТУБА, 2010. № 57. С. 195-202.

Бражник Ганна Володимирівна, кандидат технічних наук, старший викладач кафедри технології дорожньо-будівельних матеріалів ім. М. І. Волкова, Харківський національний автомобільно-дорожній університет. ORCID iD: 0009-0004-6630-1209. Тел.: +38(050)90-98-190. E-mail: anna.matyash@ukr.net.

Brazhnyk Hanna, PhD (Tech.), Senior Lecturer, Department of Technology of Road Construction Materials named after M. I. Volkov, Kharkiv National Automobile and Highway University. ORCID ID: 0009-0004-6630-1209. Tel.: +38(050)90-98-190. E-mail: anna.matyash@ukr.net.

Статтю прийнято 18.06.2025 р.

УДК 625.745.1

ЗАХОДИ З ПОПЕРЕДЖЕННЯ ТА ГАСІННЯ НЕБЕЗПЕЧНИХ ФОРМ РУХУ ПОТОКІВ ВОДИ В НИЖНЬОМУ Б'ЄФІ ДОРОЖНІХ ВОДОПРОПУСКНИХ ТРУБ

Канд. техн. наук М. В. Гаркуша

MEASURES FOR PREVENTING AND EXTINGUISHING DANGEROUS WATER FLOW PATTERNS IN THE DOWNSTREAM SECTION OF ROAD CULVERTS

PhD (Tech.) M. V. Harkusha

DOI: https://doi.org/10.18664/1994-7852.212.2025.336352

Анотація. *Дорожні водопропускні труби є наймасовішими штучними спорудами на автомобільних дорогах. Слід зазначити, що нижній б'єф таких споруд працює у складних експлуатаційних умовах зі значною нерівномірністю розподілу питомих витрат, високою кінетичністю потоку, насиченістю потоку донними наносами, камінням, сміттям, що спричиняє розмивання нижнього б'єфу споруди та руйнування насипу і штучної споруди. Попередити утворення небезпечних форм руху рідини в нижньому б'єфі дорожніх водопропускних труб можна шляхом застосування інженерних споруд, що дають змогу змінити механізм руху та швидкісну структуру потоку за водопропускною спорудою, що може бути досягнуто за рахунок влаштування гасника енергії для забезпечення вирівнювання за шириною відвідного русла витрат, глибин, швидкості та зниження їхньої пульсації. Одним із слабких місць дорожніх водопропускних труб є зона нижнього б'єфу, що нерідко зазнає деформації, оскільки з виходом струменя з дорожньої водопропускної труби круглого перерізу в каналі трапецеїдальної форми з'являється збійність течії, утворюються водоворотні зони,*

формуються великі донні швидкості. Тому необхідно змусити потік води розтікатися без збійності, із більш сприятливою швидкісною структурою та зменшеними актуальними швидкостями у придонній області.

На сьогодні відомо про велику кількість руйнувань нижнього б'єфа, що змушує розробляти нові конструкції нижнього б'єфу дорожнього водовідводу. Можна виділити два підходи щодо розв'язання проблеми кріплення нижніх б'єфів дорожніх водопропускних споруд: повна відмова від улаштування конструкцій гасників енергії і зсув на значну відстань вирви розмиву від дорожнього насипу; використання гасників енергії, розсікачів або розсіювачів різного типу.

Для запобігання пошкодженню потоком дорожніх водопропускних труб у нижньому б'єфі необхідно виконувати гасіння небезпечних форм руху потоків води.

У статті розглянуто заходи з попередження та гасіння небезпечних форм руху потоків води в нижньому б'єфі дорожніх водопропускних труб.

Ключові слова: *гасіння енергії, дорожня водопропускна труба, нижній б'єф, русло, потоки води.*

Abstract. *Road culverts are the most common type of artificial structure on highways. It is important to note that the downstream section of these structures operates under challenging conditions characterized by a significant uneven distribution of specific discharges, high kinetic energy of the flow, and a stream saturated with bottom sediments, stones, and debris. These factors cause erosion of the downstream section and destruction of both the embankment and the culvert itself.*

Preventing the formation of dangerous water flow patterns in the downstream section of road culverts can be achieved through the use of engineering structures that alter the flow mechanism and velocity structure behind the culvert. This can be accomplished by installing energy dissipators, which help to equalize the flow distribution across the width of the downstream channel, normalize flow depths and velocities, and reduce their pulsations.

One of the weakest areas of road culverts is the downstream zone, which is often subject to deformation. This occurs when water exits a circular culvert into a trapezoidal channel, flow disruption, vortex zones, and high bottom velocities form. Therefore, it is necessary to make the water flow spread without disruption, with a more favorable velocity structure and reduced actual velocities near the bottom.

Currently, there is widespread damage to downstream sections, which necessitates the development of new downstream structural designs for road drainage systems. Two main approaches can be distinguished for addressing the problem of reinforcing culvert downstream sections: complete abandonment of energy dissipator structures with relocation of the scour hole far from the road embankment; or the use of various types of energy dissipators, deflectors, or diffusers.

To prevent damage to road culverts by water flow in the downstream section, it is essential to eliminate dangerous water flow patterns.

This article discusses measures for preventing and damping dangerous water flow patterns in the downstream section of road culverts.

Keywords: *energy dissipation, road culvert, downstream section, channel, water flows.*

Вступ. Одним із слабких місць дорожніх водопропускних труб є зона нижнього б'єфу, що нерідко зазнає деформації, оскільки з виходом струменя з дорожньої водопропускної труби круглого перерізу в каналі трапецеїдальної форми з'являється збійність течії, утворюються водоворотні зони, формуються великі донні швидкості [1]. Тому необхідно змусити потік води розтікатися без збійності, із

більш сприятливою швидкісною структурою та зменшеними актуальними швидкостями у придонній області.

Оскільки глибини в зоні вільного розтікання бурхливого потоку порівняно невеликі, істотної дисипації енергії досягають застосуванням укріплень із підвищеною шорсткістю або гасників енергії [2] для необхідності забезпечення розтікання потоку порівняно в короткій ділянці русла.

Найпоширенішими гасниками енергії є водобійні стінки, як суцільні, так і прорізні; балки; пороги; колодязі; шашки; пірси; зуби [1–3]. Однак вони не завжди забезпечують зазначені умови, а на їхню роботу істотно впливають гідравлічні режими в дорожній водопропускній трубі: під час безнапірного та напівнапірного режимів роботи ефективними є донні пороги, направляючі стінки на відкосах, під час напірного режиму роботи, прорізні водобійні стінки з насадками, комбінація насадок і Г-подібних балок із колодязями.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Велика частина гасників енергії, що працює в дорожніх водопропускних трубах із пропускними витратами до 10 $м^3/с$, не має власного фундаменту, тому прикріплені до плит кріплення і, отже, передають їм отриманий гідродинамічний імпульс і в такий спосіб знижують стійкість всієї конструкції кріплення в нижньому б'єфі, а конструкція гасника слугує перешкодою і здатна сприяти засміченню або замулюванню за рахунок захаращення проточної частини споруди [1].

Зі збільшенням глибини розмивання стійкість фундаменту конструкції може бути втрачена, що призведе до ризику пошкодження конструкції та її відмови [3–5].

Крім того, ерозію вниз за течією та розмив вважають основними причинами руйнування водопропускної споруди [6].

Погіршення структурної цілісності водопропускної системи також може призвести до серйозного та дорогого пошкодження водопропускної споруди та пов’язаної з нею системи, обвалення дорожнього покриття, що лежить вище, і необхідності дорогого технічного обслуговування [7, 8].

Розмивання ґрунту вниз за течією в кінцях водопропускних споруд також зумовлює проблеми з навколишнім середовищем, оскільки це може спричинити падіння поверхні води і стати перешкодою для руху водних видів фауни [9].

Отже, існує потреба у вдосконаленні конструкції кінців водопропускних споруд, щоб зменшити ерозію вниз за течією, розмив і подальший ризик передчасного виходу з ладу водопропускної споруди [3, 5, 6, 8].

Слід зазначити, що швидкість потоку та кінетичну енергію постійно включають у дослідження ерозії, спричиненої потоками [10, 11]. Висока швидкість потоку, що витікає з кінців водопропускної споруди, створює високу кінетичну енергію, що призводить до розмиву та ерозії, якщо цю енергію не можна зменшити або розсіяти [12]. Попередні дослідження також показали, що висока швидкість і кінетична енергія випускного потоку на кінці водопропускної споруди збільшують її ерозійну здатність [10–12].

Тому проведення досліджень з оцінювання та гасіння швидкості кінетичної енергії випускного потоку, оптимізації конструкції нижнього б'єфу з урахуванням цих факторів є актуальним і необхідним для проєктування дорожніх водопропускних споруд [6, 13–15].

Визначення мети та завдання дослідження. Метою виконання роботи є узагальнення сучасних заходів із попередження та гасіння небезпечних форм руху потоків води в нижньому б'єфі дорожніх водопропускних труб, аналіз експериментальних досліджень.

Основна частина дослідження. Визначення міри пошкодження цементобетонного покриття. Гілл М. [16]

розробив систему для визначення характеристик потоку на перепадах, дивлячись на співвідношення між глибиною каналу та висотою падіння. Цей спосіб перевірки характеристик має вирішальне значення для визначення правильної конструкції заспокійливого басейну, який необхідний для адекватного розсіювання енергії. Автор розробив набір рівнянь, за допомогою яких проєктувальник може правильно спроєктувати вертикальне падіння для заданого набору умов.

Федеральне управління автомобільних доріг випустило посібник «Гідравлічне проєктування розсіювачів енергії для водопропускних труб і каналів» [17], у якому наведено використання додаткових конструкцій і заспокійливих басейнів для зменшення енергії потоку, коли він виходить із водопропускної труби. Перепадні структури контролюють нахил русла так, що високі ерозійні швидкості ніколи не розвиваються (FHWA). Використання заспокійливих басейнів сприяє розсіюванню енергії через удар води, що падає на основу русла, перенаправлення потоку і турбулентність. У цьому посібнику є приклад конструкції, який ілюструє покроковий процес, пов'язаний із визначенням правильної конструкції з прямим падінням і відповідного заспокійливого басейну.

Автори роботи [18] у результаті проведених досліджень виявили, що для надкритичних потоків масову швидкість потоку контролюють умовами входу, але для субкритичних потоків масова швидкість потоку стає контрольованою властивостями матеріалу потоку та відхиленням каналу. Надкритичні течії (Fr > Frc) швидкі та неглибокі, тоді як докритичні потоки (Fr < Frc) повільні та глибокі. Це вказує на те, що седиментація буде більш вірогідною в підкритичному потоці після індукованого гідравлічного стрибка в водопропускних трубах.

У роботі [19] запропоновано аналітичні рішення для обчислення послідовної глибини та відносних втрат енергії для вільного гідравлічного стрибка в горизонтальних і похилих прямокутних каналах на основі експериментальних досліджень. Автори використовували відношення довжини стрибка до глибини стрибка та число Фруда, щоб обчислити довжину вільного стрибка на горизонтальній основі. Фактори стрибка та форми були оцінені експериментально для вільного стрибка на похилому руслі. Щоб перевірити ефективність стрибка, вони порівняли з попередніми розв'язаннями Лудіна, Бахматева, Сільвестра та Чертоусова і виявили, що отримані ними рівняння можна використовувати замість їхніх рівнянь.

Гаранглк А. та Чаудрі М. [20] подали три моделі для чисельного моделювання гідравлічних стрибків у прямокутному каналі, ураховуючи значний ефект розподілу негідростатичного тиску. Одновимірні рівняння Бусінеска розв'язувані в часі за відповідних граничних умов, які чисельно моделюють гідравлічний стрибок. Результати порівнювали з експериментальними даними, які вказують на те, що чотирипорядкові моделі з членами Бусінеска або без них дали подібні результати для всіх перевірених чисел Фруда. Числа Фруда коливалися від 2,3 до 7,0. Схема Маккормака та дисипативна схема «два-чотири» використані для розв'язування основних рівнянь із дотриманням заданих кінцевих умов до досягнення стаціонарного стану.

У роботі [21] досліджено характеристики хвилеподібного гідравлічного стрибка потоку.

Ченсон Г. [22] досліджував появу хвилеподібних стрибків у водопропускних трубах. Він дійшов висновку, що в круглих водопропускних трубах потік можна передбачити, використовуючи припущення про критичний потік для чисел Фруда трохи вище одиниці, характеристики хвилястості вільної поверхні можна порівняти в більшості ситуацій, близьких до критичних.

А ідеальна теорія течії рідини може досить добре передбачити хвильові властивості. Однак зі збільшенням чисел Фруда кожен тип майже критичних потоків демонструє іншу поведінку, наприклад властивості течії хвилястих гідравлічних стрибків неможливо передбачити за допомогою теорій ідеальної рідини для більших чисел Фруда. Подібність між різними типами майже критичних потоків може забезпечити певний порядок величини для вільної поверхні хвилястості за майже критичних потоків.

У роботі [23] наведено результати експериментів, проведених в Університеті Саскачевану, щодо ефективності водопропускної труби. Вони виявили, що проєктування трохи більшої рами водопропускної труби вище за течією підвищує ефективність входу. Це дослідження, проведене на круглих водопропускних трубах, показало взаємозв'язок між стилями входу та ефективністю входу, виражений у вигляді коефіцієнта випуску, коли водопропускна труба працює з гасниками енергії на вході, і коефіцієнта втрат на вході, коли водопропускна труба працює з гасниками енергії на виході.

Оцу І. та ін. [24] оцінили початкові умови гідравлічного стрибка потоків через вертикальні пороги. Вони визначили два способи отримання початкового стрибка: збільшення висоти порогу або збільшення глибини нижньої води, доки поверхневий ролик (валик) не сформується вище за течією порогу.

Шталь Х. і Хагер В. [25] провели різні експерименти, аналізуючи гідравлічний стрибок у круглих трубопроводах. Вони зазначають, що в умовах стрибка, коли поверхня не може бути вільною, характеристики починають відхилятися від характеристик класичного гідравлічного стрибка. Це відхилення від класичного гідравлічного стрибка спонукало до вивчення водопропускних труб збільшеної висоти. Крім того, дослідження показало, що стрибки з малою глибиною відрізняються від стрибків із більшою глибиною приблизно на 30 % діаметра труби.

Тягі А. та ін. [26] провели багато експериментів для умов відкритої водопропускної труби. Оптимального розсіювання енергії було досягнуто шляхом розміщення одного порогу на відстані 40 футів від вихідного отвору для падіння на 24 фути. Фрикційні блоки та інші модифікації порогів були не такими ефективними.

Департамент транспорту штату Юта [27] розглядає аспекти зламаних водопропускних труб і гідравлічних стрибків у Посібнику з інструкцій штату, щодо дренажу доріг і водопропускних труб. Цей посібник ілюструє етапи проєктування зламаних водопропускних труб, які включають: 1) встановлення профілю водопропускної лінії; 2) визначення розміру водопропускної труби; 3) початок розрахунку надкритичного профілю; 4) завершення розрахунків профілю; 5) розгляд гідравлічних попереджень про стрибок. Розділ F дод. 9 посібника охоплює аспекти гідравлічних стрибків у водопропускних трубах, включаючи причину та наслідок, тертя імпульсу, порівняння кривих імпульсу і питомої енергії та потенційне виникнення гідравлічних стрибків. Посібник також ураховує послідовну глибину стрибка для прямокутних трубопроводів, круглих трубопроводів і трубопроводів інших форм.

Оцу І. та ін. [28] досліджували умови хвилеподібного гідравлічного стрибка в гладкому прямокутному горизонтальному каналі. Вони виявили, що утворення хвилястого стрибка залежить лише від числа Фруда. У діапазонах чисел Фруда вони виявили, що вплив співвідношення сторін і числа Рейнольдса на характеристики потоку був незначним. Під час експериментального дослідження було встановлено, що верхня межа чисел Фруда – 1,3—2,3 на припливі. Крім того, було встановлено, що число Фруда 1,7 є критичною точкою швидкості,

за якої приплив повністю розвивається. Вони розрахували відношення товщини межового шару до глибини носка стрибка, яке становило 0,45—1,0, що узгоджено з прогнозованими значеннями з експериментальних результатів.

Під час проєктування будь-якої водопропускної труби необхідно врахувати певні міркування. У «Гідравлічному проєктуванні водопропускних труб» [29] є перелік цих особливих міркувань, що включають, але не обмежені ерозією, седиментацією та контролем сміття, проходженням риби, контролем і вимірюванням потоку. Ерозію розглядають як розмив води на входах і виходах, що є дуже важливим питанням під час визначення ефективності водопропускної труби. Інша проблема, яка викликає занепокоєння, стосується економічних показників, що залежать від терміну служби, порівняння водопропускної труби та мостів, порівняння матеріалів і форм, а також аналізу ризиків. Цей посібник ілюструє необхідність того, щоб водопропускна труба була здійсненною та могла служити засобом захисту від розмиву води.

Бейрамі М. К. і Чамані М. Р. [30] розробили емпіричне рівняння для дослідження характеристик потоку за вертикального перепаду. Це рівняння використовує число Фруда для оцінювання відносних втрат енергії для надкритичного потоку. Отримане рівняння не обмежено діапазоном чисел Фруда; отже, також може оцінити характеристики докритичного потоку. Це рівняння порівняли з експериментальними даними, зібраними авторами, і визначили, що воно дуже близьке до фактичних лабораторних даних. Основну відмінність пояснюють залученням повітря та зсувом шару в нижній частині.

Департамент транспорту Техасу [31] розглядає пристрої захисту та контролю швидкості для водопропускних труб у Посібнику з гідравлічного проєктування штату. Цей посібник ілюструє необхідність вибору водопропускної труби за критеріями вартості будівництва та обслуговування; ризику невдачі; ризику пошкодження майна; безпеки руху; екологічних та естетичних міркувань; доцільності будівництва.

У розділі посібника, присвяченому водопропускним трубам, наведено процедуру проєктування, яка дає змогу інженеру-проєктувальнику наслідувати встановлені переліки інструкцій для належного проєктування та будівництва водопропускних труб. Ця процедура передбачає використання зламаної водопропускної труби для виконання вимог держави. У цій конструкції особливу увагу приділяють створенню гідравлічного стрибка, який допомагає зменшити швидкість виходу води. Це зменшення швидкості безпосередньо пов’язане зі зменшенням шкоди, завданої водним розливом навколо вихідного отвору водопропускної труби.

Ларсон Е. [32] пропонує розсіювати енергію у водопропускних спорудах шляхом примусового гідравлічного стрибка безпосередньо у водопропускній споруді для зменшення енергії води на виході і, отже, зменшити енергію, доступну для розмиву води. Було розглянуто два приклади проєктування для створення гідравлічного стрибка всередині водопропускної споруди: 1) прямокутний водозлив, розміщений на плоскому фартуху; 2) вертикальне падіння разом із прямокутним водозливом. Ці дві конструкції використані для дослідження енергетичного зниження енергії потоку на виході. З цих експериментів виявили, що обидві конструкції були ефективними для зниження швидкості на виході, імпульсу та енергії. Ці скорочення зменшать потребу в пом’якшенні розмиву вниз за течією.

Прості методи розсіювання енергії на водопропускних отворах Гочкісс Р. і Ларсон Е. [33] досліджують як можливість зменшення розмиву води навколо водопропускної труби через контроль води на виході. У цьому проєкті досліджено

ефективність простої водопропускної ємності біля вихідного отвору водопропускної труби проти водопропускної труби, яка має водопропускну сітку з перепадом вище за течією в стовбурі водопропускної труби. Сфера уваги для цих обстежень стосується повністю гідравлічного стрибка, який був або не був сформований. Розглянуті властивості стрибка включають геометрію та ефективність зменшення енергії. Дві конструкції призначені для зменшення енергії потоку на виході шляхом індукування гідравлічного стрибка всередині стовбура водопропускної труби без допомоги хвостової води [33]. Ці скорочення розглядають з точки зору відповідних чисел Фруда. Для цієї роботи діапазон чисел Фруда був від 2,6 до 6,0. Визначено, що обидві форми керування випуском здатні зменшити швидкість води, зменшуючи в такий спосіб енергію та імпульс.

Гідравлічна конструкція розсіювачів енергії для водопропускних труб і каналів від Федерального управління автомобільних доріг [34] дає інформацію про проєктування для аналізу та зменшення проблем, пов'язаних із розсіюванням енергії на виходах водопропускних труб і відкритих каналів. Рекомендовано використовувати розбиту задню конструкцію водопропускної труби як внутрішній розсіювач енергії. Запропонована конструкція водопропускної труби зі зламаною трубою обмежена такими умовами: 1) ухил крутої ділянки має бути меншим або дорівнювати 1,4:1 (V:H); 2) гідравлічний стрибок має бути виконано в межах водопропускного стволу.

Міньйо Е. та Сьєнфуегос Р. [35] зосередилися на експериментальному дослідженні розсіювання енергії та створення турбулентності у двох нерозвинених і частково розвинених слабких гідравлічних стрибках припливу, виміряних за допомогою мікро-ADV. Числа Фруда коливалися від 1,34 до 1,99. Для нерозвинутих стрибків припливу турбулентність здебільшого обмежена шаром зсуву, розташованим у верхній частині товщі води. Для частково розвиненого стрибка припливу спостерігають дві пікові області виникнення турбулентності: одна у верхньому шарі зсуву, друга в пристінній області. Крім того, виміряний розподіл розсіювання енергії в стрибках показує подібне поздовжнє спадання розсіювання енергії, інтегроване по секціях потоку, і максимальних значень виникнення турбулентності від проміжної області стрибка до його секції вниз за течією. Виявили, що підвищення максимальної турбулентної кінетичної енергії (TKE) і створення турбулентності в шарі зсуву були подібними.

Аліхані А., Бегрозі-Рад Р., Фатхі-Могадам М. [36] провели багато експериментів, щоб оцінити вплив безперервного вертикального торцевого порогу в заспокійливій ємності. Вони виміряли вплив положення порога на глибину та довжину гідравлічного стрибка без урахування глибини хвостової води. В експериментах вони використовували п'ять різних висот стінок, розташованих на трьох окремих поздовжніх відстанях, у своїй моделі в масштабі 1:30. Характеристики гідравлічного стрибка були виміряні та порівняні з класичним гідравлічним стрибком за змінними розрядами. Вони запропонували нове співвідношення між висотою і положенням порогу, а також співвідношення глибини та довжини басейну, дійшовши висновку, що зменшення довжини басейну на 30 % можна досягти шляхом ефективного контролю довжини гідравлічного стрибка через висоту стінки.

Протягом багатьох років було розроблено багато комп'ютерних програм, які допомагають інженерам у проєктуванні та оцінюванні певних типів водопропускних труб. Порівняно з традиційною експериментальною методологією чисельне моделювання має багато переваг, включаючи економію часу та коштів [37], що дає можливість широко

використовувати в механіці рідини для розв'язання проблем із математичними моделями, які надто складні, щоб забезпечити аналітичні рішення [38].

Висновки. Одним із слабких місць дорожніх водопропускних труб є зона нижнього б'єфу, що нерідко зазнає деформації, оскільки з виходом струменя з дорожньої водопропускної труби круглого перерізу в каналі трапецеїдальної форми з'являється збійність течії, утворюються водоворотні зони, формуються великі донні швидкості. Тому необхідно змусити потік води розтікатися без збійності, із більш сприятливою швидкісною структурою та зменшеними актуальними швидкостями у придонній області. Практична цінність отриманих результатів пов'язана з тим, що проаналізовано заходи з попередження та гасіння небезпечних форм руху потоків води в нижньому б'єфі дорожніх водопропускних труб.

Список використаних джерел

1. Ковшун В. Я. Швидкісна структура потоку в нижньому б'єфі трубчатого перепаду з кінцевим гасником. *Гідравліка і гідротехніка: Республіканський міжвідомчий науково-технічний збірник*. Київ, 1982. Вип. 34. С. 19—26.

2. Ліпіцький Г. О. Застосування гасника енергії при раптовому розширенні русла в нижньому б'єфі малої штучної споруди. *Гідравліка: Міжвідомчий республіканський науково-технічний збірник*. Київ: Техніка, 1965. Вип. 1. С. 194–201.

3. Гаркуша М. В. Аналіз конструкцій гасників надмірної кінетичної енергії водного потоку. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*. Київ: НТУ, 2024. Вип. 116. Ч. 1. С. 171–194. DOI:10.33744/0365-8171-2024-116.1-171-194.

4. Підвищення несучої здатності основ при будівництві споруд із металевих гофрованих конструкцій в умовах залягання слабких грунтів / А. М. Онищенко, В. В. Ковальчук, І. А. Карнаков та ін. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*. Київ: НТУ, 2024. Вип. 115. Ч. 2. С. 121–136. DOI:10.33744/0365-8171-2024-115.2-121-136.

5. Taha N., El-Feky M. M., El-Saiad A. A. & Fathy I. Numerical investigation of scour characteristics downstream of blocked culverts. *Alexandria Eng. J.* 2020. 59 (5): 3503–3513. https://doi.org/10.1016/j.aej.2020.05.032.

6. Othman Ahmed K., Amini A., Bahrami J., Kavianpour M. R. & Hawez D. M. Numerical modeling of depth and location of scour at culvert outlets under unsteady flow conditions. *J. Pipeline Syst. Eng. Pract*. 2021. 12 (4): 04021040. https://doi.org/10.1061/(ASCE)PS.1949-1204 .0000578.

7. Meegoda J. N., Juliano T. M. & Tang C. Culvert information management system. *Transp. Res. Rec.* 2009. 2108 (1): 3–12. https://doi.org /10.3141/2108-01.

8. Peter J. M. & Moore I. D. Effects of erosion void on deteriorated metal culvert before and after repair with grouted slip liner. *J. Pipeline Syst. Eng. Pract*. 2019. 10 (4): 04019031. https://doi.org/10.1061/(ASCE)PS.1949-1204.0000399.

9. Kilgore R. T., Bergendahl B. & Hotchkiss R. H. Culvert design for aquatic organism passage: Hydraulic engineering circular number 26. Rep. 2010. No. FHWA-HIF-11-008. Lakewood, CO: Central Federal Lands Highway Division.

10. Smith & Hallmark. New developments for erosion control at culvert outlets. *Highway Research Board Bulletin*. 1960. No. 286. Washington, DC: Highway Research Board.

11. Mamedov A. I. & Levy G. J. Soil erosion–runoff relations on cultivated land: Insights from laboratory studies Eur. *J. Soil Sci*. 2019. 70 (3): 686–696. https://doi.org/10.1111/ejss.12759.

12. Mohammed S. R., Nile B. K. & Hassan W. H. Modelling stilling basins for sewage networks. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng*. 2020. 671 (1): 012111. https://doi.org/10.1088/1757-899X/671/1/012111.

13. Azamathulla H. M. & Ghani A. A. ANFIS-based approach for predicting the scour depth at culvert outlets. *J. Pipeline Syst. Eng. Pract*. 2011. 2 (1): 35–40. https://doi.org/10.1061/(ASCE)PS.1949-1204.0000066.

14. Гаркуша М. В. Вплив пошкоджених гідротехнічних споруд транспортного будівництва з дорожніх водопропускних труб на навколишнє середовище. *Водопостачання і водовідведення: проектування, будівництво, експлуатація, моніторинг. V Міжнар. наук.-техн. конф., 11-13 жовтня 2023, Україна, Львів : зб. матер.* Київ: Ярочéнко Я. В., 2023. С. 82—83. DOI: https://doi.org/10.51500/7826-33-9.

15. Цивін М. Н. Дослідження експлуатаційних характеристик погашувача енергії активного типу. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво: міжвід. наук.-техн. зб.* 1999. Вип. 57. С. 209–213.

16. Gill M. A. Hydraulics of Rectangular Vertical Drop Structures. *Journal of Hydraulic Research*. 1979. Vol. 17, No. 4. P. 289–302.

17. Federal Highway Administration. Hydraulic Design of Energy Dissipators for Culverts and Channels. *Hydraulic Engineering Circular*. No. 14. Sept 1983.

18. Campbell C. S. and others. Flow Regimes in Inclined Open-Channel Flows of Granular Materials. *Powder Technology. Elsevier Sequoia*. 1985.

19. Bhutto H., Mirani S. and Chandio S. Characteristics of Free Hydraulic Jump in Rectangular Channel. *Mehran University Research Journal of Engineering and Technology*. 1989. 8(2). 34–44.

20. Gharanglk A. and Chaudhry M. Numerical simulation of hydraulic jump. *Journal of Hydraulic Engineering*. 1991. 117(9). 1195–1211.

21. Chanson H., and Montes J. S. Characteristics of Undular Hydraulic Jumps. Experimental Apparatus and Flow Patterns. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*. 1995. Vol. 121, No. 2. P. 129-144. Discussion : Vol. 123, No. 2 P. 161–164.

22. Chanson H. Free-surface flows with near-critical flow conditions. *Canadian Journal of Civil Engineering*. 1996. 23(6): 1272-1284. https://doi.org/10.1139/l96-936.

23. Smith C. & Oak A. Culvert inlet efficiency. *Canadian Journal of Civil Engineering*. 1995. 22. 611-616. DOI:10.1139/l95-069.

24. Ohtsu I. et al. Incipient jump conditions for flows over a vertical sill. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*. 1996. 122(8). 465–469. doi: 10.1061/(ASCE)0733-29(1996)122:8(465).

25. Stahl H. and Hager W. Hydraulic Jump in Circular Pipes. *Canadian Journal of Civil Engineering. CSCE*. 1998.

26. Tyagi A. K. et al. Energy Dissipation in Broken-back Culverts under Open Channel Flow Conditions. Am. Soc. Civil Engineers International Perspective on Current and Future State of Water Resources, 2010. 10 p.

27. Utah Department of Transportation. Manual of Instruction – Roadway Drainage and Culverts. 2004.

28. Ohtsu I. et al. Hydraulic condition for undular jump formation. *Journal of Hydraulic Research*. 2001. 39(2). 203–209.

29. Federal Highway Administration. Hydraulic Design of Highway Culverts. Report No. FHWA-NHI-01-020. No. 5. Sept 2001.

30. Beirami M. K. and Chamani M. R. Flow Characteristics at Drops. *Journal of Hydraulic Research*. 2002. Vol. 128, No. 8. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9429(2002)128:8(788)).

31. Texas State Department of Highways and Public Transportation. Bridge Division Hydraulic Design Manual. 2004.

32. Larson E. Energy dissipation in culverts by forcing a hydraulic jump at the outlet. Master's Thesis, Washington State University. 2004.

33. Hotchkiss R. and Larson E. Simple Methods for Energy Dissipation at Culvert Outlets. Impact of Global Climate Change. World Water and Environmental Resources Congress. 2005.

34. Federal Highway Administration. The Hydraulic Design of Energy Dissipaters for Culverts and Channels. 2006.

35. Mignot E. and Cienfuegos R. Energy dissipation and turbulent production in weak hydraulic jumps. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*. 2010. 136 (2). 116-121. https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.00001.

36. Alikhani A. et al. Hydraulic jump in stilling basin with vertical end sill. *International Journal of Physical Sciences*. 2010. 5(1). 25-29. http://www.academicjournals.org/IJPS.

37. Cristian B., Oprean C., Olivian C., Erdei Z., Neamtu L., Horgos M. & Popa A. The advantages of numerical analysis for claw pole alternator. *2014 International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering (EPE)*. 2014. 353–357. http://10.1109/ICEPE.2014.6969928.

38. Allaire G. Numerical Analysis and Optimization an Introduction to Mathematical Modelling and Numerical Simulation. Oxford University Press Inc., New York. 2007.

Гаркуша Микола Васильович, доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри мостів, тунелів та гідротехнічних споруд, Національний транспортний університет, м. Київ, Україна.
ORCID iD: https://orcid.org/0000-0002-5388-0561. Тел.: +38 (096) 628-79-05. E-mail: mykola.harkusha@ntu.edu.ua.

Harkusha Mykola, Associate Professor, PhD in Highways and Airfields (Candidate of Technical Sciences), Associate Professor of the Department of Tunnel Bridges and Hydraulic Structures, National Transport University, Kyiv, Ukraine.
ORCID iD: https://orcid.org/0000-0002-5388-0561. Tel.: +38 (096) 628-79-05. E-mail: mykola.harkusha@ntu.edu.ua.

Статтю прийнято 24.06.2025 р.

УДК 624.072.2

ПЛАНУВАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СТАЛЕВОЇ СІТКИ

Канд. техн. наук О. О. Калмиков, асп. В. В. Шматко

PLANNING OF AN EXPERIMENT TO DETERMINE THE PHYSICO-MECHANICAL CHARACTERISTICS OF STEEL MESH

PhD (Tech) O. Kalmykov, Postgraduate Student V. Shmatko

DOI: https://doi.org/10.18664/1994-7852.212.2025.336379

Анотація. *У статті подано науково обґрунтовану методику експериментального визначення фізико-механічних характеристик сталевих тросових сіток, які застосовують як гнучкі мембранні елементи в сучасних конструкціях. Зроблено огляд світових підходів для випробувань мембранних матеріалів, включаючи двовісні, рамкові та продавлювальні методики. Запропоновано конструкцію стенда, методику навантаження та систему вимірювань, що дає змогу врахувати ортотропну поведінку сітки та забезпечити її правильне моделювання в інженерному розрахунку.*

Ключові слова: *сталеві тросові сітки, фізико-механічні характеристики, ортотропність, експериментальні випробування, навантаження-прогин, випробувальна установка, мембранний елемент.*

Abstract. *The article presents a scientifically grounded experimental methodology for determining the physico-mechanical characteristics of steel cable meshes, which are increasingly used as flexible membrane elements in modern architectural and engineering structures. The research addresses a gap in standardized approaches to characterizing such materials, which exhibit pronounced orthotropic behavior due to the structural arrangement of steel cables in woven or ferruled configurations.*

A comprehensive review of international testing practices for membrane materials was conducted, including biaxial tensile tests, central deflection (bulge) tests, uniaxial tear tests, and puncture resistance methods. The article establishes strong methodological analogies between steel meshes and other anisotropic membrane materials such as technical fabrics, PVC membranes, and biological tissues, all of which require specialized multi-axial testing for accurate modeling.

The proposed methodology involves securing mesh samples in a rigid test frame and subjecting them to stepwise loading, simulating realistic stress conditions encountered in architectural and structural applications. The article outlines the design of the test rig, including flexible roller-based edge restraints that simulate hinged boundary conditions, force application protocols using incremental weights, and measurement strategies using force sensors and displacement tools. Particular attention is given to capturing orthotropic membrane behavior, including differential stiffness in longitudinal and transverse directions, shear deformability, and geometric nonlinearity under large deformations.

Importantly, the article provides a modeling framework based on treating steel meshes as orthotropic membranes within structural analysis software, such as RFEM, using experimentally derived material constants. This allows structural designers to integrate steel mesh components more reliably into load-bearing systems. The methodology aims to bridge the gap between manufacturer data and real-world performance, offering a practical verification tool for both product development and structural validation.

The conclusions emphasize the scientific and engineering benefits of adopting a unified testing protocol for steel meshes, aligning with global standards and improving structural safety and economic efficiency. Further experimental work is planned to validate the method with physical testing of various mesh configurations, ultimately leading to standardized procedures for the industry.

Keywords: *Steel cable meshes, physico-mechanical properties, orthotropy, experimental testing, load–deflection behavior, test rig, membrane element.*

Вступ. Гнучкі сітчасті огородження на основі сталевих тросів набувають дедалі більшого поширення в сучасних інженерних і архітектурних конструкціях. Зокрема, тросові сітки застосовують у зоопарках для вольєрів і авіаріїв, архітектурі як прозорі фасадні системи та огорожі, а також для забезпечення безпеки (антивандальні та протизалізні сітки) [1]. Такі сітки поєднують високу міцність і довговічність нержавіючої сталі з гнучкістю і прозорістю, що забезпечує мінімальну візуальну перешкоду та доступ світла. Завдяки конструкції з переплетених сталевих канатів сітка може набувати криволінійних форм і витримувати значні навантаження без руйнування, розподіляючи зусилля між тросами. Водночас особливістю роботи такої сітки є її ортотропність – різна жорсткість і несуча здатність уздовж двох основних напрямків плетення (вздовж і поперек). Це означає, що поведінка матеріалу сітки подібна до

мембрани чи тканини, де властивості в «основі» і «утоку» відрізняються. Для адекватного прогнозування напружено-деформованого стану сітчастих конструкцій потрібні спеціальні моделі матеріалу (ортотропні, нелінійно-пружні) і достовірні параметри, отримані експериментально.

На сьогодні виробники пропонують широкий діапазон типорозмірів сталевих тросових сіток. Наприклад, стандартні системи X-TEND від Carl Stahl доступні з комірками (ромбічними отворами) від 20 до 200 мм і канатами діаметром 1.5, 2.0 або 3.0 мм [2]. За даними виробника HMJ Zoo Design, тросові сітки можна виготовляти для конкретних вимог – діаметр тросів від ~1,2 до 3,5 мм, розміри комірок від 20×20 до 150×150 мм [3]. Міцність таких сіток є доволі високою: наприклад, сітка з канатом діаметром 1,6 мм з розміром комірки ~30×30 мм витримує ~2,1 кН (≈480 фунтів) розривного навантаження, а для каната 3,2 мм і комірки ~120×120 мм міцність становить близько 7,1 кН. Відомо, що тросові сітки здатні працювати як під статичними, так і динамічними навантаженнями. У літературі описано, зокрема, дослідження сітчастих огороджень від каменепадів, де випробування проводять із падінням важкого тіла для оцінювання енергоємності сітки [4]. Такі сітки (ланцюгові та тросові) в експериментах поглинають енергію до десятків тисяч кілоджоулів, демонструючи високі деформаційні здібності до та після пластичного деформування. Для перевірки працездатності під дією вітрових навантажень дослідники споруджують фрагменти фасадів розміром 5×9 м із натягнутими тросами діаметром ~14 мм і скляними панелями [5]. Повномасштабні експерименти дають змогу врахувати непередбачувані особливості роботи формоактивних сіткових структур під навантаженням. Для гнучких мембранних матеріалів (тканин, ПВХ-мембран) стандартною практикою є біаксіальні випробування – одночасне розтягування зразка у двох перпендикулярних напрямках [6], що необхідно для визначення анізотропних характеристик (модулів пружності вздовж основи і утоку, модулів зсуву тощо). Випробування тросових сіток є аналогічно важливими, адже дають змогу експериментально отримати ефективні параметри матеріалу сітки, необхідні для її правильного врахування з проєктуванням.

Отже, актуальним науково-практичним завданням є розроблення методики випробування сталевих сіток, яка враховує специфічний характер їхньої роботи (ортотропність, геометричну та фізичну нелінійність) і дає змогу визначити потрібні для інженерних розрахунків характеристики.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Двовісні розтягувальні випробування мембран

Для точного визначення властивостей мембранних матеріалів, особливо анізотропних, широко застосовують двовісні розтягувальні випробування (biaxial tensile tests). На відміну від стандартного одноосьового розриву, двовісне навантаження дає змогу одночасно прикладати напруження у двох перпендикулярних напрямках, що відтворює реальні умови роботи мембран (тканин, плівок тощо). Ще в 1991 році було описано спеціальний стенд для випробування мембранних біоматеріалів під двовісним навантаженням: зразок закріплювали по периметру (початково квадрат 12–25 мм) і сили прикладали до чотирьох точок на кожному боці, забезпечуючи розтяг до ~80 % початкової довжини [7]. У таких установках вимірюють зусилля (через датчики сили) і двовісні деформації центральної області зразка, щоб визначити пружні константи (модулі пружності в напрямках основи й утоку, коефіцієнти Пуассона) та інші характеристики матеріалу в умовах площинного напруженого стану.

Двовісні випробування стали фактично необхідним інструментом для оцінювання властивостей гнучких матеріалів, що працюють під багатовісним навантаженням. Зокрема, у біомедичних дослідженнях м'яких тканин (шкіра, судини, біомембрани) встановлено, що такі тканини є сильно анізотропними, тому одновісні тести не відображують їхню поведінку повною мірою. Планарні двовісні тести дають змогу випробувати зразок за навантажень, близьких до фізіологічних, і є суттєвими для правильного оцінювання механіки біоматеріалів [8]. Аналогічно, у галузі полімерних плівок і еластомерів двовісне розтягування використовують для побудови моделей матеріалу та перевірки їхньої придатності, оскільки деформації в умовах реальної експлуатації (наприклад у гумових мембранах, балонах тощо) є багатовісними.

Архітектурні тканини і ПВХ-мембрани також випробовують двовісно, адже вони мають різні властивості за напрямком основи та утоку (ортотропія). Для таких матеріалів розроблено стандартизовані методики. Зокрема, впроваджено міжнародні стандарти: японський стандарт MSAJ/M-02-1995 став першою широко визнаною методикою двовісного розтягу мембран [9]. На основі нього нещодавно розроблено ISO 13118:2024 [10] і відповідні європейські норми (наприклад DIN EN 17117 [11]), які визначають порядок визначення пружних характеристик тканин за двовісного навантаження. У таких тестах зазвичай застосовують хрестоподібні зразки або квадратні полотна, затиснуті по периметру рами і навантажені у двох напрямках із заданим співвідношенням напружень. Наприклад, стандарт MSAJ передбачає випробування за кількох співвідношень навантаження «основа:уток» (1:1, 2:1, 1:2 тощо) для повної характеристики ортотропного матеріалу. Це дає змогу визначити модулі пружності і міцність у кожному напрямку, а також урахувати вплив взаємодії ниток основи і утоку. Дослідники відзначають, що одноосьові випробування не здатні повністю охарактеризувати такі матеріали, тому двовісні тести є критично важливими [12]. Практика показує, що міцність і деформаційні характеристики за одночасного навантаження двома осями можуть відрізнятися від результатів окремих одноосьових випробувань. Так, у роботі [12] продемонстровано, що міцність тканини за рівномірного двовісного розтягування (1:1) виявляється вищою за міцність по утоку, але трохи нижчою за міцність по основі, тобто проміжною між двома одноосьовими значеннями. Це підтверджує необхідність двовісних тестів для правильного прогнозування поведінки мембранних матеріалів.

Випробування натягнутих мембран на прогин і продавлювання

Аналогічно до сталевої сітки, матеріали мембранного типу часто випробовують, закріпивши зразок по контуру жорсткої рами і навантажуючи його перпендикулярно до площини (на прогин або продавлювання). Такі експерименти імітують дію розподіленого навантаження (тиск вітру, гідростатичний тиск, ударний вплив) на натягнуту мембрану. Метод булевого (надувного) тесту є класичним прикладом: круглу або прямокутну мембрану затискають по краю і прикладають тиск, спричиняючи випинання (буління) зразка. За виміряною залежністю тиск–прогин можна визначити пружні характеристики тонких плівок і мембран, зокрема модуль Юнга, коефіцієнт Пуассона та залишкові напруження [13]. Булевий тест широко використовують для тонких полімерних плівок і покриттів (наприклад для визначення властивостей тонких металевих мембран у МЕМС або пластикових плівок) і вважають стандартною методикою для таких матеріалів. Він дає змогу випробувати матеріал у стані двовісного розтягування за дії рівномірного тиску, що подібне до умов

експлуатації (наприклад надуті оболонки, мембранні датчики тощо).

Існують стандартизовані варіанти таких тестів. Зокрема, у текстильній промисловості відомий тест на розрив через прорив (burst test), де зразок тканини затискають у кільцевому затискачі і продавлюють стальною кулькою або гідравлічною мембраною до розриву. На класичному приладі Маллена (Mullen Burst Tester) використано гідравлічний тиск для розриву тканини і визначення її міцності на прорив. Для технічних текстильних мембран і геомембран ASTM розробив випробування на прокол: наприклад, стандарт ASTM D4885 регламентує випробування широких смуг геосинтетичних мембран, закріплених по краях, шляхом їх розтягування до розриву за дії нормального навантаження [14]. Цей метод оцінює ефективну міцність полотна з урахуванням фіксації по ширині, що більш наближено до умов закріплення матеріалу в конструкції, ніж звичайний вузький зразок. Інший близький метод – випробування на прокол (puncture test) геотекстилю та сіток, де закріплений на рамі матеріал продавлюють штирем або пуансоном до прориву. Такі випробування показують опір мембрани локалізованому навантаженню, який залежить від розтягуваності та міцності матеріалу.

У контексті сталевих сіток, що розглядають як мембранні елементи, надзвичайно актуальними є випробування на концентроване продавлювання. У літературі описані численні експерименти, де зразок сітки або гнучкої сітчастої мембрани закріплюють по периметру, а в центрі до нього прикладають зосереджене навантаження (наприклад через плиту або сферичний вантаж). Показово, що такі тести давно застосовують для оцінювання протизсувних і протикамнепадних систем: випробовують гнучкі сітчасті покриття, як протигірничі укріплення, натягуванням сітки в рамі і статичним або динамічним навантаженням посередині [15]. Дослідження показали, що жорстко закріплена по краях сітка під зосередженим навантаженням демонструє нелінійну залежність «навантаження-прогин»: спочатку м’який прогин за рахунок вигину елементів, а далі різке зростання жорсткості з натягуванням сітки. Виявлено два основні механізми руйнування таких систем – прорив (прокол) сітки в місці прикладання навантаження та зсувне прослизання сітки по краях кріплення. Для їх урахування стандартизовано методики випробувань. Наприклад, в Італії введено стандарт UNI 2012, що описує протокол випробування гнучких сіток під локальним навантаженням. Отже, метод закріплення зразка в рамі і продавлювання його в центрі є загальноприйнятим для оцінювання міцності та жорсткості мембранних систем (у тому числі сіток) за позаплощинного навантаження.

Порівняння з одноосьовими розривними випробуваннями

Традиційні одноосьові розривні випробування (uniaxial tensile tests) залишаються базовим методом визначення міцності і деформативності матеріалів. У стандартах (наприклад ISO 1421 для технічних тканин) зазвичай використовують два варіанти: випробування смужки (strip test) і захоплення (grab test) [16]. У випробуванні смужки зразок заданої ширини затискають на повну ширину в розривну машину і розтягують до розриву, визначаючи міцність і відносне подовження. Метод захоплення передбачає затиснення лише частини ширини (імітує реальне захоплення тканини), що дає змогу оцінити міцність з урахуванням структури полотна (наявність незакріплених країв). Такі одноосьові тести стандартизовані й широко застосовувані (ISO 1421, ASTM D5035 тощо). Проте для мембранних матеріалів із вираженою ортотропією результати одноосьових випробувань є недостатніми. Одноосьово можна визначити міцність і модуль вздовж окремих напрямків (наприклад лише основи чи лише утоку

тканини), але міжосьова взаємодія та зсувні характеристики залишаються неврахованими. До того ж в одноосьовому тесті не відтворено реальний напружений стан, коли матеріал одночасно розтягнений у двох напрямках. У літературі зазначено, що для технічних текстилів результати одноосьових і двовісних випробувань можуть значно розрізнятися [12]. Зокрема, міцність за двовісного навантаження нерідко є нижчою за очікувану із сумування окремих розривних зусиль, оскільки навантаження розподілено інакше, а деформації ниток взаємопов'язані.

Іншим різновидом розривних випробувань для мембран є тести на розрив по шву чи надрізу (tear tests). Для тканин стандартно застосовують випробування на розрив із надрізом (наприклад трапецієподібний тест на роздирання), де вимірюють зусилля, необхідне для розповсюдження розриву через полотно. Це важливо для матеріалів на основі сітки або тканини, оскільки початковий розрив може далі збільшуватися між нитками. Такі тести доповнюють картину міцності мембрани, але теж не характеризують її поведінку під складним навантаженням. Тому повної картини можна досягти лише в такому поєднанні: одноосьові випробування дають базові міцнісні показники, двовісні – пружність і реальні робочі деформації, рамкові – зсувну гнучкість, а випробування на прогин/прокол – стійкість до позаплощинних сил. Кожен із методів доповнює інші, і тільки комплексний підхід дає змогу адекватно описати фізико-механічні характеристики ортотропної мембрани.

Ортотропія та анізотропія: урахування в методиках

Мембранні матеріали, такі як тканини, технічні плівки, біологічні мембрани та сітки, за своєю природою часто ортотропні або анізотропні, тобто їхні властивості розрізняються за різними напрямками в площині. Наприклад, у тканинах міцність і жорсткість вздовж ниток основи зазвичай відрізняється від аналогічних показників уздовж утоку, а взаємне переплетення ниток спричиняє суттєву зсувну податливість матеріалу. Сталева сітка як випробуваний матеріал також є яскравим прикладом ортотропного середовища: уздовж сталевих дротів вона має високу осьову жорсткість і міцність, тоді як за деформацій, що змушують дроти зближуватися або розходитися (зсув сітки, зміна кута комірок), опір значно менший. Крім того, залежно від конструкції сітки (плетена, зварна, ромбічна тощо) її поведінка може бути істотно анізотропною (різні характеристики по двох головних осях).

З огляду на це, експериментальні методики мають ураховувати ортотропність. Двовісні тести спеціально створені для вимірювання пружних констант ортотропних мембран – вони дають модуль пружності і міцність по кожній осі та коефіцієнти взаємного впливу (наприклад «м'якість» утоку за натягнутої основи). Одночасно з аналітичним моделюванням і чисельним розрахунком ортотропних оболонних матеріалів необхідно знати повний набір констант: E_x, E_y (модулі Юнга), G_{xy} (модуль зсуву) і коефіцієнти Пуассона ν_{xy}, ν_{yx}. Перелічені вище методики саме й націлені на експериментальне визначення цих параметрів. Зокрема, стандарт MSAJ/M-02-1995 рекомендує п'ять різних співвідношень навантажень для побудови повної поверхні «напруження-деформація» ортотропної мембрани [9]. Отже, серія двовісних випробувань дає змогу знайти пружні модулі Ex, Ey (зі співвідношень 1:0 і 0:1), коефіцієнти Пуассона (зі співвідношення 1:1, вимірюючи поперечні деформації) і модуль зсуву G_{xy} (із випробувань типу picture-frame або еквівалентних двовісних із несиметричним навантаженням). Без таких даних модель поведінки сітки чи тканини буде неповною. Тому підхід із натягуванням зразка на раму і багатоосьовим навантаженням є єдино

правильним для повноцінного опису анізотропних мембранних матеріалів.

Слід зазначити, що в деяких випадках для опису ортотропії застосовують спрощені підходи, наприклад визначають пружні константи з кількох одноосьових випробувань зразків, вирізаних під різними кутами до ниток (методика підкутових зразків). Однак для сильнозалежних від напрямку матеріалів цей підхід менш точний і не відображує взаємодії ниток під навантаженням [12]. Тому сучасні норми й дослідження одностайно сходяться на доцільності саме багатовісного випробування.

Аналогії та обґрунтування методики для сталевої сітки

Методика випробування сталевої сітки, закріпленої на жорсткій рамі з прикладенням навантаження (на розтяг або прогин) цілком спирається на напрацювання у сфері гнучких мембран. Сталеву сітку можна розглядати як особливий випадок технічної мембрани: вона тонка, працює переважно на розтягнення уздовж дротів і майже не чинить опору згину окремих елементів. Це подібно до поведінки тканин або сітчастих полімерних мембран, де основний опір – натяг уздовж волокон, а гнучкість – внаслідок зсуву між волокнами. Отже, для сталевої сітки застосовані ті самі експериментальні підходи, що й для текстильних архітектурних мембран чи геосинтетичних армувальних сіток.

По-перше, двовісне розтягування сітки (закріплення її по периметру рами та прикладення розтягувальних зусиль у двох напрямках) дає змогу визначити її ефективну розтяжність і міцність у кожному напрямку комірки, а також оцінити взаємний вплив натягу вздовж двох осей. Такі тести для сталевих сіток описані, зокрема, у контексті гірничої справи: проводили порівняльні випробування різних типів плетених і зварних сіток під двовісним навантаженням для оцінювання їхньої придатності як утримуючих мембран у шахтах [15]. Результати цих досліджень підтверджують, що параметри надійності сітки (наприклад навантаження, за якого вона досягає заданого прогину чи руйнування) залежать від напруження в обох напрямках сітки одночасно, а не лише від міцності окремого дроту.

По-друге, метод рамкового зразка з центральним навантаженням для сталевої сітки безпосередньо аналогічний до випробувань тканин на прогин і гнучких бар'єрних систем. Наприклад, у випробуваннях гнучких протикамнепадних систем сітчасті панелі 2×2 м закріплювали в рамі і навантажували концентрично, вимірюючи переміщення і напруження в дротах. Такі експерименти дають змогу виявити мембранний ефект: під навантаженням сітка спочатку прогинається зі згинанням дротів, а за великих переміщень дроти випрямляються і переймають значні осьові зусилля, різко підвищуючи несучу здатність (це явище називають тентовим ефектом або мембранною дією в інженерних конструкціях) [15]. Аналогічний мембранний ефект відомий і для тканинних мембран, і для легкого армованого бетону – коли велика прогинна деформація призводить до роботи на розтяг і підвищує міцність конструкції. Отже, випробування сталевої сітки на прогин у рамі дає змогу кількісно оцінити цей ефект (залежність навантаження від прогину) і порівняти її з мембранними матеріалами.

По-третє, завдяки численним аналогіям із тканинами методика випробувань сітки може бути обґрунтована посиланнями на стандарти для інших мембран. Наприклад, принцип закріплення сітки у квадратній рамі та рівномірного розтягнення відповідає підходам стандарту MSAJ для тканин [9]. А спосіб навантаження сітки сферичним індентором у центрі відповідає стандартним випробуванням на прокол текстильних або полімерних мембран (ASTM D4833, D5748 тощо). Тобто метод, застосований до сталевої сітки, не є чимось унікальним – він

є адаптацією перевірених експериментальних схем, використовуваних для оцінювання міцності і жорсткості гнучких оболонок.

І нарешті, залучення аналогій із різних матеріалів (тканин, ПВХ-мембран, біомембран) підсилює наукову обґрунтованість випробувань сталевої сітки. Якщо результати експериментів на сітці інтерпретувати з позицій теорії мембранної дії, розробленої для тканин, і порівняти з поведінкою інших відомих мембранних систем, це дасть змогу коректно сформулювати інженерні висновки. Уже зараз у літературі простежують тенденцію розглядати сталеві сітки як мембрани для стабілізації схилів або архітектурні оболонки. Наприклад, гнучкі фасадні сітки випробовують на стійкість до вітрового навантаження аналогічно до ПВХ-мембран фасадів ETFE, вимірюючи прогини та натяг в елементах. Застосування теоретичних моделей, створених для тканин (ортотропні моделі з урахуванням напружено-деформованого стану), до сталевих сіток уже підтверджено в окремих дослідженнях – вони адекватно прогнозують несучу здатність сітки за великих прогинів.

Огляд літературних джерел показує, що існує цілий арсенал експериментальних методик для визначення фізико-механічних характеристик мембранних матеріалів – від одноосьових розривних випробувань до двовісних тестів, рамкових зсувних методик і випробувань на прогин. Усі вони розроблені з урахуванням анізотропної природи таких матеріалів і доповнюють один одного. Сталева сітка, будучи ортотропною мембранною структурою, цілком підпадає під ці підходи. Використання аналогій із тканинами, ПВХ-плівками та біомембранами не лише виправдане, але й необхідне для коректної інтерпретації результатів: воно підтверджує, що методика з натягуванням сітки на раму та навантаженням її на розтяг/прогин є науково обґрунтованою і узгодженою зі світовою практикою випробування мембран. Такий міждисциплінарний підхід забезпечує високу достовірність отриманих характеристик і сприяє включенню сталевих сіток до загальної класифікації мембранних матеріалів в інженерній практиці.

Визначення мети і завдання дослідження.

Метою роботи є розроблення експериментальної методики визначення фізико-механічних характеристик сталевої тросової сітки на основі аналізу роботи і досвіду аналогічних випробувань, а також обґрунтування розміру і конструкції установки для випробувань. Для досягнення цієї мети вирішено такі основні завдання:

1. Проаналізувати сфери застосування і роботу сталевих тросових сіток за літературними джерелами; виявити особливості їхнього деформування (ортотропність, залежність жорсткості від натягу тощо) і наявні підходи щодо випробувань сітчастих і мембранних матеріалів.

2. Запропонувати конструкцію стенда (установки) для випробувань фрагмента сітки в лабораторних умовах, вибрати оптимальні параметри стенда (мінімальні розміри зразка, схема закріплення країв, спосіб навантаження), щоб результати можна було екстраполювати на реальні конструкції.

3. Розробити методику експерименту: порядок підготовки зразка сітки, початкового натягування, прикладання зовнішнього навантаження (циклічно, з наростанням), а також методи вимірювання деформацій (прогинів) і зусиль у сітці.

Основна частина дослідження. Як видно із результатів огляду аналогічних досліджень, для коректного опису фізико-механічних властивостей ортотропної мембрани необхідно знати значення набору матеріальних констант (рис. 1). Застосування методики моделювання сталевих сіток у вигляді мембран підтверджено рекомендаціями виробників програмного забезпечення, наприклад у

довідниках Dlubal вказано, що для моделювання кабельних сіток доцільно використовувати поверхневі елементи з еквівалентними ортотропними властивостями, які відповідають параметрам сітки за даними виробника, із наступним застосуванням формознаходження для введення попереднього натягу (рис. 2) [17].

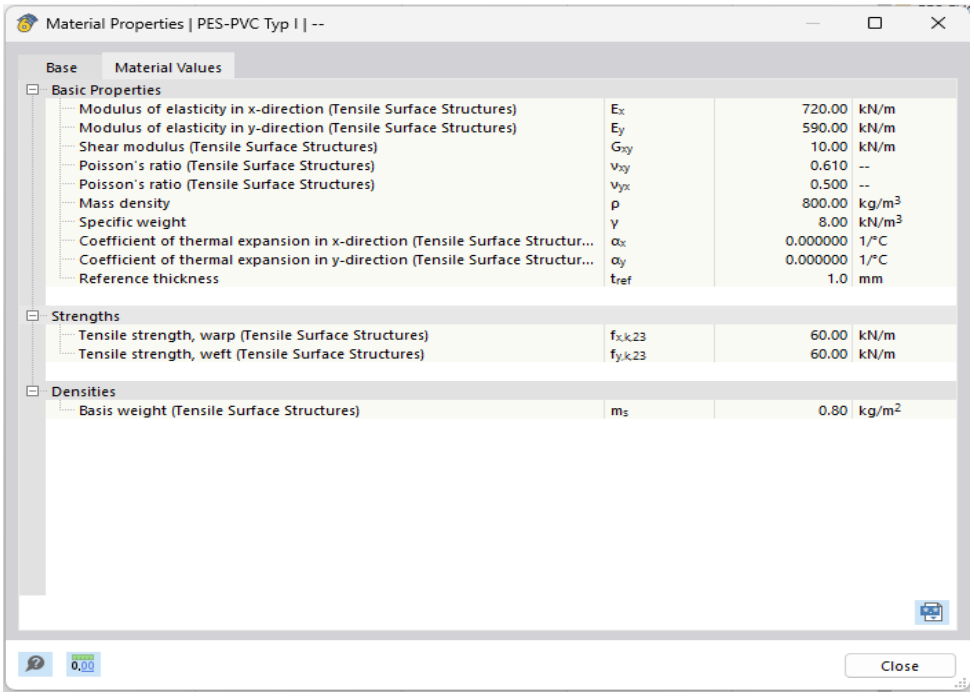


Рис. 1. Приклад матеріальних констант ортотропної мембрани, необхідних для визначення матеріалу в програмі RFEM6

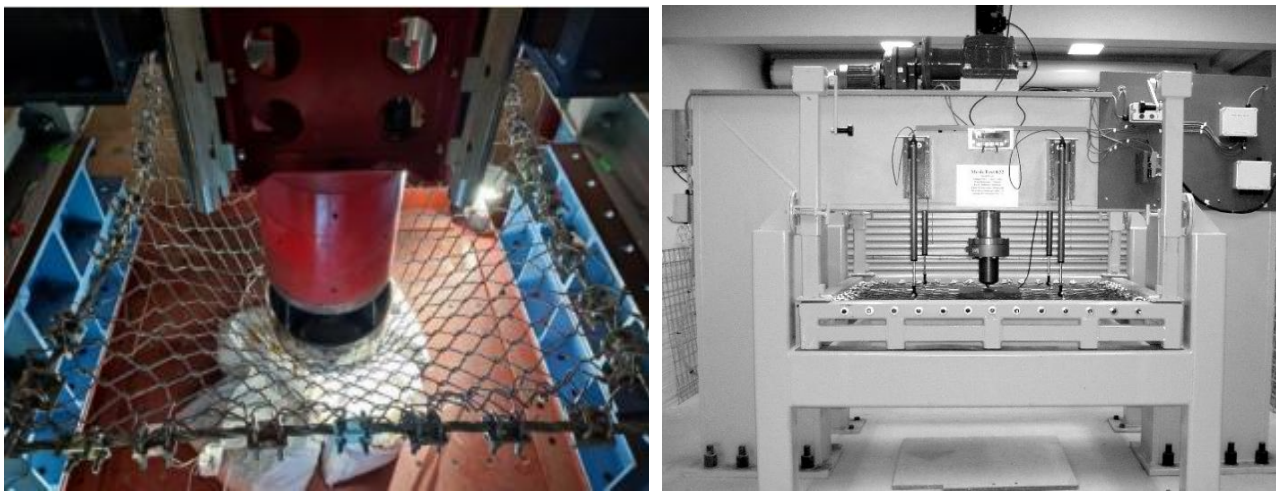


Рис. 2. Приклади розроблених експериментальних стендів для двовісних випробувань металевих сіток:
а – стенд, розроблений у Японії; б – стенд, розроблений в Австралії

Виходячи з огляду методик і способів випробувань, можна виділити декілька значущих прикладів експериментального визначення властивостей матеріалу металевих сіток.

Розробляючи власну методику, був урахований досвід розроблення саме цих експериментальних установок.

Об'єктом дослідження є гнучка сітка, сплетена зі сталевих канатів (тросів). Троси виготовлено з корозійностійкої сталі (зазвичай AISI 316) і з'єднано між собою у вузлах за допомогою обтискних втулок (ферул), у такий спосіб утворюється дрібновічкова сітка типу ferrule mesh. Діаметр тросів, як зазначено у вступі, може складати від ~1,5 до 3,5 мм [3]. Від розміру троса та кроку плетіння залежить розмір комірки сітки: типовий діапазон – від 20–30 мм (для дрібних сіток із тонкого каната) до ~150–200 мм (для крупних сіток із товстого каната) (рис. 3) [2, 3].

Рис. 3. Зовнішній вигляд зразків сіток:
а – фрагменти сіток у транспортному положенні;
б – комірки сіток у робочому положенні

Зважаючи на розміри реальних конструкцій із використанням металевих сіток, визначено, що мінімальний розмір досліджуваного зразка складає 1×1 м. У той же час з урахуванням необхідності оцінити масштабний фактор зміни результатів залежно від розміру зразка доцільним є випробування щонайменше трьох типорозмірів - 1×1, 1.5×1.5 і 2×2 м. Передбачено, що такі розміри дадуть змогу відслідкувати динаміку зміни властивостей матеріалу залежно від розміру фрагментів.

Для проведення експериментальних випробувань необхідно виготовити спеціальну рамну установку, щоб закріпити зразок сітки розміром до 3×3 м і навантажувати його в контрольований спосіб. Каркас установки доцільно виконати з гарячекатаного сталевого профілю. Горизонтальні елементи рами мають забезпечувати достатню жорсткість по периметру. Вертикальні опори можуть бути розбірними, щоб полегшити монтаж зразка.

На рис. 4 показано загальний вигляд випробувальної установки (3D-модель) з основними конструктивними елементами.

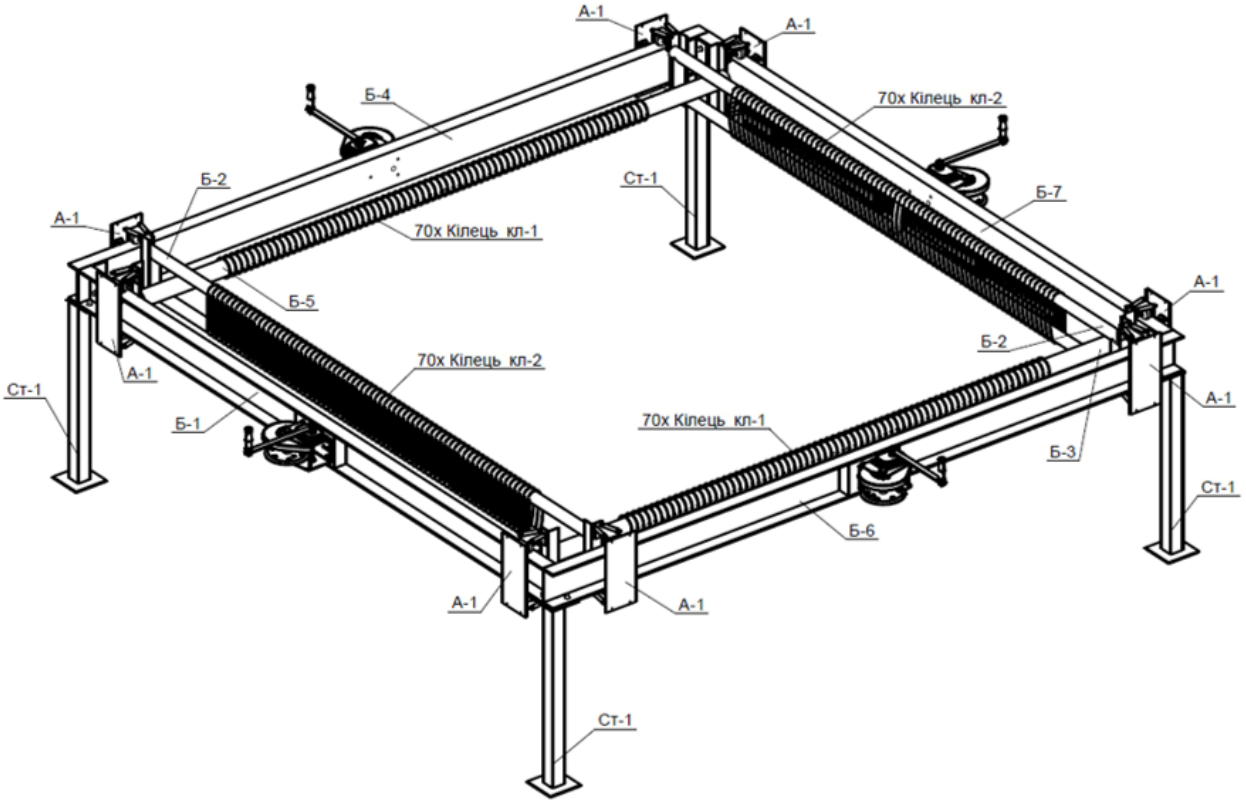


Рис. 4. Загальний вигляд випробувального стенда для сітки (фрагмент робочого креслення з позначенням елементів: Б-1…Б-7 – балки рами; А-1 – напрямні елементи роликові; Ст-1 – сталеві стояки-опори тощо)

Як видно з рис. 4, рама має суцільну квадратну форму. По краях рами розташовані напрямні елементи з роликами (позначення А-1), призначені для кріплення і натягування сітки. Вони виконують роль своєрідних пружинно-роликових вузлів. Краї сітки закріплюють на рухомих валах, що мають змогу рухатись незалежно один від одного і дають змогу сітці значно зміщуватися з навантаженням. Це рішення імітує шарнірне (рухоме) закріплення замість жорсткого затиснення, забезпечуючи рівномірніший розподіл зусиль і попереджаючи локальні розриви в кутах. Для установлення зразків у робоче положення на кожній із чотирьох сторін установки необхідно установити пристрій для натягу, наприклад ручну або гідравлічну лебідку з допустимим зусиллям 1500 кг кожна. До того ж у двох взаємоперпендикулярних напрямках необхідно встановити датчики зусиль (динамометри), які будуть фіксувати тягові зусилля вздовж кожного краю сітки.

Для моделювання локального навантаження необхідно передбачити можливість навантаження мірними вантажами. Навантаження необхідно прикладати в центрі фрагмента, що будуть випробувати. Навантаження необхідно збільшували ступінчасто – з кроком приблизно 5 кг, до максимально ~50 кг (для безпечної роботи зразка). Після досягнення максимального навантаження необхідно виконати плавне розвантаження. Такий цикл слід виконати не менше шести разів.

Під час експерименту необхідно знімати показники вертикального прогину

сітки в центрі під штампом, зусилля вздовж країв сітки в повздовжньому (X) і поперечному (Y) напрямках; а також фіксувати, за наявності, зміну геометричних розмірів сітки (розтягування між вузлами кріплення). Для вимірювання прогину необхідно використовувати лінійку, будівельний метр або лазерний далекомір, закріплений на рамі під сіткою. Таке експериментальне оснащення дасть змогу точно зафіксувати складний характер деформування гнучкої сітки під навантаженням.

Зусилля Nx і Ny необхідно реєструвати електронними динамометрами, встановленими у пружних вузлах кріплення з двох перпендикулярних сторін сітки. Зміну ширини та довжини сітки (Bx, By) необхідно відстежувати на кожному кроці прикладеного навантаження.

Отже, розроблена експериментальна методика теоретично буде давати змогу визначити необхідні дані для налаштування моделі сітки як ортотропної мембрани.

Висновки

1. Опрацьовано світовий досвід у сфері випробувань ортотропних мембран. На основі цього огляду розроблено науково обґрунтовану методику випробування сталевої тросової сітки, що включає конструкцію стенда, схему навантаження і систему вимірювань.

2. Запропоновано конструкцію випробувального стенда для випробування фрагментів сіток з урахуванням реальної схеми роботи і масштабного фактора, зберігаючи при цьому невеликі зручні в роботі габаритні розміри зразків.

3. Розроблено підхід для моделювання сітки як ортотропної мембрани, який дає змогу включати сітку в розрахункові моделі, використовуючи стандартні елементи оболонки. Зокрема, у програмному комплексі RFEM 6 рекомендовано моделювати сітку як поверхню з ортотропною або тканинною моделлю матеріалу, задаючи еквівалентні характеристики за даними виробника та результатами випробувань. Запропонована методика випробувань може бути використана для будь-яких типів тросових сіток задля уточнення їхніх розрахункових параметрів. Виробники сіток і проєктувальники конструкцій отримують інструмент для верифікації своїх продуктів і рішень. Отже, урахування реальної роботи сітки (за експериментом) може дати суттєвий економічний ефект і підвищити надійність конструкцій.

Перспективи подальших досліджень. Заплановано провести експериментальне дослідження зразків сіток за розробленою методологією. Застосування розробленої методики в проєктній практиці – наступний крок для стандартизації випробувань тросових сіток. Упровадження лабораторних тестів фрагментів сітки перед будівництвом повномасштабних споруд сприятиме підвищенню точності розрахунків і надійності унікальних інженерних рішень із сталевими сітками.

Список використаних джерел

1. Wiremesh.co.nz. Green facades X-tend mesh 534. URL: https://www.wiremesh.co.nz/e_productshow/?534-Green-facades-X-tend-mesh-534.html#:~:text=One%20common%20application%20for%20this,security%2C%20aesthetic%20appeal%2C%20and%20durability (дата звернення: 12.06.2025).

2. Carl Stahl DecorCable. «X-TEND® Stainless Steel Cable Mesh». Carl Stahl DecorCable. URL: https://decorcable.com/stainless-steel-mesh-x-tend/#:~:text=we%20can%20form%20various%20shapes,5%2C%202%2C%20or%203%20mm (дата звернення: 12.06.2025).

3. HMJ Zoo Design. «Stainless Ferruled Net». HMJ Zoo Design. URL: https://hmjzoodesign.com/product/stainless-ferruled-net/#:~:text=We%20can%20offer%20

configurations%20that,20%C3%9720%20mm%20to%20150%C3%97150%20mm (дата звернення: 12.06.2025).

4. Sugimoto M., Koizumi K., Arita T., Horiguchi T. Experimental study on structural behaviour of steel wire mesh under impact loading. *E3S Web of Conferences*, 2023, 415, 06017. DOI: https://doi.org/10.1051/e3sconf/202341506017 (дата звернення: 12.06.2025).

5. Celiker E. Y., Celik O. C. From design to experiment: proposed design procedures for full-scale structural testing of flat cable-net facades. URL: https://www.facadetectonics.org/papers/from-design-to-experiment#:~:text=facade%20is%20designed%20as%205%2C136,net%20facade%20are%20determined%20and (дата звернення: 12.06.2025).

6. Wikipedia contributors. Biaxial tensile testing. *Wikipedia, The Free Encyclopedia*. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Biaxial_tensile_testing#:~:text=Testing%20a%20material%27s%20tensile%20strength,along%20two%20perpendicular%20axes (дата звернення: 12.06.2025).

7. Nielsen P. M., Hunter P. J., Smaill B. H. Biaxial testing of membrane biomaterials: testing equipment and procedures. *J Biomech Eng.* 1991 Aug;113(3):295-300. DOI: 10.1115/1.2894887.

8. TestResources. Biaxial Testing of Membrane Biomaterials: Testing Equipment and Procedures. URL: https://www.testresources.net/applications/test-types/biaxial-test#:~:text=Soft%20biological%20tissues%20exhibit%20complex,properties%20under%20realistic%20loading (дата звернення: 12.06.2025).

9. MSAJ. MSAJ/M-02-1995. Методика двовісного розтягування матеріалів. MSAJ; 1995. Токіо, Японія.

10. Міжнародна організація зі стандартизації (ISO). ISO 13118:2024. Текстиль. Двовісні властивості тканин. Визначення еластичних властивостей за допомогою хрестоподібної проби. ISO; 2024.

11. Німецький інститут стандартизації (DIN). DIN EN 17117-1:2019. Текстильні матеріали з покриттям з гуми або пластмаси. Методи механічних випробувань при двовісних навантаженнях. Ч. 1. Властивості жорсткості на розтягнення. DIN; 2019.

12. Bletzinger K.-U., Oñate E., Kröplin B. (Eds). VIII International Conference on Textile Composites and Inflatable Structures. Structural Membranes 2017. Chen W. J., Shi T. B., Gao C. J., Hu J. H., Zhao B. Experimental Method for Biaxial Tensile Strength of Fabrics and Preliminary Investigations. 2017. Шанхай, Китай.

13. Grigoras C. C., Zichil V., Ciubotariu V. A., Cosa S. M. Machine Learning, Mechatronics, and Stretch Forming: A History of Innovation in Manufacturing Engineering. *Machines.* 2024. 12(3). 180. DOI: https://doi.org/10.3390/machines12030180 (дата звернення: 12.06.2025).

14. ASTM International. ASTM D4885-01(2018). Standard Test Method for Puncture Resistance of Protective Clothing Materials. ASTM; 2018.

15. Morton E., Thompson A. G., Villaescusa E., Roth A. Testing and analysis of steel wire mesh for mining application of rock surface support. In: *Proceedings of the ISRM Congress*, Lisbon, January 2007.

16. ISO. ISO 1421:2016. Rubber- or plastics-coated fabrics. Determination of tensile strength and elongation at break. ISO; 2016.

17. Dlubal Software. FAQ 004849: Як змоделювати структуру сітки з кабелів за допомогою додаткового модуля RF-FORM-FINDING. 2020. URL: https://www.dlubal.com/en/support-and-learning/learning/videos/002087 (дата звернення: 12.06.2025).

Калмиков Олег Олександрович, кандидат технічних наук, доцент кафедри будівельних конструкцій, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова.
E-mail: oleg.kalmykov@kname.edu.ua. ID ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7294-4279.

Шматко В’ячеслав Володимирович, аспірант кафедри будівельних конструкцій, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова. E-mail: viacheslav.shmatko@kname.edu.ua. ID ORCID: https://orcid.org/0009-0001-8765-073X.

Oleg Kalmykov, PhD (Tech), Associate Professor, Building Structures department. O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. E-mail: oleg.kalmykov@kname.edu.ua. ID ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7294-4279.
Viacheslav Shmatko Postgraduate student, Building Structures department. O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. E-mail: viacheslav.shmatko@kname.edu.ua. ID ORCID: https://orcid.org/0009-0001-8765-073X.

Статтю прийнято 24.06. 2025 р.

УДК 624.01

ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ БАЛОК ІЗ НЕЗНІМНОЮ 3D-ДРУКОВАНОЮ ОПАЛУБКОЮ

**Кандидати техн. наук П. А. Резнік, О. І. Лугченко,
аспіранти А. В. Володимиров, В. В. Тенесеску, Д. А. Алатаєв, О. О. Булдаков**

NUMERICAL ANALYSIS OF 3D PRINTED PERMANENT FORMWORK FOR REINFORCED CONCRETE

PhD (Tech.) P. Reznik, PhD (tech.) O. Lugchenko, postgraduate student A. Volodymyrov, postgraduate student V. Tenesesku, postgraduate student D. Alatayev, postgraduate student O. Buldakov

DOI: https://doi.org/10.18664/1994-7852.212.2025.336411

Анотація. *У статті досліджено конструктивну доцільність використання незнімної опалубки, виготовленої за допомогою технології 3D-друку бетоном, для залізобетонних балок з урахуванням їхньої інтеграції в сучасні системи забудови. Актуальність дослідження обумовлена потребою в інноваційних рішеннях для відновлення пошкоджених великопанельних будівель (ВПБ) у післявоєнній Україні з урахуванням обмежень традиційних технологій і значного потенціалу технології 3D Concrete Printing (3DCP).*

Ключові слова: *незнімна опалубка, 3D-друк бетоном, напружено-деформований стан, великопанельні будинки, відбудова.*

Abstract. *This study explores the structural viability of 3D-printed permanent formwork for reinforced concrete beams, focusing on their integration into construction systems. The research addresses the urgent need for innovative reconstruction solutions for large-panel buildings (LPS) in post-war Ukraine, emphasizing the limitations of traditional methods and the transformative potential of 3D Concrete Printing (3DCP) technology. A numerical analysis of 32 beam configurations with varying reinforcement schemes was conducted to evaluate their load-bearing capacity, stiffness, and stress distribution. The findings highlight that incorporating 3DCP formwork with moderate reinforcement increases load-bearing capacity by up to 77 %, while enhanced reinforcement configurations achieve improvements of up to 177 %. Beams with 3DCP formwork demonstrate significant stiffness enhancements, with only a 15% increase in deflection under 76.8 %*

higher loads compared to conventional beams. However, stress concentrations in the formwork exceeded allowable tensile limits, underscoring the need for additional reinforcement in critical areas to prevent failure. This study underscores the practicality of 3DCP technology for structural applications, offering improvements in material efficiency, construction speed, and sustainability. The integration of digital fabrication and advanced structural design presents a robust framework for future applications in post-war reconstruction and beyond. Further experimental validation and optimization are required to address identified limitations and refine the proposed systems.

Keywords: *permanent formwork, 3D concrete printing, stress-strain state*, *large-panel buildings, reconstruction.*

Вступ. Масштабні руйнування, спричинені воєнною агресією російської федерації, зумовили нагальну потребу в пошуку інноваційних стратегій відновлення житлового фонду України [1]. Однією з найбільш уражених категорій забудови є великопанельні будинки, які складають значну частину житлового фонду країни (рис. 1). Ці споруди були розроблені у другій половині XX ст. як рішення для швидкої та економічної урбанізації, проте сьогодні ці об'єкти пов'язані із суттєвими викликами в частині реконструкції. Основні труднощі пов'язані з відсутністю функціонуючих підприємств збірного домобудівництва та конструктивними обмеженнями, притаманними традиційним методам зведення.

Рис. 1. Наслідки авіаційного удару по будівлі ВПБ за адресою м. Харків, вул. Метробудівників, 40 (24 вересня 2024 р.)

Попри високу ефективність у процесі масового житлового будівництва, сьогоднішній стан великопанельних будинків виявляє критичні недоліки

відновлення. Більшість заводів із виробництва збірних панелей не функціонує, а отже, традиційні підходи для реконструкції стають неактуальними. Ускладнює ситуацію й використання класичних опалубних систем, які є трудомісткими та малопридатними для конструкцій нестандартних геометричних форм. До того ж інтеграція нових елементів у вже зруйновані або деформовані структури часто потребує високих витрат і складних технічних рішень.

Альтернативним і перспективним рішенням є застосування технології тривимірного бетонного друку (3D Concrete Printing, 3DCP), яку сьогодні розглядають як потенційно революційний інструмент відновлення [2]. Зокрема, за допомогою неї можна створювати системи незнімної опалубки для основних конструктивних елементів, таких як колони, балки та плити [3]. Інноваційність підходу полягає у відмові від традиційного формотворення, що сприяє масштабованості, зменшенню трудомісткості на будівельному майданчику та пришвидшенню монтажу конструкцій. Неодноразово продемонстровано [4-6], що 3DCP-технологія забезпечує створення топологічно оптимізованих конструкцій, здатних інтегруватися в наявні системи каркаса, при цьому зберігаючи або перевищуючи просторову жорсткість вихідних рішень.

Окрім завдань відновлення, технологія 3D-друку має низку переваг для нових об’єктів капітального будівництва. Це відкриває можливості для проєктування індивідуальних конструктивних рішень, зокрема із нестандартними прольотами, варіативною несучою здатністю та інноваційними схемами каркаса. Інтеграція друкованої опалубки до несучої системи дає змогу підвищити загальну ефективність конструкцій, одночасно забезпечуючи архітектурну свободу. Такий підхід підтримує розвиток безбалкових систем перекриттів, поверхонь подвійної кривизни та нестандартної геометрії, які раніше були технологічно обмежені в умовах масового будівництва.

Слід зазначити, що технологія 3DCP органічно поєднана з принципами сталого будівництва. Точність цифрового формування забезпечує мінімальні втрати матеріалу, а гнучкість технології дає змогу використовувати перероблені або альтернативні сировини [7]. Це особливо актуально в контексті повоєнного відновлення, де основним буде ефективне використання ресурсів та екологічна доцільність, через що 3DCP можна розглядати як перспективний підхід для формування нової міської інфраструктури України на етапі відбудови.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Зараз суттєво зростає світова зацікавленість до технології 3D-друку взагалі та окремо – до методу 3DCP. За тематикою вибраного дослідження слід відзначити такі роботи. У роботі [8] висвітлено трансформаційний вплив використання незнімної опалубки, виготовленої за технологією 3D-друку, у контексті вдосконалення сучасних будівельних методів. Повномасштабні зразки плит перекриття (рис. 2), виготовлені з використанням 3DCP, демонструють, як за допомогою топологічної оптимізації та індивідуалізованих траєкторій друку можна точно контролювати геометрію і експлуатаційні характеристики елементів. Такий підхід підвищує ефективність і сталість будівництва, хоча водночас залишаються невирішеними питання матеріалознавчих характеристик, масштабування та логістики.

У роботі [9] досліджено системи ребристих плит перекриття, у яких поєднано самоущільнювальний бетон із незнімною опалубкою. Зазначено, що вони дають змогу зменшити витрати матеріалу до 40 %, зберігаючи при цьому несучу здатність і адаптивність конструкції. Проте проблеми недостатньої жорсткості опалубки, тривалого часу друку та складності розпалубки вказують на необхідність подальшого вдосконалення систем.

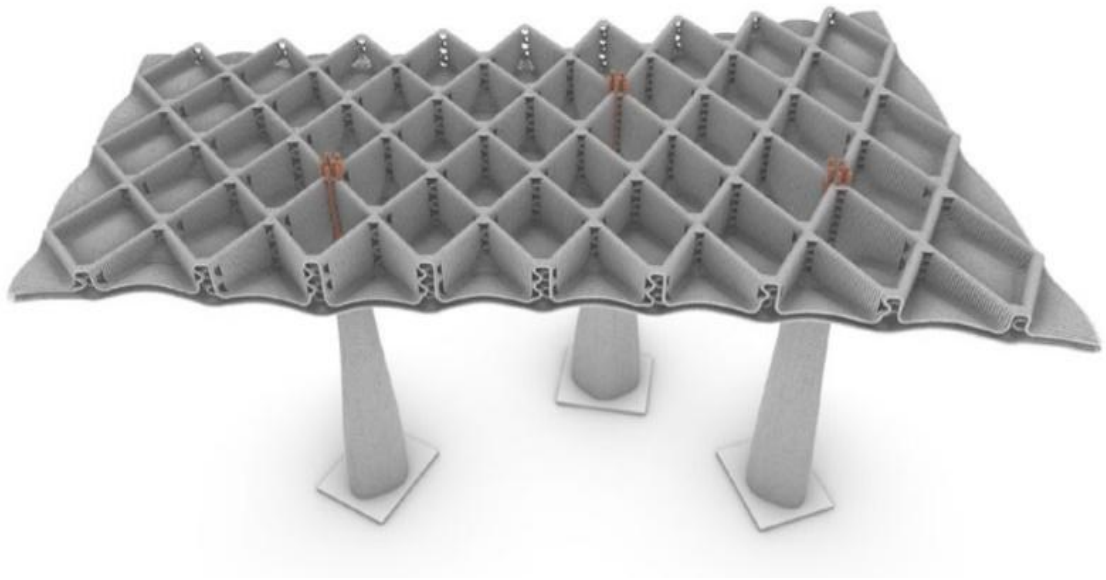


Рис. 2. Приклади конструкцій незнімної опалубки, надрукованих за технологією 3DCP [9]

Інноваційні приклади застосування ультратонкої незнімної опалубки з вторинного PET-G-пластику [10] демонструють потенціал для створення нетипових об'єктів, зокрема павільйонів зі складною колонно-плитною конфігурацією. Цей підхід поєднує роботизований друк і традиційне бетонування, забезпечуючи як гнучкість проєктування, так і економне використання матеріалу, водночас розв’язуючи проблеми, пов’язані з обмеженням прольотів і високою трудомісткістю.

Низку досліджень зосереджено на аналізі структурної ефективності незнімної опалубки, надрукованої на 3D-принтері, насамперед для балок і колон. Так, у роботі [11] наведено підвищення згинальної жорсткості залізобетонних балок на 14.3 % завдяки застосуванню ребристих інтерфейсів і з'єднань, які забезпечують роботу зсуву, що суттєво покращило інтеграцію між шарами. Проблему розшарування, викликану невідповідністю жорсткостей матеріалів, автори розв’язували через оптимізацію шорсткості поверхні та покращення інтерфейсних контактів. Це свідчить про практичну доцільність використання 3D-друкованої опалубки для зниження матеріаломісткості й підвищення ефективності будівництва.

Паралельно досліджували залізобетонні колони [12], для яких було зафіксовано помітне зростання жорсткості та несучої здатності порівняно з традиційними технологіями. Це пояснено поліпшеним зчепленням на поверхні та підвищеною міцністю бетону. Проте залишаються відкритими питання про пористість і адгезію між шарами, що потребують подальших досліджень. Загалом результати підтверджують потенціал незнімної опалубки з 3D-друку в контексті сталого й ефективного будівництва, що базовано на сучасних технологіях цифрового формування.

Окремий напрям досліджень стосується удосконалення підходів для моделювання та вивчення властивостей матеріалів. У роботі [13] запропоновано два підходи на основі методу скінченних елементів (VoxelPrint і CobraPrint), які дають змогу оптимізувати параметри друку (швидкість, товщину шару) і прогнозувати стійкість і запобігати руйнуванню. VoxelPrint забезпечує вищу швидкість, а CobraPrint показує кращу точність для

складної геометрії, що сприяє інтеграції цифрових симуляцій у процес 3D-друку.

У роботі [14] проаналізовано анізотропні властивості бетону, надрукованого за допомогою 3D-принтера. Встановлено, що якість міжшарового зчеплення критично впливає на міцність: гранична міцність на стиск максимальна в напрямку X (уздовж шару), тоді як згинальна міцність у цьому ж напрямку найменша. Автори показали, що за рахунок оптимізації геометрії сопла й обробки інтерфейсу можна покращити несучу здатність елементів, що також продемонстровано в роботі [15].

Останні дослідження підтверджують потенціал технології 3DCP щодо підвищення сталості будівництва. Наприклад, показано, що ребристі плити перекриття, виготовлені за допомогою 3D-друку, дають змогу знизити витрати бетону на 40–50 % з одночасним покращенням акустичних і міцнісних характеристик [16]. Однак у впровадженні залишаються бар'єри: вартість технологій, проблеми переробки незнімної опалубки та необхідність оптимізації технологічного процесу [7].

Також наведено переваги округлих геометричних форм опалубки – опір гідростатичному тиску зростає на 50 %, за результатами повномасштабних випробувань [17]. Проте й тут є обмеження, такі як деградація матеріалу й тривалий час друку складних елементів, що стримують масштабування таких рішень.

Наявні на сьогодні дослідження [11–14, 16-19] підтверджують, що незнімна опалубка, надрукована за допомогою 3DCP, є трансформаційним нововведенням, здатним виконувати як функцію формотворення, так і конструктивну роль несучого елемента. Ця технологія дає суттєві переваги, серед яких спрощення технологічних процесів, зменшення відходів матеріалів, підвищення гнучкості та адаптивності до нестандартних проєктних рішень, а також підтримка принципів сталого будівництва [7].

Разом із тим, попри наявні переваги, сучасний стан наукових досліджень вказує на істотні прогалини, що стримують ефективне впровадження 3DCP у широкомасштабному будівництві. Зокрема, роботи [13, 14] зосереджені переважно на лабораторних експериментах, що дає змогу отримати цінні дані про міжшарову адгезію та анізотропію, але не охоплює низку прикладних викликів, таких як повномасштабна інтеграція в складні конструктивні системи, логістика транспортування елементів, організація монтажу і стикування.

Крім того, більшість наявних досліджень не враховують довгострокову роботу та експлуатаційну довговічність 3D-друкованих елементів у реальних умовах, зокрема в обмежених ресурсних середовищах, характерних для післявоєнних програм реконструкції. Зазначені обмеження формують чіткий запит на проведення комплексних досліджень, що поєднують теоретичні досягнення з практичними рішеннями, орієнтованими на масштабування, надійність і довговічність конструкцій, створених із використанням технології 3D-друку.

Визначення мети та завдання дослідження. Мета дослідження – сформувати науково обґрунтовану базу для подальшого застосування подібних інноваційних конструктивних рішень у практиці будівництва та реконструкції.

Робота структурована за такими основними завданнями:

1. Оцінити конструктивну ефективність незнімної опалубки, виготовленої методом 3D-друку, шляхом визначення її внеску в несучу здатність і жорсткість залізобетонних балок за різних схем армування.

2. Проаналізувати розподіл напружень та ймовірні механізми руйнування в композитних балках, зокрема можливість тріщиноутворення через перевищення розтягувальних напружень в опалубці.

3. Розробити і верифікувати числові моделі для аналізу конструкцій, зокрема моделі, побудовані методом скінченних елементів (МСЕ), з метою точного моделювання взаємодії між опалубкою та залізобетонним ядром.

4. Порівняти конструктивну ефективність різних конфігурацій перерізів, кількісно оцінивши покращення несучої здатності, жорсткості та ефективності використання матеріалу.

Основна частина дослідження. На основі структурної системи, запропонованої в роботі [2] (рис. 3), розроблено й адаптовано проєкт, поданий до конкурсу Norman Foster Foundation Kharkiv Housing Challenge [20]. Концепція реконструкції 16-поверхового житлового будинку за адресою вул. Наталії Ужвій, 82 в м. Харкові, включає сім типів колон, десять типів балок і тринадцять типів плит перекриття, що підкреслює модульність і адаптивність запропонованих конструктивних рішень. Для зовнішніх фасадних елементів передбачено вісім типів балконних плит і два типи колон (рис. 4). Масове впровадження будь-яких новітніх конструктивних рішень потребує виконання цілих серій чисельних і натурних досліджень. Вони мають охоплювати оцінювання окремих елементів конструктивної системи, таких як балки, колони та плити, а також аналіз поведінки вузлів з'єднання та загальної роботи будівлі в цілому.

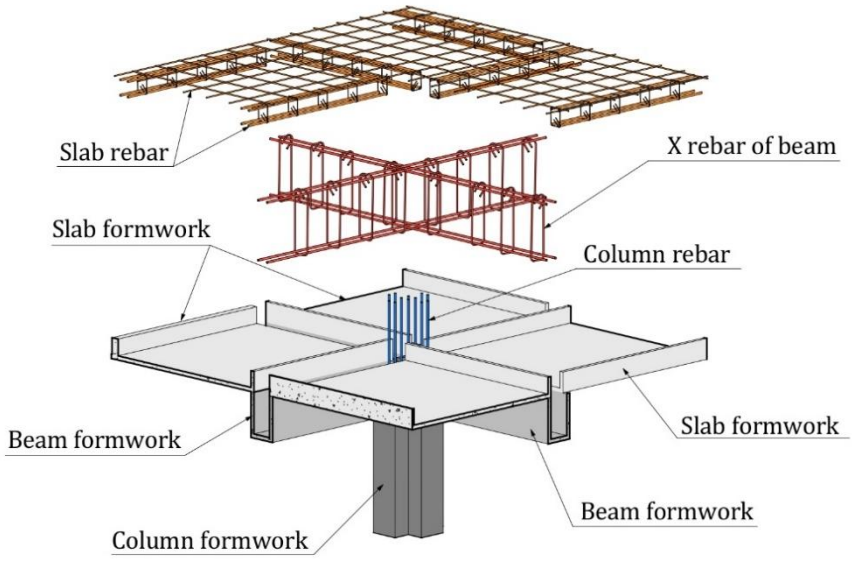


Рис. 3. Загальний вигляд каркасної системи, сформованої з використанням незнімної опалубки, виготовленої за технологією 3D-друку

Ця робота присвячена саме чисельному аналізу балок, що містять незнімну опалубку, виготовлену за технологією 3D-друку (рис. 5). Основну увагу приділено оцінюванню їхньої несучої здатності та компонентів напружено-деформованого стану, а також обґрунтуванню необхідності додаткового армування 3DCP-опалубки.

У межах цього дослідження використано такі матеріали: для залізобетонного ядра балок застосовували бетон класу С25/30; для незнімної опалубки – суміш для 3D-друку Ceresit із розрахунковим опором до стиску $f_{ck,\,prism}$ = 15 МПа і розрахунковою міцністю на розтяг за згину f_{ctm} = 0.8 МПа.

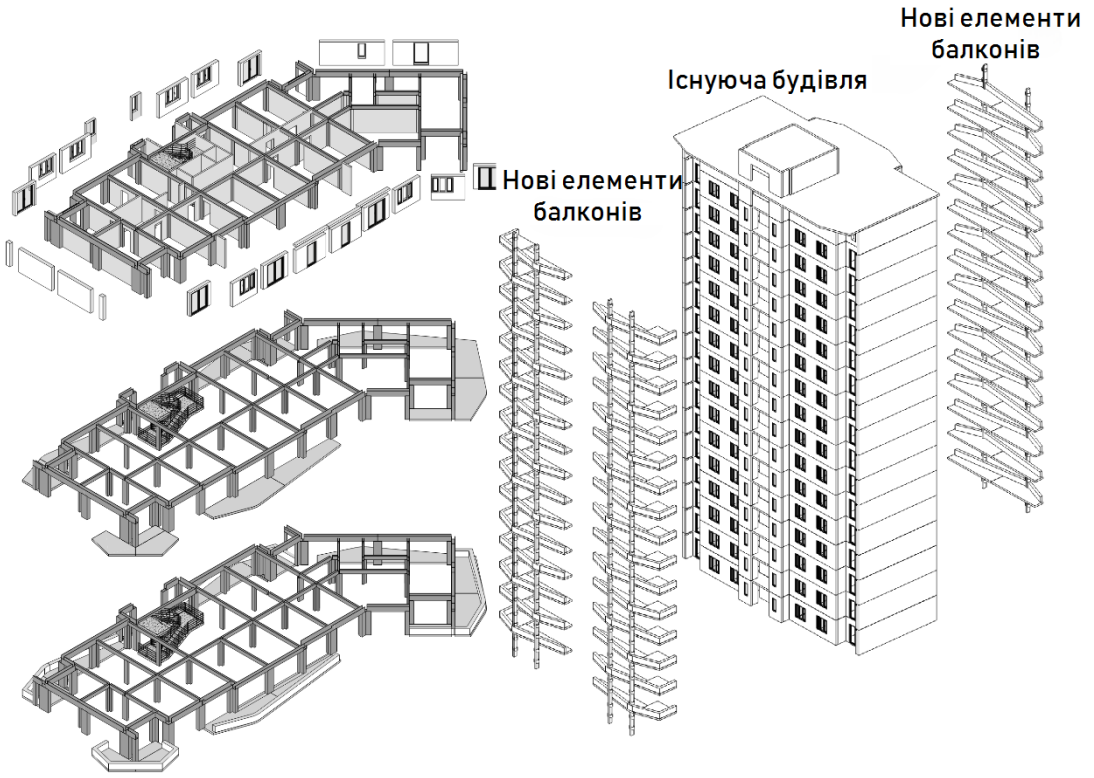


Рис. 4. Будівельна система [2], що передбачає модульні конструктивні елементи для реконструкції 16-поверхового житлового будинку

Рис. 5. Зразки залізобетонних балок з інтегрованою незнімною опалубкою, виготовленою за технологією 3D-друку (3DCP)

Слід зазначити, що на практиці елементи, виготовлені за технологією 3D-друку, можуть демонструвати різні граничні значення міцності залежно від того, навантаження прикладене паралельно чи перпендикулярно до напрямку нанесення шарів [14]. Проте в цьому дослідженні анізотропні властивості матеріалу не враховувано, оскільки їх необхідно підтвердити експериментально. Фактичні

значення міцності значною мірою залежать від геометричних параметрів шару (висота, ширина), які потребують уточнення під час лабораторних випробувань. Отже, результати цієї роботи є первинною оцінкою несучої здатності запропонованих конструктивних рішень.

Переріз залізобетонного ядра балки становить 130×275 мм, тоді як товщина незнімної 3DCP-опалубки – 25 мм. З урахуванням опалубки загальні розміри (брутто-переріз) балки складають 180×300 мм. Для визначення впливу різних конфігурацій на конструктивну ефективність були проаналізовані кілька типів композитних балок із різними схемами армування (рис. 6).

Аналіз включав випадки, де 3D-друкована опалубка не врахована в несучій здатності перерізу – оцінювали лише монолітну частину з армуванням у верхній (без армування, 2Ø12 A500C, 2Ø14 A500C) і нижній зонах (2Ø12 A500C, 2Ø16 A500C, 2Ø18 A500C, 2Ø20 A500C). Ці конфігурації позначені як UCore 1–8 (рис. 6, а).

Інша група конфігурацій ураховувала спільну роботу незнімної опалубки та залізобетонного ядра без армування в опалубці за тих самих схем армування у верхній і нижній зонах. Вони позначені як UFull 1–8 (рис. 6, б).

Наступна серія – UFull 9–16 – включала помірне армування в опалубці (2Ø8 A500C) за тих самих схем армування в основному бетонному ядрі (верхня і нижня зони) (рис. 6, в).

Остання група – UFull 17–24 (рис. 6, г) – передбачала посилене армування в опалубці (2Ø10 A500C), з аналогічним армуванням у верхній і нижній зонах, що дає змогу оцінити граничний потенціал несучої здатності композитних балок.

Загалом було проаналізовано і розраховано 32 варіанти поперечних перерізів балок.

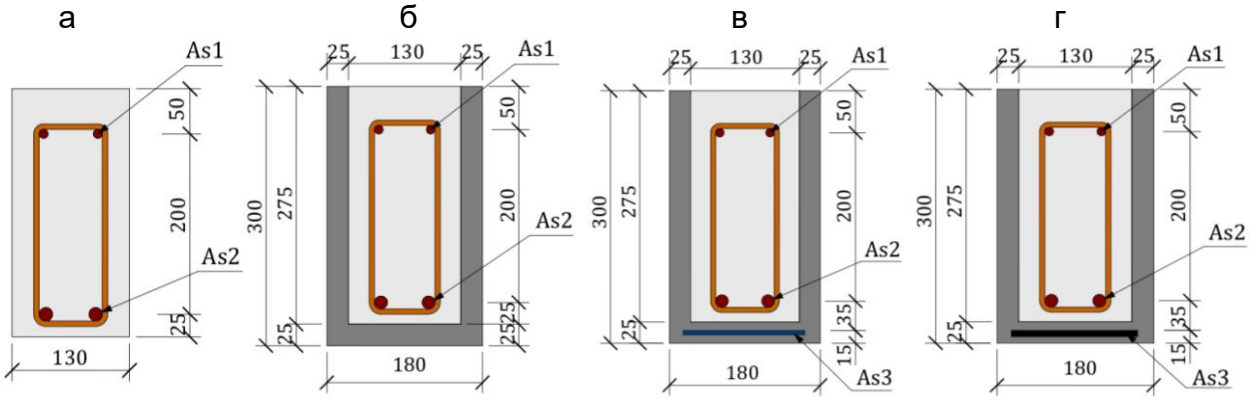


Рис. 6. Складений переріз балки з U-подібною незнімною опалубкою, надрукованою за технологією 3DCP, із зазначенням варіантів розташування армування (As1, As2, As3)

Чисельне моделювання та прийняті припущення

Реалізація зазначених принципів розрахунку наведена нижче у вигляді схем і креслень. Розрахунки виконано методом деформацій відповідно до вимог [21, 22], зокрема розд. 4 і дод. А.

Розрахунки здійснювали з урахуванням низки основних припущень, спрямованих на забезпечення достовірності і точності результатів. Переріз моделювали як усереднений, що описує середні деформації бетону та арматури вздовж довжини ділянки, з урахуванням появи

тріщин, де це доцільно. Передбачали, що деформації арматури відповідають деформаціям навколишнього бетону як у зоні розтягування, так і стиску, що забезпечує спільну роботу матеріалів. По висоті перерізу приймали лінійний розподіл деформацій, що відповідає класичній гіпотезі плоских перерізів у будівельній механіці.

Діаграму напружень і деформацій для стисненого бетону приймали згідно з рис. 3.1 [21], а для арматури – згідно з рис. 3.1 [22]. Розрахунки здійснювали з використанням спеціалізованого програмного забезпечення, розробленого авторами. Це ПЗ реалізує алгоритм розв'язання нелінійних рівнянь рівноваги для композитного залізобетонного перерізу методом деформацій [23].

Створювали та аналізували 3D-моделі U-подібних балок довжиною 3 м у середовищі Lira-FEM 2024 Full Academic (ліцензія № 7293-22 від 15.02.2023 р.). У процесі моделювання враховували фізичну нелінійність для забезпечення достовірного відтворення поведінки конструкції під навантаженням.

Зовнішнє навантаження прикладено у двох точках, розташованих на відстані 1 м від торців балки. Навантаження вводили у вигляді 20 рівномірно розподілених кроків для забезпечення стабільності і точності обчислень. Щоб уникнути локальних концентрацій напружень у зонах прикладення сили, навантаження розподілено по довжині 200 мм і відповідній ширині балки (залежно від типу), а не введено у вузли безпосередньо. Величину прикладеного навантаження підібрано так, щоб створити згинальний момент у середині прольоту, який відповідає граничній несучій здатності згідно з розрахунками плоского перерізу.

Умови закріплення моделювали на торцях балки у вигляді опор довжиною 200 мм із визначенням матеріалу як «сталь» для відтворення реалістичної граничної роботи. Ядро балки (залізобетон) і незнімну 3D-друковану опалубку моделювали з використанням восьмивузлових ізопараметричних тривимірних скінченних елементів (тип CE 236) з урахуванням фізичної нелінійності. Сітку скінченних елементів формували з розмірами елементів від 8 до 10 мм для забезпечення балансу між точністю і обчислюваною ефективністю.

Поздовжню арматуру моделювали з використанням фізично нелінійних стрижневих 3D-елементів (тип CE 210), що дає змогу точно врахувати її внесок у загальну конструктивну роботу балки.

Фізико-механічні властивості бетону та 3D-друкованої опалубки задавали у вигляді нелінійної діаграми «напруження – деформація» з урахуванням спадної гілки відповідно до Eurocode 2 (тип матеріальної моделі 12) [24]. Це дало змогу змоделювати поведінку бетону на стиск і розтяг включно зі спадною ділянкою після досягнення граничної міцності. Для арматури було застосовано кусочно-лінійну діаграму з двох сегментів (діаграма Прандтля, матеріальна модель типу 14), яка достовірно відтворює її пружну та пластичну поведінку під навантаженням.

Одну з побудованих скінченно-елементних моделей розглянутих балок наведено на рис. 7.

Результати та обговорення

Результати розрахунку поперечних перерізів за методом деформацій, наведені в табл. 1 та 2, демонструють несучу здатність і відсоток армування для кожної конфігурації. Аналіз, підкріплений діаграмами згинальний момент – кривизна та розподілами деформацій і напружень (рис. 8), показує, що всі розглянуті варіанти перерізів є конструктивно оптимальними.

Це підтверджено досягненням граничних стискальних напружень у стисненій зоні бетону та граничних розтягувальних напружень у шарах робочої арматури, що свідчить про повне використання несучої здатності матеріалів у кожному з проаналізованих випадків.

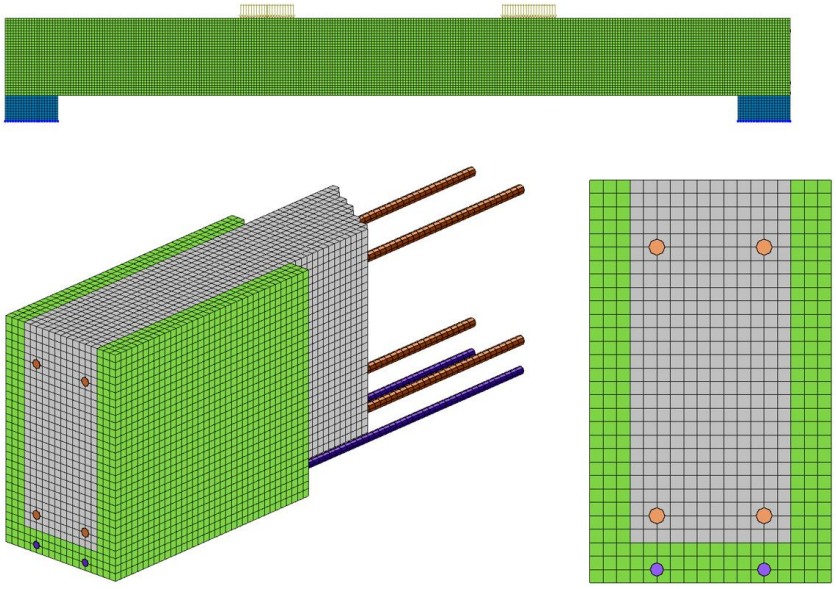


Рис. 7. Модель балки конфігурації UFull 21 у скінченно-елементному вигляді

Таблиця 1

Результати аналізу поперечних перерізів балок із незнімною та без незнімної опалубки за різних схем армування (без додаткового армування опалубки)

Позначення перерізу	Загальна площа армування, мм²	Несуча здатність, М·кНм	Порівняння несучої здатності, %	Порівняння площі армування, %	Коефіцієнт армування, %
1	2	3	4	5	6
UCore1 (As2)	226.19	22.26	100.0	100.0	0.63
UCore2 (As2)	402.12	36.4	100.0	100.0	1.12
UCore3 (As2)	508.94	43.46	100.0	100.0	1.42
UCore4 (As2)	628.32	48.84	100.0	100.0	1.76
UCore5 (As1 + As2)	452.38	22.23	100.0	100.0	1.27
UCore6 (As1 + As2)	628.31	37.35	100.0	100.0	1.76
UCore7 (As1 + As2)	816.82	46.22	100.0	100.0	2.28
UCore8 (As1 + As2)	936.2	55.65	100.0	100.0	2.6
UFull1 (As2)	226.19	22.9	102.9	100.0	0.42

Продовження табл. 1

1	2	3	4	5	6
UFull2 (As2)	402.12	38.44	105.6	100.0	0.74
UFull3 (As2)	508.94	46.82	107.7	100.0	0.94
UFull4 (As2)	628.32	55.43	113.5	100.0	1.16
UFull5 (As1 + As2)	452.38	23.06	103.7	100.0	0.84
UFull6 (As1 + As2)	628.31	38.57	103.3	100.0	1.16
UFull7 (As1 + As2)	816.82	47.65	103.1	100.0	1.51
UFull8 (As1 + As2)	936.2	57.54	103.4	100.0	1.73

Таблиця 2

Результати аналізу поперечних перерізів балок із незнімною опалубкою за різних рівнів армування

Позначення перерізу	Загальна площа армування, мм²	Несуча здатність, М·кН·м	Порівняння несучої здатності, %	Порівняння площі армування, %	Коефіцієнт армування, %
1	2	3	4	5	6
UFull9 (As1 + As2+As3)	326.72	33.4989	150.5	144.4	0.61
UFull10 (As1 + As2+As3)	502.65	47.8978	131.6	125.0	0.93
UFull11 (As1 + As2+As3)	609.47	55.6472	128.0	119.8	1.13
UFull12 (As1 + As2+As3)	728.85	63.4297	129.9	116.0	1.35
UFull13 (As1 + As2+As3)	552.91	33.4717	150.6	122.2	1.02
UFull14 (As1 + As2+As3)	728.84	48.5878	130.1	116.0	1.35
UFull15 (As1 + As2+As3)	917.35	57.5182	124.4	112.3	1.70

Продовження табл. 2

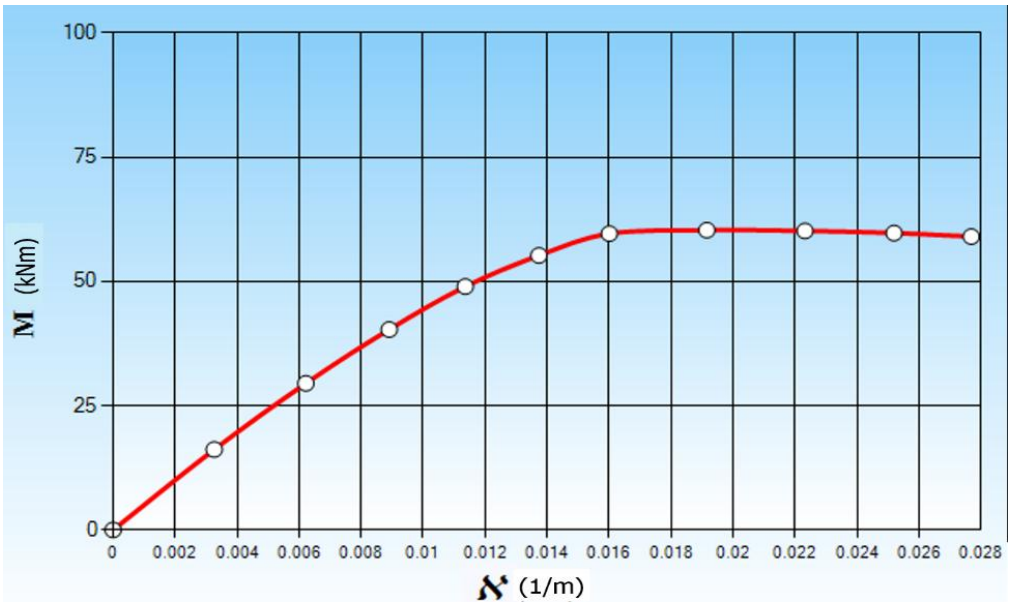
1	2	3	4	5	6
UFull16 (As1 + As2+As3)	1036.73	66.9735	120.3	110.7	1.92
UFull17 (As1 + As2+As3)	383.27	39.2714	176.4	169.4	0.71
UFull18 (As1 + As2+As3)	559.2	52.9999	145.6	139.1	1.04
UFull19 (As1 + As2+As3)	666.02	60.3526	138.9	130.9	1.23
UFull20 (As1 + As2+As3)	785.4	67.4644	138.1	125.0	1.45
UFull21 (As1 + As2+As3)	609.46	39.3495	177.0	134.7	1.13
UFull22 (As1 + As2+As3)	785.39	54.1347	144.9	125.0	1.45
UFull23 (As1 + As2+As3)	973.9	62.5606	135.4	119.2	1.80

Отримані результати вказують, що незнімна опалубка з 3D-друку без армування має незначний вплив на несучу здатність балки, особливо у випадку однопрольотних елементів, де опалубка розташована в зоні розтягування. Водночас збільшення висоти перерізу конструкції може підвищити несучу здатність на 3–7 %. Додавання армування безпосередньо в тіло опалубки суттєво покращує її ефективність: зростання несучої здатності сягає 77 %, тоді як витрати сталі зростають лише на 34 %. Це демонструє високий рівень конструктивної ефективності такого підходу. Порівняльні результати наведені на рис. 9.

Водночас суттєвим обмеженням є неможливість забезпечення нормативного бетонного захисного шару з розміщенням додаткового армування в тілі опалубки. Це зумовлює необхідність застосування нержавіючої сталі або інших заходів протикорозійного захисту, що підвищує вартість і ускладнює реалізацію. Отже, доцільність використання армованої опалубки з 3D-друку значною мірою залежить від специфіки проєкту – вимог щодо навантажень, умов експлуатації та бюджетних обмежень.

Незважаючи на зазначені обмеження, результати дослідження підтверджують потенціал застосування 3D-друкованої незнімної опалубки для покращення конструктивної ефективності, проте для подальшого впровадження необхідні додаткові дослідження щодо уточнення методики та її оптимізації для умов будівельної практики.

а



б

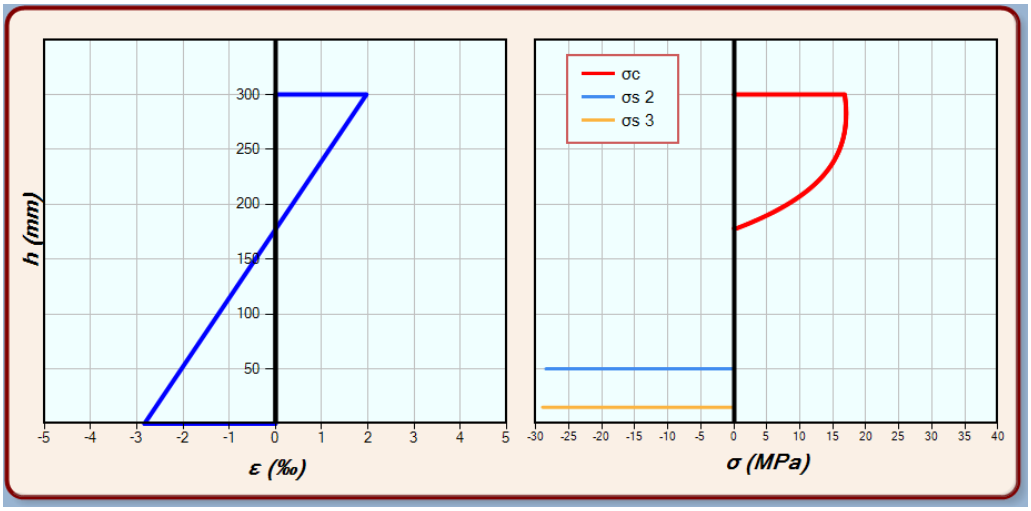


Рис. 8. Діаграма «момент–кривизна» і розподіли деформацій і напружень для проаналізованого поперечного перерізу балки типу UFull19

Аналізуючи тривимірні скінченно-елементні моделі балок, дійшли важливих висновків. Аналіз переміщень (рис. 10) показав зростання жорсткості балок із 3DCP-опалубкою. Наприклад, балка типу UCore 5 (без друкованої опалубки) продемонструвала вертикальний прогин 0.892 мм під дією загального навантаження 44.5 кН. Натомість балка UFull 23, оснащена незнімною опалубкою, мала прогин 1.04 мм за значно більшого навантаження – 78.7 кН. Це свідчить про те, що збільшення прогину становило лише 15 %, тоді як прикладене навантаження зросло на 76.8 %, що демонструє суттєвий внесок опалубки у жорсткість конструкції.

Аналіз головних розтягувальних напружень σ1 в тілі опалубки показав, що граничне допустиме значення розтягувального напруження (0.8 МПа) було перевищене. Зони концентрації напружень виявлені не лише в середній частині прольоту чи на опорах, а і в проміжних ділянках, що вказує на

потенційний ризик утворення похилих тріщин. Тому для практичного застосування незнімної опалубки слід передбачити додаткові армувальні елементи в опорних зонах.

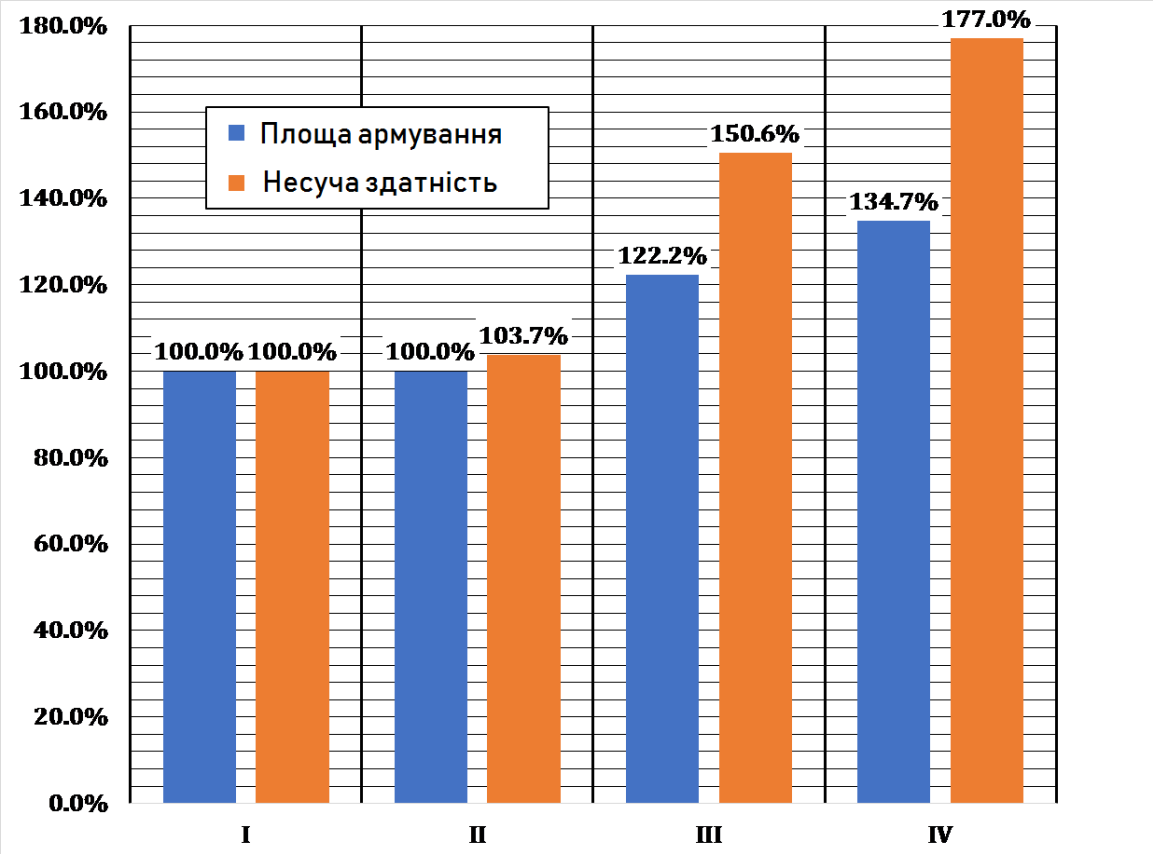


Рис. 9. Діаграма, що ілюструє вплив розміщення додаткового армування в площині незнімної опалубки на несучу здатність балки:
I – переріз без урахування спільної роботи з опалубкою (UCore 1–8); II – переріз із урахуванням спільної роботи, але без армування в опалубці (UFull 1–8); III – переріз зі спільною роботою і помірним армуванням в опалубці (UFull 9–16); IV – переріз зі спільною роботою і підсиленим армуванням в опалубці (UFull 17–24)

На противагу цього напруження в залізобетонному ядрі залишалися в межах допустимих значень: у випадку балки UFull 23 головне розтягувальне напруження не перевищувало 1.7 МПа за допустимого значення 2.6 МПа (рис. 11, 12). Отримані результати підкреслюють важливість ретельного аналізу розподілу напружень та обґрунтованого вибору стратегії армування для проєктування балок із використанням 3DCP-опалубки з метою забезпечення як конструктивної надійності, так і ефективного використання матеріалів.

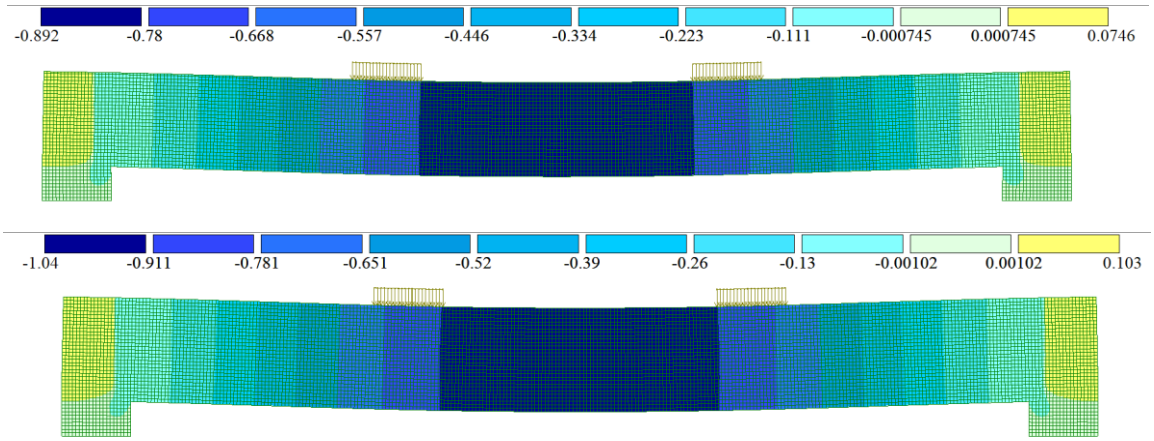


Рис. 10. Вертикальні переміщення (мм) у моделях балок: UCore 5 (угорі) і UFull 23 (унизу), що ілюструють деформування під дією навантаження

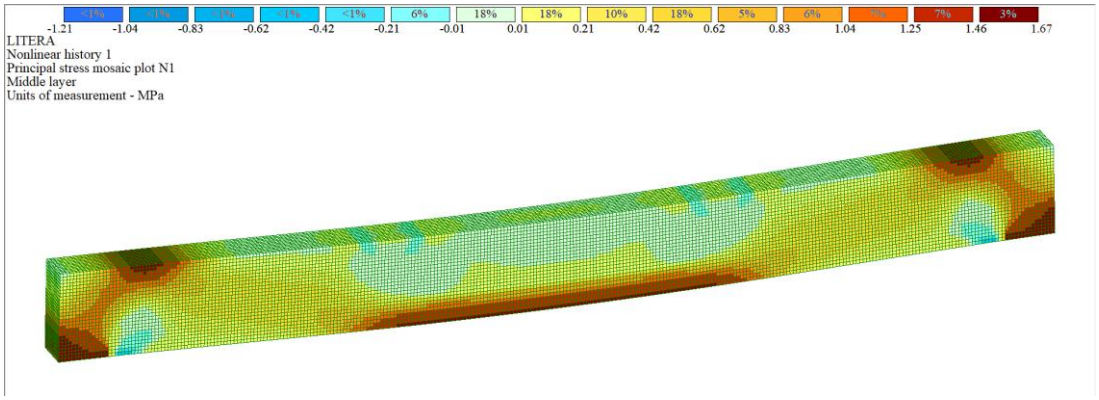


Рис. 11. Ізополя головних розтягувальних напружень $\sigma 1$ (МПа) у залізобетонному ядрі балки UFull 23; максимальне значення напруження становить 1.67 МПа

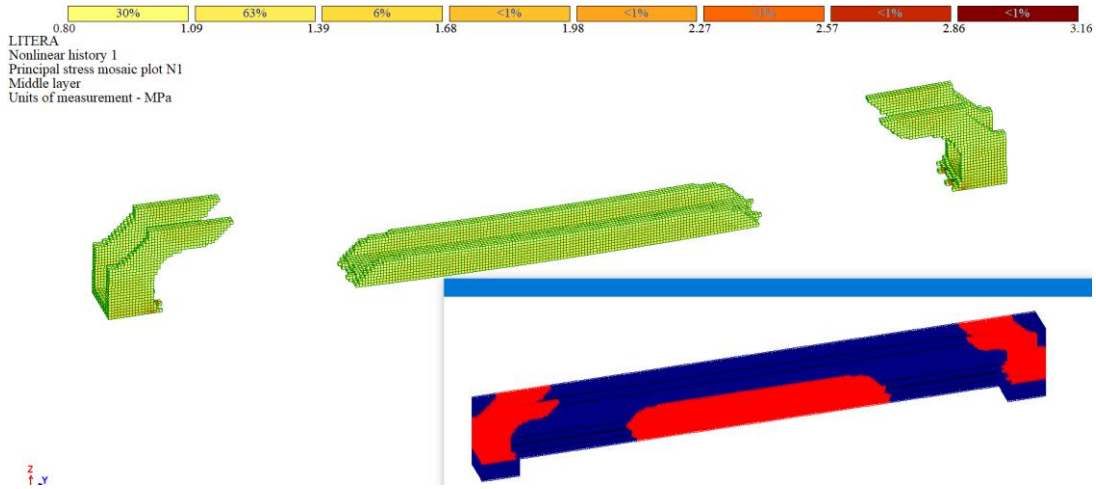


Рис. 12. Ізополя головних розтягувальних напружень σ1 (МПа) у незнімній 3DCP-опалубці балки UFull 23

Висновки. У дослідженні проаналізовано 32 різні конфігурації залізобетонних балок із незнімною опалубкою, виготовленою за технологією 3D-друку, для оцінювання конструктивної ефективності, зокрема несучої здатності, жорсткості та розподілу напружень. На підставі чисельного моделювання та подальшого аналізу результатів можна зробити такі висновки:

1. Включення 3DCP-опалубки без армування забезпечило лише незначне покращення несучої здатності (до 7 %), тоді як конфігурації з помірним армуванням продемонстрували збільшення несучої здатності до 77 %. За умов підсиленого армування покращення склало до 177 %.

2. Розміщення армування в тілі опалубки виявилося конструктивно ефективним, проте потребує ретельного врахування питань захисту від корозії через недостатню товщину бетонного захисного шару. Це можна реалізувати через застосування нержавіючої сталі або спеціалізованих протикорозійних заходів. Крім того, інтеграція армування між шарами 3D-друку може ускладнити технологію виготовлення та підвищити трудомісткість.

3. Застосування незнімної опалубки з 3D-друку суттєво покращує жорсткість балок. Наприклад, балки з 3DCP-опалубкою мали лише на 15 % більші вертикальні переміщення зі зростанням прикладеного навантаження на 76.8 %, що свідчить про ефективність системи щодо деформаційної стійкості.

4. Аналіз головних розтягувальних напружень показав перевищення допустимого значення 0.8 МПа у 3D-друкованій опалубці, зокрема в середній частині прольоту та на опорах. Це вказує на підвищений ризик утворення тріщин і потенційних локальних відмов, що можуть порушити сумісну роботу опалубки із залізобетонним ядром. Для запобігання руйнуванню по похилих перерізах доцільним є локальне підсилення армування в опорних зонах.

5. Залізобетонне ядро балок працювало задовільно: головні розтягувальні напруження залишались у межах допусти-мих значень для бетону класу С25/30. Це підтверджує конструктивну доцільність використання незнімної опалубки з 3D-друку, хоча також вказує на необхідність подальшої оптимізації стратегій армування та керування напруженнями.

6. Результати чисельного моделювання потребують підтвердження за умов повномасштабних експериментальних випробувань. З цією метою буде проведено серію фізичних досліджень на триметрових балках (рис. 5) для верифікації несучої здатності та поведінки конструкцій.

Отримані результати формують науково обґрунтовану основу для ширшого впровадження систем незнімної опалубки, виготовленої за технологією 3D-друку, у будівельну практику. Це особливо актуально в контексті післявоєнної відбудови, де критично важливими є ефективне використання ресурсів і скорочення термінів виконання робіт. Подальші експериментальні дослідження та натурні впровадження необхідні для подолання виявлених обмежень і оптимізації інтеграції 3DCP-технологій у залізобетонні конструктивні системи.

Список використаних джерел

1. Звіт про прямі збитки інфраструктури від руйнувань внаслідок військової агресії росії проти України станом на листопад 2024 року. Київ: Київська школа економіки, 2023. URL: https://kse.ua/wp-content/uploads/2025/02/KSE_Damages_Report-November-2024-UA.pdf (дата звернення: 11.06.2025).

2. Ma G., Buswell R., Leal da Silva W., Wang L., Xu J., Jones S. (2022). Technology readiness: A global snapshot of 3D concrete printing and the frontiers for development. Cement and Concrete Research. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2022.106774.

3. Shmukler Valeriy & Reznik Petro & Krul Yuriy & Volodymyrov Anton & Binkevych Kostiantyn. (2024). Design features of the new system for reconstruction and renovation of large panel buildings. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 1376. 012012. https://doi.org/10.1088/1755-1315/1376/1/012012.

4. Jipa Andrei & Dillenburger Benjamin. (2021). 3D Printed Formwork for Concrete: State-of-the-Art, Opportunities, Challenges, and Applications. 3D Printing and Additive Manufacturing. 9. https://doi.org/10.1089/3dp.2021.0024.

5. Bekaert M., Van Tittelboom K., & De Schutter G. (2020). Printed concrete as formwork material : a preliminary study. In F. Bos, S. Lucas, R. Wolfs & T. Salet (Eds.). Second RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication, Digital Concrete 2020. Vol. 28. P. 575–583. https://doi.org/10.1007/978-3-030-49916-7_59

6. Jipa A., Bernhard M., Dillenburger B. (2017). Submillimeter Formwork: 3D-Printed Plastic Formwork for Concrete Elements. https://doi.org/10.3929/ethz-b-000237359.

7. Zgalat-Lozynskyy O., Zgalat-Lozynska L. (2020). Розвиток та впровадження інноваційних технологій 3D-друку у будівництві. Scientific Notes of Taurida National V. I. Vernadsky University. Series: Economy and Management. 70. https://doi.org/10.32838/2523-4803/70-5-7.

8. Aziz S., Apellániz D., Weber M., Betti G., Gengnagel C. (2021). Towards a multifunctional 3DCP slab system.

9. Burger Joris & Huber Tobias & Lloret Ena & Mata-Falcón Jaime & Gramazio Fabio & Kohler Matthias. (2022). Design and fabrication of optimised ribbed concrete floor slabs using large scale 3D printed formwork. Automation in Construction. 144. https://doi.org/104599. 10.1016/j.autcon.2022.104599.

10. Burger J. Aejmelaeus-Lindstro m P. Gu rel S. Niketic F. Lloret-Fritschi E. Flatt R. J. Gramazio F. and Kohler M. Eggshell Pavilion: A reinforced concrete structure fabricated using robotically 3D printed formwork.

11. Guan Jingyuan & Wang Li & Ma Guowei. (2022). Performance Evaluation of Reinforced Concrete Beam with 3d-Printed Permanent Formwork. SSRN Electronic Journal. 10.2139/ssrn.4117121.

12. Zhu Binrong & Nematollahi Behzad & Pan Jinlong & Zhang Yang & Zhou Zhenxin & Zhang Yamei. (2021). 3D concrete printing of permanent formwork for concrete column construction. Cement and Concrete Composites. 121. 104039. 10.1016/j.cemconcomp.2021.104039.

13. Vantyghem G. Ooms T. and De Corte W. FEM Modelling Techniques for Simulation of 3D Concrete Printing. https://doi.org/10.48550/arXiv.2009.06907.

14. Xiao Jianzhuang & Liu Haoran & Ding Tao. (2020). Finite element analysis on the anisotropic behavior of 3D printed concrete under compression and flexure. Additive Manufacturing. 39. https://doi.org/101712. 10.1016/j.addma.2020.101712.

15. Чисельне моделювання напружено-деформованого стану елементів, які виготовляються за допомогою 3D друку / І. К. Сенченков, М. В. Юрженко, О. П. Червінко та ін. *Автоматичне зварювання*. 2021. № 8. С. 29-34. URL: http://jnas.nbuv.gov.ua/article/UJRN-0001273670.

16. Mata-Falcón J., Bischof P., Huber T., Anton A. et al (2022). Digitally fabricated ribbed concrete floor slabs: a sustainable solution for construction. RILEM Technical Letters. 7. 68-78. https://doi.org/10.21809/rilemtechlett.2022.161.

17. Burger J., Wangler T., Chiu Y., Techathuvanun C., Gramazio F., Kohler M., Lloret E. (2021). Material-informed Formwork Geometry The effects of cross-sectional variation and patterns on the strength of 3D printed eggshell formworks. https://doi.org/10.52842/conf.ecaade.2021.2.199.

18. Gebhard L., Burger J., Mata-Falcón J., Lloret E., Gramazio F., Kohler M., Kaufmann W. (2022). Towards efficient concrete structures with ultra-thin 3D printed formwork: exploring reinforcement strategies and optimisation. Virtual and Physical Prototyping. 17. 1-18. https://doi.org/10.1080/17452759.2022.2041873.

19. Han D., Yin H., Qu M., Zhu J, Wickes A. (2020). Technical analysis and comparison of formwork-making methods for customized prefabricated buildings: 3D printing and conventional methods. Journal of Architectural Engineering, Vol. 26, Iss. 2. https://doi.org/10.1061/(ASCE)AE.1943-5568.000039.

20. Kharkiv housing challenge: Upgrading concrete panel housing and residential neighbourhoods in Ukraine's second largest city. URL: https://architecturecompetitions.com/kharkivhousingchallenge/?utm_source=newsletter&utm_medium=email&utm_term=2024-05-06&utm_campaign=Norman+Foster+invites+Kharkiv+Housing+Challenge (дата звернення 11.06.2025).

21. ДБН В.2.6-98:2009. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення. Чинний від 2011-06-01. URL: https://dbn.co.ua/load/normativy/dbn/1-1-0-792 (дата звернення: 11.06.2025).

22. ДСТУ В В.2.6 156:2010. Конструкції будівель і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення. Чинний від 2012-01-01. URL: https://www.ksv.biz.ua/GOST/DSTY/dsty_b_v.2.6-156-2010.pdf (дата звернення: 11.06.2025).

23. Практичний розрахунок елементів залізобетонних конструкцій за ДБН В.2.6-98:2009 у порівнянні з розрахунками за СНиП 2.03.01-84* і EN 1992-1-1 (Eurocode 2) / В. М. Бабаєв, А. М. Бамбура, О. М. Пустовойтова та ін. Харків: Золоті сторінки, 2015. 432 с. ISBN 978-966-400-327-5.

24. EN 1992-1-1:2004/NA:2010 (нац. додаток). Єврокод 2: Проєктування бетонних конструкцій. Ч. 1-1: Загальні правила і правила для будівель. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2012. 243 с.

Резнік Петро Аркадійович, кандидат технічних наук, доцент кафедри будівельних конструкцій, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова. Тел.: +380506158638. ORCID iD: 0000-0003-3937-6833. E-mail: engipr@gmail.com.

Лугченко Олена Іванівна, кандидат технічних наук, доцент кафедри будівельних конструкцій, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова. Тел.: +380500510018. ORCID iD: 0000-0001-5397-355X. E-mail: olena.lugchenko@kname.edu.ua.

Володимиров Антон Валерійович, аспірант кафедри будівельних конструкцій, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова. Тел.: +380505881321. ORCID ID: 0009-0001-8416-535X. E-mail: anton.volodymyrov@kname.edu.ua.

Тенесеску Владислав Віталійович, аспірант кафедри будівельних конструкцій, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова. Тел.: +380637332473. ORCID ID: 0000-0002-4935-4454. E-mail: vladislav.tenesesku@kname.edu.ua.

Алатаєв Джамалдій Аслудійович, аспірант кафедри будівельних конструкцій, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова. Тел.: +380971398944. ORCID ID: 0000-0003-1570-8469. E-mail: dzhamaldii.alataiev@kname.edu.ua.

Булдаков Олексій Олексійович, аспірант кафедри будівельних конструкцій, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова. Тел.: +380988578167. ORCID ID: 0009-0002-4663-7392. E-mail: oleksii.buldakov@kname.edu.ua.

Petro Reznik, PhD (Tech), associate professor, Building Structures department, O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. ORCID iD: 0000-0003-3937-6833. E-mail: engipr@gmail.com.

Olena Lugchenko, PhD (Tech), associate professor, Building Structures department, O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. ORCID iD: 0000-0001-5397-355X. E-mail: olena.lugchenko@kname.edu.ua.
Volodymyrov Anton, postgraduate student, department of building structures, O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. ORCID ID: 0009-0001-8416-535X. E-mail: anton.volodymyrov@kname.edu.ua.
Vladyslav Tenesesku, postgraduate student, department of building structures, O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. ORCID ID: 0000-0002-4935-4454. E-mail: vladislav.tenesesku@kname.edu.ua.
Dzhamaldii Alatayev, postgraduate student, department of building structures, O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. ORCID ID: 0000-0003-1570-8469. E-mail: dzhamaldii.alataiev@kname.edu.ua.
Oleksii Buldakov, postgraduate student, department of building structures, O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. ORCID ID: 0009-0002-4663-7392. E-mail: oleksii.buldakov@kname.edu.ua.

Статтю прийнято 24.06.2025 р.

УДК 691.32:620.193.7

ЕЛЕКТРОКОРОЗІЯ БЕТОНУ І ЗАЛІЗОБЕТОНУ: АНАЛІЗ ВПЛИВУ ТА МЕТОДІВ ЗАХИСТУ

**Д-р техн. наук С. В. Панченко, канд. техн. наук О. А. Дудін,
аспіранти І. С. Коваленко, О. А. Фоменко, О. О. Філімонов**

ELECTROCORROSION OF CONCRETE AND REINFORCED CONCRETE: ANALYSIS OF IMPACT AND PROTECTION METHODS

**Dr. Sc. (Tech.) S. V. Panchenko (Tech.), PhD (Tech.) O. A. Dudin,
postgraduate students I. S. Kovalenko, O. A. Fomenko, O. O. Filimonov**

DOI: https://doi.org/10.18664/1994-7852.212.2025.336453

Анотація. *Стаття присвячена комплексному аналізу проблеми електрокорозії експлуатованих бетонних і залізобетонних конструкцій, зокрема, в умовах електрифікованих залізниць. Розглянуто основні джерела та механізми виникнення блукаючих струмів, їхній вплив на фізико-хімічні властивості бетону і корозію арматури. Особливу увагу приділено порівнянню впливу постійних і змінних блукаючих струмів, а також ролі хлорид-іонів у прискоренні руйнівних процесів. На основі аналізу останніх наукових публікацій і фундаментальних досліджень висвітлено основні аспекти руйнування конструкцій і запропоновано методи їх захисту. Автори статті також розглядають актуальні виклики залізничної інфраструктури України, підкреслюючи необхідність розроблення і впровадження ефективних стратегій для забезпечення її довговічності та безпеки.*

Ключові слова: *електрокорозія, бетон, залізобетон, блукаючі струми, змінний струм, постійний струм, залізнична інфраструктура, довговічність, захист.*

Abstract. *The Ukrainian railway infrastructure, as a key economic link, is strategically important but constantly faces significant loads and aggressive environments. This makes it vulnerable to structural damage. One of the most serious threats to the durability of its concrete and reinforced concrete structures is electrocorrosion. This phenomenon is caused by "stray currents" and high voltage, which arise from incomplete insulation between the rails and the ground. These currents intensify the migration of chloride ions and Ca2+ cations, accelerating rebar corrosion and concrete degradation.*

The article systematically analyzes and summarizes current understandings of electrocorrosion, identifying key destruction mechanisms, influencing factors, and protection methods. It also outlines critical research gaps and practical implications for enhancing railway infrastructure durability. Studying the durability of concrete and reinforced concrete is critically important because, while processes like carbonation and chloride penetration are well-researched, electrocorrosion is a distinct and complex problem. The alkaline environment of concrete usually provides a passive layer on steel rebar, but the penetration of carbon dioxide and chloride ions destroys this protective layer.

Stray currents are divided into direct current (DC) and alternating current (AC). DC stray currents, typical for subways, cause significant corrosion of buried metal pipelines and accelerate pitting corrosion of steel, even surpassing the effects of fatigue. AC stray currents, common in AC-electrified railways, lead to a reduction in the service life of structures, although they cause less overall corrosion. The mechanisms of corrosion due to AC stray currents are more complex, including the rectification model, the alkalization mechanism, and the autocatalytic mechanism.

Stray currents significantly alter the physicochemical properties of concrete: they accelerate the diffusion of calcium ions, increase porosity, and weaken the concrete's ability to bind chloride ions, creating an accelerated corrosion cycle. Experimental studies have shown that an AC voltage of 40 V, in combination with water flow, causes the maximum loss of concrete strength and intensive dissolution of cement paste minerals.

The practical significance of these studies lies in improving the classification of concretes by permeability and developing protective solutions. These solutions include steel and liquid glass screens with deep grounding, as well as replacing traditional rail fastenings on sleepers and ballastless bridge deck slabs with resilient fastenings that have increased electrical resistance.

The Ukrainian railway infrastructure faces additional challenges: aging structures, consequences of military actions (damage to railway tracks and electrical infrastructure, which disrupts grounding and insulation), insufficient quality control of materials, and the lack of comprehensive monitoring systems.

Conclusions emphasize that electrocorrosion is a complex problem requiring a comprehensive approach to monitoring, diagnostics, and the implementation of modern protection methods. Prospects for further work include developing integrated real-time monitoring systems, in-depth study of the long-term effects of low AC voltages, creating new corrosion-resistant materials, optimizing existing protection systems, and adapting advanced computational methods for predicting degradation processes.

***Keywords**: electrocorrosion, concrete, reinforced concrete, stray currents, alternating current, direct current, railway infrastructure, durability, protection.*

Вступ. Залізнична інфраструктура є стратегічно важливою ланкою економіки, яка забезпечує безперебійний рух вантажів і пасажирів. Її споруди, такі як мости, тунелі, водопропускні труби та інші, які здебільшого виконані з бетону і залізобетону, зазнають постійних і змінних навантажень, а також впливу агресивних середовищ [1]. Це робить їх вразливими до структурних пошкоджень, що можуть призвести до значних економічних втрат і ризиків для безпеки [1].

Однією з найбільш серйозних і складних проблем, що впливають на довговічність бетонних і залізобетонних конструкцій в умовах електрифікованих залізниць, є електрокорозія [1, 4]. Це явище спричинене виникненням так званих «блукаючих струмів» і впливом високовольтної напруги [1, 4]. На залізничних коліях, де контактна мережа або контактна рейка подає живлення, а ходові рейки слугують зворотним шляхом, неповна ізоляція між ходовими рейками та

ґрунтом спричиняє витік струму і формування блукаючих струмів [1, 4]. Ці струми суттєво змінюють процеси дисоціації хлорид-іонів і катіонів Ca^{2+}, посилюючи їхню міграцію і тим самим прискорюючи корозійні процеси [1, 4]. Корозія арматури в залізобетонних спорудах є основною причиною погіршення стану плит безбаластного мостового полотна, опор мостів, водопропускних труб, тунелів та інших армованих споруд [3].

Автори статті мають на меті систематично проаналізувати і синтезувати сучасні уявлення про електрокорозію бетонних і залізобетонних конструкцій в умовах електрифікованих ділянок залізниць, виявити основні механізми руйнування, фактори впливу і методи захисту, а також окреслити критичні дослідницькі прогалини та практичні наслідки для підвищення довговічності залізничної інфраструктури [3].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідження довговічності бетону і залізобетону є критично важливим для гарантування безпечної і тривалої експлуатації інженерних споруд [3]. Процеси корозії бетону, такі як карбонізація та проникнення хлоридів, є добре вивченими [4]. Сталь, занурена в бетон без хлоридів, має високу корозійну стійкість завдяки лужному середовищу бетона (pH 12,5-13,8), яке формує пасивний шар на її поверхні [4]. Однак проникнення діоксиду вуглецю (карбонізація) і хлорид-іонів є основними причинами руйнування цього пасивного шару [4]. Хлорид-іони можуть мігрувати через бетон переважно трьома механізмами: природною дифузією, електричною міграцією і транспортом через порову рідину за рахунок капілярних сил або зовнішнього градієнта тиску [5]. Наявність хлоридів, навіть у невеликих кількостях (наприклад ≥ 0,6 моль/л), значно підвищує схильність до пітингової корозії [1]. Окрім того, лужно-кремнеземна реакція (ЛКР), що виникає внаслідок взаємодії лугів цементу з реакційноздатними заповнювачами, також може призводити до деградації бетону. В Україні ця проблема була зафіксована та пов'язана з безсистемною зміною постачальників заповнювачів і цементу [7].

Електрокорозія: механізми та вплив блукаючих струмів. Блукаючі струми є постійним явищем електрифікованих залізниць, де їх виникнення пов’язано з поганою ізоляцію між рейками та землею, створюючи небажаний шлях повернення тягового струму [1, 4]. Ці струми поділяють на постійні (ПС) і змінні (ЗС), кожен із яких має свої специфічні механізми впливу на корозію металів і бетону [2, 12]. Порівняльний аналіз механізмів і впливу корозії, спричиненої ними, подано в таблиці.

Таблиця

Порівняльний аналіз механізмів і впливу корозії, спричиненої ЗС і ПС блукаючими струмами, на бетон

Характеристика	Постійний струм (ПС)	Змінний струм (ЗС)
1	2	3
Типові джерела	Метрополітени та залізничний транспорт, що працюють на ПС [12]	Електрифіковані залізниці, що працюють на ЗС [12]
Основний механізм корозії	Сильний поляризаційний ефект, пряма втрата електронів, прискорення пітингу	Ректифікаційна модель, механізм лугування, автокаталітичний механізм

Продовження таблиці

1	2	3
Вплив на метал (загальний)	Значна корозія, висока інтенсивність, прискорення пітингової корозії можуть перевершувати втомне руйнування та хлоридну корозію	Менша корозія металевих труб, скорочення терміну служби бетонних і залізобетонних споруд; стохастичний характер корозії в СФБ
Вплив на порову структуру бетону	Прискорює дифузію іонів кальцію, збільшує пористість	Прискорює дифузію іонів кальцію, збільшує пористість
Вплив на здатність зв'язувати хлориди	Значне ослаблення	Значне ослаблення

Корозія, спричинена постійними блукаючими струмами (ПС): цей тип корозії часто асоціюють із метрополітенами та залізничним транспортом, що працюють на постійному струмі [2, 11]. Постійні блукаючі струми можуть викликати значну корозію заглиблених металевих трубопроводів через сильний поляризаційний ефект, який вони чинять на прилеглі метали [1, 11]. Вплив цієї корозії значно вищий, ніж природної корозії. Прямі блукаючі струми прискорюють початкову пітингову корозію на сталевих поверхнях і збільшують швидкість корозії, при цьому хлорид-іони діють як каталізатори. Дослідження показують, що корозійні ефекти прямих блукаючих струмів на залізничних коліях можуть навіть перевершувати ті, що спричинені втомою та хлоридними солями [1].

Корозія, спричинена змінними блукаючими струмами (ЗС): корозія ЗС переважно відбувається поблизу електрифікованих залізниць. На відміну від ПС, ЗС викликає меншу корозію труб, але призводить до скорочення терміну їхньої служби, тому потребує більшої уваги [2]. Основна реакція корозії ЗС подібна до корозії ПС [2]. Однак механізми корозії ЗС є більш складними, що підтверджено кількома моделями:

- ректифікаційна модель: ця модель показує, що корозія ЗС виникає через те, що струм, який виділяє метал під час анодної поляризації, є більшим, ніж струм під час катодного відновлення. Під час позитивного напівперіоду змінного струму іони металу вивільняються з металевої поверхні. У негативному напівперіоді частина цих іонів металу має бути відновленою і відкладеною назад на металеву поверхню, але цей процес не повністю реалізований, що призводить до накопичення втрат іонів металу і, зрештою, корозії [2];
- механізм лугування: запропонована Нільсеном теорія припускає, що коли ЗС протікає по металевих поверхнях, електролітична реакція генерує гідроксид-іони, що підвищує значення pH навколишнього середовища та формує лужне середовище. Одночасно високочастотний і високоамплітудний циклічний потенціал ЗС і коливання потенціалу прискорюють реакцію, сприяючи подальшому збільшенню швидкості вилуговування [2, 4];
- автокаталітичний механізм: також запропонований Нільсеном, цей механізм визначає три необхідні умови для виникнення корозії ЗС блукаючими струмами в трубопроводах під катодним захистом: напруга, індукована ЗС, невелике пошкодження антикорозійного шару та надмірно негативна катодна поляризація [2].

Вплив на сталефібробетон (СФБ): дослідження показують, що СФБ, який часто використовують у будівництві залізничних тунелів, демонструє відмінну стійкість до ПС напругою до 1,0 В за відсутності хлоридів [6]. Однак, коли

електроліт містить 0,6 моль/л хлоридів, зменшеного ПС напругою 0,4 В було достатньо для активізації пітингової корозії, що вказує на зниження корозійної стійкості [6]. Застосування тесту впливу змінного струму витоку на вбудовані сталеві стрижні показав стохастичний характер корозії зі значним зниженням корозійного потенціалу (Ecorr) і відповідним збільшенням густини корозійного струму (icorr) на деяких волокнах [6]. Цей стохастичний характер корозії ЗС свідчить про складність її прогнозування та необхідність подальших досліджень у цій галузі.

Вплив блукаючих струмів на фізико-хімічні властивості бетону

Блукаючі струми мають суттєвий вплив на фізико-хімічні властивості бетону. Вони прискорюють дифузію іонів кальцію, зменшуючи вміст гідроксиду кальцію порівняно зі зразками, які не зазнали впливу струму [1, 4]. Цей вплив змінює порову структуру бетону, значно збільшуючи пористість (наприклад на 26,3 %, 31,2 % і 36,1 % для зразків, електрифікованих струмом 50 мА, 100 мА і 150 мА відповідно після 28 днів) [1]. Досліджувані зразки мають вищий вміст хлоридів порівняно з неелектрифікованими, при цьому вільних хлоридів більше, ніж зв'язаних, зі збільшенням струму та часу. Здатність бетону зв'язувати хлорид-іони, що є критичним для запобігання корозії арматури, значно слабшає під дією блукаючих струмів; наприклад, за струму 150 мА вона може становити лише 60 % порівняно зі зразками, які не зазнали впливу струму [1].

Застосування зовнішніх електричних полів до бетонних конструкцій широко використовують для захисту від хлоридного впливу або оцінювання їхньої стійкості до проникнення хлоридів за короткий період, оскільки це прискорює рух іонних у бетоні [9]. Однак важливо враховувати, що різниця потенціалів між двома бетонними поверхнями завжди нижча, ніж та, що подана на електроди, через вплив поляризації, що додатково впливає на часовий і просторовий розподіл концентрації іонів у поровій рідині бетону. Зовнішні електричні поля зазвичай прискорюють міграцію іонів (і води) у цементних матеріалах [9].

Сучасний стан досліджень довговічності залізничних бетонних конструкцій

Дослідження методів оцінювання довговічності наявних бетонних конструкцій все ще перебувають на ранніх стадіях, і систематизація отриманих результатів потребує подальшого розвитку [10]. Фактори, що впливають на довговічність і надійність залізничних споруд, поділяють на три основні категорії [3]:

1. Матеріальні фактори. До них належать властивості сировини (цементу, заповнювачів, води та домішок), співвідношення компонентів суміші, вміст лугів і хлоридів у заповнювачах і домішках. Наприклад, високий вміст лужних металів у цементі та заповнювачах може призвести до лужно-агрегатної реакції, що спричиняє об'ємне розширення та розтріскування. Деякі хімічні домішки також можуть вносити шкідливі іони або викликати небажану довгострокову усадку, впливаючи на довговічність [3].

2. Кліматичні фактори. Середовище експлуатації конструкцій і споруд суттєво впливає на довговічність [3]. Вологі ґрунти є критичними, оскільки вода діє як електроліт, сприяючи електрохімічній корозії глибинних трубопроводів [2]. Обводнені умови експлуатації особливо відзначено як вирішальний фактор впливу ЗС витоку та високої напруги на корозію бетону [4].

3. Фактори навантаження. Залізнична інфраструктура зазнає як статичних, так і динамічних навантажень від поїздів [3, 10]. Залізничні мости, наприклад, витримують постійні та тимчасові навантаження, що сприяє їхній вразливості до структурних руйнувань [1, 10].

Взаємодія між різними механізмами корозії є основним фактором інтенсифікації корозії. Проникнення хлоридів і

карбонізація послаблюють пасивуючий шар сталі, роблячи її більш сприйнятливою до електрокорозії [4]. Більш того, блукаючі струми, як було показано, посилюють транспорт хлоридів і зменшують здатність бетону зв'язувати хлориди [1]. Це створює цикл зворотного зв'язку, що призводить до прискореної корозії. Розуміння цієї синергічної дії є вирішальним для розроблення ефективних засобів захисту.

Мета дослідження. Цей огляд має на меті систематично проаналізувати і синтезувати сучасні уявлення та поточний стан знань про електрокорозію бетону та залізобетонних конструкцій в умовах електрифікованих залізниць, виявити основні механізми корозії, фактори впливу і методи захисту, а також окреслити критичні дослідницькі прогалини та практичні наслідки для підвищення довговічності інфраструктури, особливо в Україні.

Основна частина дослідження

Механізм впливу змінного струму на бетон і залізобетон

Фундаментальні дослідження значно поглибили розуміння механізмів електрокорозії, спричиненої змінним струмом, що є особливо актуальним для електрифікованих залізниць України, де 51 % ділянок електрифіковано змінним струмом [8].

Електрокорозійне руйнування бетону та розчину

Дослідження показали, що електрокорозійне руйнування цементного каменю та бетону змінним потенціалом і струмом витоку обумовлене однобічною провідністю в електричному полі гідросилікатного гелю, який має величезну питому поверхню [4]. Процес вилуговування відбувається шляхом електроміграційного та дифузійного перенесення іонів:

- електроміграційне перенесення: під впливом позитивного потенціалу, що з'являється в кожний напівперіод коливань напруги, протиіони (ПРІ) Ca^{2+} у подвійному електричному шарі (ПЕШ) частинок гелю переміщуються вглиб цементного каменю електроміграційним шляхом. Переміщення потенціалвизначальних іонів (ПВІ) OH^{-}, міцно зв'язаних із поверхнею частинок, при цьому виключено. За один напівперіод коливань ПРІ Ca^{2+} виходять за межі ПЕШ і переміщуються дифузійним шляхом вглиб розчину цегляної кладки або бетону. Це призводить до виникнення позитивного заряду та потенціалу на внутрішній поверхні кладки, а на поверхні з боку ґрунту – негативних. У водопропускних трубах із постійним або частим водотоком ці процеси супроводжує вилуговування розчину кладки всередині труби, що призводить до ослаблення адгезії розчину до цегли [4];

- кількісний опис: швидкість електроміграційного потоку ПРІ Ca^{2+} у бетоні може бути визначена за формулою, виведеною в рамках фундаментальних досліджень [4]:

$$V = (U * \varepsilon * \varepsilon_0 * \zeta * \alpha * \gamma_Г) / (d_СК * l_КП * \eta), \quad (1)$$

де U – величина змінної напруги, В;

ε і ε_0 – відносна діелектрична проникність води та електрична стала ($8{,}85\times10^{-12}$ Ф/м);

ζ – електрокінетичний потенціал частинок гелю, В;

α – ступінь гідратації цементу;

γ_Г – частка гідросилікатного гелю в продуктах гідратації (близько 0,75);

d_СК – відстань від лінії ковзання до стінки капілярів, м;

l_КП – відстань від контактного проводу до конструкції, м;

η – в'язкість води, Па·с.

Підставляючи відповідні значення, отримали швидкість потоку катіонів – $V = 25\times10^{-6}$ м/с і довжину шляху, що вони проходять за один напівперіод коливань

змінного струму, -l_EM = 0,25 мкм. Це значно перевищує товщину ПЕШ на частинках і відповідає розмірам капілярів у гідросилікатному гелі.

Електрокорозія арматури

Корозія арматури під дією високовольтної змінної напруги відбувається через безповоротне винесення за межі захисного шару бетону катіонів заліза Fe^{2+}. Це винесення супроводжено переходом з арматури вивільнюваних електронів у гідроксильні комплекси типу OH^{-}-H^{+}-OH^{-}, які переходять до поверхні арматури за естафетним механізмом [4]. При цьому з кожним періодом напруги відбувається безповоротне винесення катіонів Fe^{2+} і їх закріплення в ПЕШ частинок гелю, а на поверхні арматурного стрижня накопичується надлишок електронів. Нейтралізація електронів відбувається шляхом окиснювання протонами, що знову створює можливість відриву катіонів Fe^{2+} від арматури [4].

Вплив на коефіцієнт дифузії

Перенесення катіонів у гідросилікатному гелі впливає на коефіцієнт дифузії іонів у бетоні. Природу такої зміни коефіцієнта дифузії іонів у бетоні розглянуто на основі рівняння Ейнштейна для коефіцієнта дифузії D колоїдних частинок, а також першого закону Фіка для дифузійного перенесення речовини. Виявлено, що коефіцієнт дифузії катіонів Ca^{2+} у граничному шарі води перебуває у обернено пропорційній залежності від діелектричної проникності води в цьому шарі та обернено квадратичній залежності від водоцементного відношення (В/Ц) [4, 8].

Експериментальні дослідження та їхні результати

Експериментальні дослідження зміни струмів, що проходять через бетон під тривалим впливом циклічної змінної напруги (80 В, 40 В, 10 В і 5 В) у проточній воді, показали важливі закономірності:

1. Вплив змінного струму на властивості бетону. Встановлено, що напруга 40 В у поєднанні з потоком води викликає максимальну втрату частинок C_3A і C_3S і найбільшу втрату міцності бетону. Тривалий вплив пульсуючої змінної напруги величиною 40 В у сполученні з протоком води значно зменшує міцність бетонних зразків — на 63 % і 105 % порівняно з проточною і стоячою водою без впливу струму відповідно [4].

2. Розчинення мінералів цементного каменю. Фізико-хімічні дослідження, зокрема рентгенофазовий аналіз, показали, що циклічна змінна напруга 40 В інтенсивно розчиняє портландит $Ca(OH)_2$ і аліт C_3S. Напруга 80 В інтенсивно розчиняє гідросульфоалюмінати кальцію (ГСАК), а 10 В — C_3A. Напруга 5 В розчиняє ГСАК, але не виносить продукти розчинення, оскільки її величина є недостатньою для цього [4]. Максимальний розчинювальний вплив пульсуючої змінної напруги визначено величиною напруги, а також рівністю швидкості розчинення та швидкості виносу продуктів розчинення, чого найбільше можна досягти за напруги 40 В [4].

Практичне значення та методи захисту

Результати досліджень мають значне практичне значення для підвищення довговічності об’єктів залізничної інфраструктури.

1. Удосконалення класифікації бетонів. На основі залежностей коефіцієнтів дифузії бетону від його марки за водопроникністю (W) і В/Ц удосконалено класифікацію бетонів за проникністю, прийняту в ДСТУ Б В.2.6-145-2010. До трьох груп (нормальної, зниженої та особливо низької проникності) додано ще дві: бетон високої проникності (W1; В/Ц = 1; $D \approx 0{,}0001$ см²/с) і бетон найнижчої проникності (W10; В/Ц = 0,35 і $D \approx 0{,}000000001$ см²/с) [4].

2. Розроблення захисних рішень. За результатами досліджень розроблено схеми та конструктивні рішення захисту від електрокорозії, спричиненої змінною напругою та струмами витоку. До них належать:

- суцільні сталеві екрани з глибинним заземлювачем;
- сітчасті екрани понизу опор із глибинним заземлювачем;
- рідкоскляні екрани з глибинним заземлювачем;
- заміна на шпалах або плитах безбаластного мостового полотна скріплень типу КБ або КПП-5 на пружні скріплення УС-1 або PRS-4 з анкерами на сірчаній мастиці, які мають набагато більший електричний опір [4].

Актуальні виклики для залізничної інфраструктури України

Українська залізнична інфраструктура, що є однією з найбільших у Європі, стикається з численними викликами, які посилюють проблему довговічності, зокрема електрокорозії. Однак значна частина цієї інфраструктури була побудована десятиліття тому і потребує модернізації та посилення захисту від корозійних процесів.

Вплив воєнних дій. Повномасштабна агресія Російської Федерації призвела до значних пошкоджень об’єктів залізничної інфраструктури. За попередніми оцінками, було пошкоджено або втрачено контроль над 6 тис. км залізничних колій, а також багатьма об'єктами електричної інфраструктури, зокрема електричних підстанцій [13]. Ці пошкодження не лише створюють прямі руйнування, але й можуть посилити проблеми електрокорозії через порушення цілісності заземлення, ізоляції та систем відведення блукаючих струмів.

Старіння інфраструктури. Багато залізничних споруд в Україні досягли або перевищили свій проєктний термін служби. Це робить їх більш уразливими до впливу блукаючих струмів та інших агресивних факторів. Через це є нагальна необхідність оцінювання довговічності існуючих конструкцій і розроблення ефективних стратегій обслуговування та ремонту [3].

Недостатній контроль якості матеріалів. Проблеми, такі як лужно-кремнеземна реакція в бетонних шпалах, пов'язані з безсистемною зміною постачальників заповнювачів і цементу [8], підкреслюють важливість суворого контролю якості будівельних матеріалів для забезпечення довговічності конструкцій.

Відсутність комплексних систем моніторингу. Наразі відсутні формалізовані програми відстеження витрат на корозію та комплексні системи моніторингу для виявлення та кількісного оцінювання електрокорозії на залізниці України [12, 14]. Це ускладнює активне управління проблемою та призводить до реагування на вже наявні проблеми, а не їх запобіганню [12, 14].

Висновки

1. Електрокорозійне руйнування бетону та залізобетону в умовах електрифікованих залізниць є складною проблемою, спричиненою як постійними, так і змінними блукаючими струмами. Механізми корозії включають електроміграційне та дифузійне перенесення іонів, розчинення цементного каменю та корозію арматури, що посилено наявністю хлорид-іонів та обводненими умовами експлуатації [1, 4].

2. Дослідження підтверджують, що змінний струм, хоча, як вважають, менш агресивний, ніж постійний, також викликає значну електрокорозію, особливо за певних величин напруги (наприклад 40 В), що призводить до інтенсивного розчинення мінералів цементного каменю і втрати міцності бетону [4, 8]. Це підкреслює необхідність урахування специфіки впливу змінного струму для проєктування та експлуатації залізничних споруд.

3. Вплив блукаючих струмів суттєво змінює фізико-хімічні властивості бетону, прискорюючи дифузію іонів кальцію, збільшуючи пористість і значно послаблюючи здатність бетону зв'язувати хлорид-іони [1]. Це створює синергічний ефект, що прискорює руйнування конструкцій і споруд.

4. Для захисту від електрокорозії розроблено та впроваджено різні

конструктивні рішення, такі як сталеві, сітчасті та рідкоскляні екрани з глибинними заземлювачами, а також скріплення із підвищеним електричним опором [4]. Ці заходи дають змогу підвищити довговічність споруд і забезпечити економічний і соціальний ефект.

5. Щодо залізничної інфраструктури України, то наявні такі проблеми як старіння конструкцій, наслідки воєнних дій, контроль якості матеріалів, що посилюють ризики електрокорозії. Це потребує комплексного підходу щодо моніторингу, діагностики та впровадження сучасних методів захисту.

Перспективи подальших робіт

Подальші дослідження мають бути зосереджені на розробленні інтегрованих систем моніторингу електрокорозійного стану конструкцій у реальному часі, що дасть змогу перейти від реактивного до проактивного обслуговування. Необхідно також поглибити вивчення довгострокового впливу низьких змінних напруг і їхньої комбінованої дії з іншими агресивними факторами. Розроблення нових матеріалів із підвищеною електрокорозійною стійкістю, а також оптимізація сучасних захисних покриттів і систем заземлення є основними напрямами. Особливу увагу слід приділити адаптації та впровадженню передових обчислювальних методів, таких як фізично-інформовані нейронні мережі, для більш точного прогнозування та моделювання процесів деградації в складних умовах експлуатації залізничної інфраструктури.

Список використаних джерел

1. Ni Y., Zhu E. & Chen L. The Impact of Stray Currents on Chloride Transport in the Concrete of Urban Rail Transit Structures. *Buildings*. 2025. *15*(10). 1695. https://doi.org/10.3390/buildings15101695.
2. Liang H., Wu Y., Han B., Lin N., Wang J., Zhang Z. & Guo Y. Corrosion of Buried Pipelines by Stray Current in Electrified Railways: Mechanism, Influencing Factors, and Protection. *Applied Sciences*. 2024. *15*(1). 264. https://doi.org/10.3390/app15010264.
3. Tang K. Assessing Stray DC and AC Current-Induced Corrosion in Steel Fibre-Reinforced Concrete (SFRC) in Railway Tunnelling Construction. *International Journal of Civil Engineering*. 2024. https://doi.org/10.1007/s40999-024-01018-4.
4. Дудін О. А. Механізм впливу змінного струму витоку і високовольтної напруги на обводнені бетонні, залізобетонні та кам'яні споруди: дис. … канд. техн. наук. Харків: УкрДАЗТ, 2012. 276 с.
5. Li J. & Zhang Y. Durability evaluation for existing railway engineering: a review. *Railway Science*. 2024. https://doi.org/10.1108/rs-11-2023-0044.
6. Hayes N. W. *Effect of Alkali-Silica Reaction on Confined Reinforced Concrete*. Doctoral Dissertations. University of Tennessee. 2020. 5805. https://trace.tennessee.edu/utk_graddiss/5805.
7. Lovasi T. & Kouril M. Electrochemical chloride extraction (ECE) from a reinforced concrete structure may be accompanied with an electrochemical injection of healing agents (EICI) if such agents are positively charged and are able to migrate towards the activated reinforcement. *Athens Journal of Sciences*. 2019. 6(1). 4-12.
8. Angst R. Corrosion-related damage of RC structures – a short review of possible limit states. *RILEM Technical Letters*. 2020. 5. 10-18.
9. Numerical modeling of multi-ionic transport with/without electrical field applied in sound and microcracked ordinary and ultra-high-performance fiber-reinforced concrete. *ResearchGate*. 2023. URL: https://www.researchgate.net/publication/373515064 _Numerical_modeling_of_multi-

ionic_transport_withwithout_electrical_field_applied_in_sound_ and_microcracked_ordinary_and _ultra-high-performance_fiber-reinforced_concrete.

10. Physics-informed neural networks (PINNs) offer a mesh-free approach to solving partial differential equations (PDEs) with embedded physical constraints. *MDPI*. 2023. 13(10). 1571. https://doi.org/10.3390/math13101571.

11. Al-Shetwi A. Q. High-Voltage Direct-Current (HVDC) Systems: A Comprehensive Review of Technological Evolution, Fault Characteristics, and Advanced Signal Processing Techniques for Fault Detection. *Energies*. 2025. 18(12). 3106. https://doi.org/10.3390/en18123106.

12. Diakov A. A. Електрифікація залізниць України: поточний стан та перспективи розвитку. *Збірник наукових праць УкрДУЗТ*. 2017. Вип. 171. 78-85.

13. Нові та старі виклики: як тримається українська інфраструктура під час війни. *EBA*. 2022. URL: https://eba.com.ua/novi-ta-stari-vyklyky-yak-trymayetsya-ukrayinska-infrastruktura-pid-chas-vijny/.

14. Stray current induced corrosion is a major technical challenge for modern electrified railway systems. *ROSAP*. 2007. URL: https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/13213/dot_13213_DS1.pdf.

Панченко Сергій Володимирович, доктор технічних наук, професор, ректор, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0002-7626-9933. Тел.: +380994886100. E-mail: panchenko074@ukr.net.
Дудін Олексій Аркадійович, кандидат технічних наук, доцент, декан будівельного факультету, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID ID: 0000-0002-6838-1669. Тел.: +38 (095) 090-72- 83. E-mail: dudin@kart.edu.ua.
Коваленко Ігор Станіславович, аспірант, будівельний факультет, Український державний університет залізничного транспорту. Тел.: +38 (097) 557-00-08. E-mail: kovalenko75@kart.edu.ua.
Філімонов Олександр Олександрович, аспірант, будівельний факультет, Український державний університет залізничного транспорту. Тел.: +38 (095) 900-18-27. E-mail: filimonov7@kart.edu.ua.
Фоменко Олександр Анатолійович, аспірант, будівельний факультет, Український державний університет залізничного транспорту. Тел.: +38 (099) 563-09-98. E-mail: fomenko9@kart.edu.ua.

Panchenko Serhii, Doctor of Technical Sciences, Professor, Rector of the Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0002-7626-9933. Tel.: +380994886100. E-mail: panchenko074@ukr.net.
Dudin Oleksii, PhD., Assoc. Prof., Dean of the Civil Engineering Faculty, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID ID: 0000-0002-6838-1669. Tel.: +38 (095) 090-72-83. E-mail: dudin@kart.edu.ua.
Kovalenko Igor, postgraduate student, Faculty of Civil Engineering, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: +38 (097) 557-00-08. E-mail: kovalenko75@kart.edu.ua.
Filimonov Oleksandr, postgraduate student, Faculty of Civil Engineering, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: +38 (095) 900-18-27. E-mail: filimonov7@kart.edu.ua.
Fomenko Oleksandr, postgraduate student, Faculty of Civil Engineering, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: +38 (099) 563-09-98. E-mail: fomenko9@kart.edu.ua.

Статтю прийнято 30.06.2025 р.

УДК: 691.322

ПІДГОТОВКА ФІБРОБЕТОННИХ КУБИКІВ, ЯКІ ЗАЗНАЛИ ВПЛИВУ ВИСОКОЇ ТЕМПЕРАТУРИ, ДО ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Кандидати техн. наук С. Ю. Берестянська, Є. І. Галагуря,
Л. Б. Кравців, М. О. Ковальов

PREPARATION OF FIBER CONCRETE CUBES EXPERIENCED AT HIGH TEMPERATURE FOR EXPERIMENTAL STUDIES

Phd (Tech.) Berestyanskaya, Phd (Tech.) E. Galagurya,
Phd (Tech.) L. Kravtsiv, Phd (Tech.) M. Kovalov

DOI: https://doi.org/10.18664/1994-7852.212.2025.336470

Анотація. *У статті проаналізовано останні публікації щодо впливу фібрового армування на міцнісні і деформативні характеристики фібробетонів і зроблено висновок про недостатню вивченість впливу температури на механічні властивості матеріалу. Проведено планування експерименту, в якому визначено необхідну кількість зразків. Показано склад бетонної суміші, технологію виготовлення зразків, а також висвітлено і обґрунтовано підготовку зразків до випробувань.*

Ключові слова: *фібра, фібробетон, сталефібробетон, базальтова фібра, бетонна матриця, температурний вплив, експериментальні дослідження.*

Abstract. Problem. *Fiber-reinforced concretes are varieties of composite materials. Such materials are commonly used nowadays. Concrete is fiber-reinforced using various fibrous materials, or fibers, which are evenly distributed over the volume of the concrete matrix and simultaneously provide its 3D reinforcement. Fiber-reinforced concrete has better stress-related strength characteristics than ordinary concrete. Since building structures must meet both the strength, rigidity and stability requirements, and the fire safety requirements, then for the extensive use of fiber-reinforced concrete structures, not only the external load design, but also temperature effect design should be conducted in the design phase. The strength and strain characteristics of fiber concrete exposed to high temperatures must be known for this purpose. In view of this, three series of prisms were manufactured and tested: the first series contained no fiber at all (control prisms), the second series contained basalt fiber, and the third series contained steel fiber.* ***Goal.*** *To determine the effect of temperature on the strength and deformation characteristics of fiber concretes, as well as to identify the dependences of these characteristics on temperature, it is necessary to conduct experimental studies. For this purpose, the experiment was planned.* ***Methodology.*** *Experiment planning is a procedure for determining the number and conditions for conducting research that are necessary and sufficient to solve the problem with the required accuracy. The purpose of the study is to determine the cubic strength of fiber concrete depending on the heating temperature and the type of fiber.* ***Results.*** *The article analyzes publications on the influence of fiber reinforcement on the strength and deformation characteristics of fiber concrete and concludes that the influence of temperature on the mechanical properties of the material is insufficiently studied.* ***Originality and practical value.*** *The experiment was planned, in which the required number of samples was determined. The composition of the concrete mixture, the technology of manufacturing samples is shown, as well as the method of preparing samples for research is described and justified.*

Keywords: *fiber, fiber-reinforced concrete, steel fiber-reinforced concrete, basalt fiber, concrete matrix, high temperature influence, experimental studies.*

Вступ. Останнім часом до будівельних матеріалів висувають більш вибагливі умови. Конструкції мають відповідати підвищеним міцнісним і деформативним характеристикам. Одним із перспективних способів поліпшення механічних характеристик матеріалу є створення композитних матеріалів. Введення в бетон фібри є найбільш розповсюдженим композитним матеріалом, який відповідає сучасним вимогам. Спектр сфер застосування фібробетонів дуже широкий, і кожна зі сфер висуває свої специфічні вимоги як щодо механічних, так і реологічних властивостей.

Рівномірне розповсюдження фібри по об'єму бетонної матриці забезпечує її тримірне зміцнення, закріплюючи внутрішню структуру своїми волокнами. При цьому властивості фібробетону залежать від виду самої фібри, її вмісту в бетонній матриці та розмірів [1, 2].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Армований фібрами бетон у декілька разів перевищує міцнісні і деформативні характеристики звичайного бетону, однак недостатня вивченість властивостей волокон у бетонній матриці обмежує сфери і об'єми застосування фібробетонів у будівництві, незважаючи на те, що використання неметалевих волокон виключає проблеми, пов'язані з корозією.

За останній час багатьма авторами проведені експериментальні дослідження, які показують вплив різних характеристик фібри на міцнісні і деформативні характеристики фібробетону за різних видів деформацій [3-7]. Разом із цим існує недостатність методів розрахунку таких матеріалів щодо різних впливів, а саме температурного впливу.

Мета та завдання дослідження. Проєктуючи конструкції, визначають не тільки міцнісні і деформативні характеристики, а і межу вогнестійкості. Тому з проєктуванням має бути розроблений математичний апарат, який давав би змогу виконувати розрахунки на температурний вплив. Для цього необхідно знати залежності між температурою і механічними характеристиками фібробетону.

Аналіз літературних джерел виявив недостатню вивченість впливу температури на міцнісні та деформативні характеристики фібробетонів. Тому метою дослідження є підготовка фібробетонних кубиків, які зазнали температурного впливу, до експериментальних досліджень.

Експериментальні дослідження фібробетонних кубиків. *Планування експерименту.* Для визначення впливу температури на міцнісні і деформативні характеристики фібробетонів, а також виявлення залежностей цих характеристик від температури необхідно провести експериментальні дослідження. З цією метою було виконано планування експерименту. Планування експерименту – це процедура визначення кількості і умов проведення досліджень, необхідних і достатніх для вирішення сформульованого завдання з потрібною точністю. Метою дослідження є визначення кубикової міцності фібробетону залежно від температури нагрівання та виду фібрового волокна. Вміст фібри та її характеристики в цьому дослідженні не розглянуто, а прийнято за джерелами [3-7]. Отже, температура і вид фібри – це фактори, які впливають на відгук системи, тобто результат експерименту. У нашому випадку це межа міцності. У дослідженні розглянуто три види армування (сталева фібра, базальтова фібра і контрольний бетонний зразок без фібри). Властивості зразків будемо визначати для таких температур: 20 °C, 60 °C, 90 °C, 120 °C, 200 °C, 400 °C, 600 °C, 800 °C. Отже, кількість рівнів факторів є неоднаковою, і вони незалежні один від одного. Кількість можливих різних дослідів N визначають за виразом

$$N = p^k \cdot n = 72, \qquad (1)$$

де $p = 3$ – кількість рівнів;
$k = 2$ – кількість факторів;
$n = 8$ – кількість значень температури.

Отже, необхідно виготовити 72 кубики: 24 – зі сталевою фіброю, 24 – базальтовою і 24 – без фібри [8].

Склад і підготовка зразків. Марка бетону і відповідно склад бетонної суміші були розраховані для класу С 20/25: портландцемент М 400 – 437,5 кг/м^3, щебінь фракції 5-10 мм – 1158,12 кг/м^3, пісок річний - 552,6 кг/м^3, вода – 210 л/м^3 (визначали за графіками Міронова). Такий склад було розраховано виходячи з рухомості бетонної суміші 5 см. Аналіз впливу видів фібрового армування на міцнісні та деформативні характеристики розглянуто в роботах [7-9], де зроблено висновки про раціональні параметри фібрового армування для базальтової і сталевої фібри. Отже, для виготовлення зразків було використано:

- базальтову фібру довжиною 12 мм, яку додавали в кількості 0,2 % маси цементу;
- сталеву фібру «Чілябінка», яку додавали в кількості 32,536 кг/м^3 бетону [10].

Фібру вводили в цемент і ретельно перемішували вручну. Усі компоненти засипали в бетонозмішувач і ретельно перемішували.

Для проведення випробувань виготовили три серії зразків: із базальтовою фіброю (серія КББ), сталевою фіброю (серія КСБ) і контрольна серія без додавання фібри (КОБ). Кожна серія – це 24 кубики. До відповідних температур нагрівали по три кубики. Усі зразки маркували (рис. 1).

Рис. 1. Три серії зразків, які були нагріті до температури 600 ^{0}С:
а – без додавання фібри; б – із додаванням базальтової фібри;
в – із додаванням сталевої фібри

Для виготовлення зразків застосовували металеві форми розміром 10х10х10 см, які змазували машинним маслом, а потім заповнювали бетонною сумішшю. Ущільнювали на вібростолі до появи цементного молочка. Залиту у форми бетонну суміш витримували у формах протягом трьох діб, після цього опалубку знімали, і зразки знаходились у вологій тирсі протягом 28 діб за нормальної температури [11]. Після виготовлення зразків їх необхідно було підготувати для випробувань. Для цього кубики нагрівали до температур 20 °С, 60 °С, 90 °С, 120 °С, 200 °С, 400 °С, 600 °С, 800 °С у муфельній печі зі швидкістю нагрівання 150 °С/год. Після досягнення заданої температури зразки витримували під впливом цієї температури 4 год, а потім залишали в печі до повного охолодження. Така схема нагрівання була застосована відповідно до роботи [12].

Висновки. Для виконання вимог протипожежної безпеки на стадії проєктування виконують розрахунки з метою визначення межі вогнестійкості. Для цього необхідно знати залежність міцнісних і деформативних характеристик

фібробетонів від температури. Аналіз літературних джерел виявив недостатню вивченість цього питання. Тому провели планування експерименту, що дало змогу визначити необхідну кількість зразків для випробування. Розраховано склад бетонної суміші, ретельно описано технологію виготовлення зразків, описано і обґрунтовано методику підготовки зразків до випробувань.

Список використаних джерел

1. Берестянская А. А., Гаврилко Н. Н., Быченок И. В. Особенности расчета и проектирования сталефибробетонных конструкций. *Збірник наукових праць Полтавського національного технічного університету ім. Ю. Кондратюка. Сер. Галузеве машинобудування, будівництво.* 2014. Вип. 3(2). С. 20-25.
2. Попов С. В., Брагинский В. Г. О результатах использования волокна армирующего полипропиленового в качестве фибры для изготовления бетонов. *Вісник Донбаської ДАБА.* 2005. Вип. 1(49). С. 35-38.
3. Василовская Н. Г., Енджиевской И. Г., Калугин И. Г. Цементные композиции дисперсно-армированные базальтовой фиброй. *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. 2011. Вип. 3. С. 153-158.
4. Талантова К. В. Строительные конструкции с заданными свойствами на основе сталефибробетона: дис. … д-ра техн. наук: 05.23.2001/ Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова. Барнаул, 2009. 189 с.
5. Бугаевский С. А. Методы возведения каркасных систем нового типа. *Вестник Харьковского национального автодорожного университета.* 2012. Вып. 58. С. 78–84.
6. Пухаренко Ю. В. Научные и практические основы формирования структуры и свойства фибробетонов: дис. … д-ра техн. наук: 05.23.2005 / Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. Санкт-Петербург, 2004. 316 с.
7. Веревичева М. А., Берестянская А. А., Дериземля С. В. Выбор рациональных параметров фибрового армирования. *Строительство, материаловедение, машиностроение*. 2015. Вып. 82. С. 60-69.
8. Vatulia G., Berestianskaya S., Opanasenko E., Berestianskaya A. Substantiation of concrete core rational parameters for bending composite structures. *DYN-WIND'2017 – MATEC Web of Conferences.* 2017. Vol. 107. 00044 2017.
9. Vatulya G., Berestianskaya S., Berestianskaya A., Opanasenko E. Theoretical and Numerical Analyses of Thermal-Load Behavior of Steel-Concrete and Steel-Fiber-Concrete Slabs. *Journal of Civil Engineering and Construction*. 2016. Vol. 5(2). P. 98-104.
10. Берестянская С. Ю., Опанасенко Е. В., Берестянская А. А. Предпосылки для проведения экспериментальных исследований фибробетонов на температурные воздействия. *Тези доповідей 6-ї Міжнар. наук.-техн. конф. «Проблеми надійності на довговічності інженерних споруд та будівель на залізничному транспорті»*. 2017. С. 101-102.
11. ДСТУ Б В.2.7-217:2009. Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення призмової міцності, модуля пружності і коефіцієнта Пуассона. Чинний від 2009-12-22. Київ: Мінрегіонбуд України, 2010. 20 с.
12. Милованов А. Ф. Огнестойкость железобетонных конструкций при пожаре. Москва: Стройиздат, 1986. 225 с.

Берестянська Світлана Юріївна, кандидат технічних наук, доцент кафедри будівельної механіки та гідравліки, Український державний університет залізничного транспорту. E-mail: s.berestyanskaya@gmail.com. ORCID ID: 0000-0002-4111-3138.

Галагуря Євгеній Іванович, кандидат технічних наук, доцент кафедри будівельної механіки та гідравліки, Український державний університет залізничного транспорту. E-mail: evgeniygalagurya@gmail.com.
ORCID ID: 0000-0002-3075-8651.
Кравців Лариса Богданівна, кандидат технічних наук, доцент кафедри будівельної механіки та гідравліки, Український державний університет залізничного транспорту. E-mail: kravtsiv_bmg@kart.edu.ua.
ORCID ID: 0000-0003-4632-6148.
Ковальов Максим Олександрович, кандидат технічних наук, доцент кафедри будівельної механіки та гідравліки, Український державний університет залізничного транспорту. E-mail: kovalev_bmg@kart.edu.ua.
ORCID ID: 0000-0003-2104-3061.

Berestianskaya Svetlana, PhD (Tech). Assoc. Prof., department of structural mechanics and hydraulics, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID ID: 0000-0002-4111-3138. Tel.: (057) 730-10-70.
E-mail: s.berestyanskaya@gmail.com.
Galagurya Evgeniy, PhD (Tech). Assoc. Prof., department of structural mechanics and hydraulics, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID ID: 0000-0002-3075-8651. Tel.: (057) 730-10-70.
E-mail: evgeniygalagurya@gmail.com.
Kravtsiv Larysa, PhD (Tech). Assoc. Prof., department of structural mechanics and hydraulics, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID ID: 0000-0003-4632-6148. Tel.: (057) 730-10-70.
E-mail: Laura_Kravtsiv@ukr.net.
Kovalov Maksym, PhD (Tech). Assoc. Prof., department of structural mechanics and hydraulics, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID ID: 0000-0003-2104-3061. Tel.: (057) 730-10-70.
E-mail: maks_kov@ukr.net.

Статтю прийнято 30.06.2025 р.

УДК 620.193.01:625.143.2

МЕХАНІЗМ І КІНЕТИКА ЕЛЕКТРОКОРОЗІЇ РЕЙКОВОЇ СТАЛІ ТА РЕСУРС РЕЙОК У ЗАЛІЗНИЧНИХ ТУНЕЛЯХ

Канд. техн. наук О. А. Плугін, доктори техн. наук А. А. Плугін, Е. С. Геворкян, асп. М. А. Муригін

KINETIC OF ELECTROCORROSITION AND THE LIFE OF RAILS IN RAILWAY TUNNELS

PhD (Tech.) O. A. Pluhin, Dr. Sc. (Tech.) A. A. Plugin, Dr. Sc. (Tech.) E. S. Gevorkyan, post graduate student M. A. Murygin

DOI: https://doi.org/10.18664/1994-7852.212.2025.336481

Анотація. *Проаналізовано нормативні та літературні джерела щодо ресурсу конструкцій і елементів верхньої будови колії в залізничних тунелях. Показано, що нормативні документи АТ «Укрзалізниця» не передбачали заміну рейок і скріплень у кількості, що фактично виходять із ладу, що ускладнювало матеріально-технічне забезпечення поточного утримання та капітальних ремонтів. Виконано теоретичні дослідження і проаналізовано результати експериментальних і натурних досліджень корозії та електрокорозії конструкцій і елементів верхньої будови колії в тунелях. Встановлено, що найбільш інтенсивно зазнають корозії рейкові скріплення, шийка та, особливо, підошва рейки. Розкрито механізм електрокорозійного руйнування, встановлено чинники, які впливають на інтенсивність електрокорозії. Розроблено механізм електрокорозії підошви рейок, за яким під*

впливом наведеного на рейку під час проходження електрорухомого складу позитивного пульсуючого однонаправленого електричного потенціалу відбувається її вертикальна поляризація, яка змінює електроповерхневий потенціал зерен перліту сталі на кшталт зміни абсолютного електроповерхневого потенціалу до рівноважного під впливом pH. Обґрунтовано залежності величини електроповерхневого потенціалу перліту, еквівалентної величини pH і швидкості корозії, мм/р., від величини потенціалу на рейці. За результатами експериментальних і натурних досліджень розроблено пропозиції з корегування нормативних термінів експлуатації конструкцій і елементів верхньої будови колії в залізничних тунелях, зокрема рейок.

***Ключові слова**: залізниця, тунель, рейка, електрифікація, корозія, електрокорозія, ресурс.*

***Abstract.** An analysis of regulatory and literature sources regarding the service life of structures and elements of the railway track superstructure in tunnels has been carried out. It is shown that the regulatory documents of JSC «Ukrzaliznytsia» did not provide for the replacement of rails and fastenings in the quantity that actually fails in operation, which complicated the logistics and material support of current maintenance and capital repairs. Theoretical studies and analysis of the results of experimental and field investigations on corrosion and electrocorrosion of structures and elements of the track superstructure in tunnels have been conducted. It has been established that rail fastenings, the rail web, and especially the rail base are most intensively affected by corrosion. The mechanism of electrocorrosion damage has been revealed, and the factors influencing the intensity of electrocorrosion have been determined. A mechanism of rail base electrocorrosion has been developed. According to this mechanism, under the influence of a positive pulsating unidirectional electric potential induced on the rail during the passage of electric rolling stock, vertical polarization occurs, which alters the electro-surface potential of the pearlite grains in the steel similarly to how pH affects the absolute electro-surface potential in equilibrium. The dependencies of the electro-surface potential of pearlite, the equivalent pH value, and the corrosion rate in mm/year on the rail potential have been substantiated. A potential of 100 V on the rail is equivalent to the effect of an environment with pH = 2.6, corresponding to a steel corrosion rate of 0.91 mm/year. Based on the results of experimental and field studies, proposals have been developed to adjust the regulatory service life of structures and elements of the track superstructure in railway tunnels, particularly for rails.*

***Keywords:** railway, tunnel, rail, electrification, corrosion, electrocorrosion, service life.*

Актуальність теми дослідження. Однією з проблем експлуатації верхньої будови колії в залізничних тунелях є корозія рейок, рейкових скріплень, залізобетонних шпал, яка в деяких тунелях розвивається так інтенсивно, що потрібно заміняти набагато раніше відпрацьований нормований за пропущеним тоннажем або роками ресурс. Проте нормативні документи АТ «Укрзалізниця» не передбачали заміну пошкоджених рейок і скріплень у кількості, що ускладнювало матеріально-технічне забезпечення поточного утримання та капітальних ремонтів. Зазначена проблема ускладнена ще й тим, що вплив багатьох чинників на інтенсивність зносу є невивченим, заходи із захисту чинними нормативними документами не передбачені або є надто недосконалими. Отже, виявлення впливу різних чинників на інтенсивність корозії та електрокорозії рейок, рейкових скріплень, залізобетонних шпал у тунелях є нерозв'язаною науковою проблемою, а розроблення заходів із запобігання, обґрунтування раціональних термінів служби рейок, рейкових скріплень, залізобетонних шпал – актуальним практичним завданням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Ресурс матеріалів і конструкцій верхньої будови колії, зокрема на залізницях України, встановлено за ДСТУ [1]. Ресурс вимірюють напрацюванням – пропущеним тоннажем, млн т брутто, або роками експлуатації. Залежно від категорії та конструкції колії (безстикова, ланкова) і якості рейок рейко-шпальна решітка має такий ресурс до заміни: безстикової колії – 800 млн т брутто, ланкової – 700 млн т брутто, у роках для безстикової колії – 30, ланкової – 25 (для I–IV категорій колії і рейок масою не менше 60 кг/пог. м вищої і I категорій).

Категорії колії – швидкісна (із рухом пасажирських поїздів понад 160 км/год), I–VII відповідають категоріям залізничних ліній [2] і встановлені залежно від вантажонапруженості, млн т км брутто/км/р., і швидкості руху пасажирських і вантажних поїздів.

У ДСТУ [1] після напрацювання зазначеного ресурсу передбачено заміну рейко-шпальної решітки під час капітальних ремонтів. Для колій швидкісної, I–IV категорій призначають капітальний ремонт, під час якого замість знятої укладають рейко-шпальну решітку з новими рейковими плітями, шпалами, скріпленнями. Для колій менших категорій призначено капітальний ремонт із використанням старопридатних рейок (шпали та скріплення нові) або капітальний ремонт із використанням старопридатних матеріалів (рейки, шпали та скріплення старопридатні або у сполученні з новими).

Норми пропущеного тоннажу зменшено на 10–30 % для таких ділянок: із рейками Р50; плітями середньою довжиною менше 500 м; на щебеневому баласті зі слабких гірських порід; із підвищеним осьовим навантаженням; якими перевозять вугілля, руду, торф, добрива, солі; рекуперативного гальмування; із шахтними підробітками; побудованих в особливо важких умовах. У разі збіжності декількох знижувальних чинників із цього переліку сумарне зменшення не має перевищувати 40 %. Як бачимо, зазначеними нормами вплив електрифікації врахований тільки для ділянок рекуперативного гальмування, а особливості експлуатації в обводнених умовах або тунелях не враховані.

Норми [3], нещодавно замінені стандартом [4], передбачали часткову заміну рейок під час поточного утримання, комплексно-оздоровчого та середнього ремонту колії і містили норми витрат рейок та інших матеріалів верхньої будови колії під час цих робіт.

Дефекти і пошкодження, що накопичені і визначають термін служби конструкцій та елементів верхньої будови колії, класифіковано в різних джерелах: залізобетонні шпали [5], рейки [6]. У роботі [5] немає корозійних пошкоджень, хоча їх виділяють багато дослідників [7, 8].

Із 99 видів дефектів як корозійні визначено тільки № 59 і 69 [6]. Дефект (пошкодження) № 59 – корозія шийки рейки (рис. 1, а), причинами якої [6] є атмосферний вплив і дія хімічних речовин, а місцями найбільш вірогідного утворення – тунелі та місцевості з солончаковими ґрунтами. Рейки Р65 з глибиною корозії шийки понад 3 мм і Р50 понад 2 мм визнано дефектними і такими, що підлягають плановій заміні. У разі глибини корозії понад 6 і 5 мм відповідно рейки слід заміняти в першу чергу.

Дефект (пошкодження) № 69 – корозія, підгоряння або місцевий знос підошви рейок і втомлювальні тріщини через них (рис. 1, б). Причинами корозії підошви рейок [5] визнано атмосферний вплив, контакт із матеріалами, що акумулюють вологу (дерев'яними, гумовими та гумокордовими прокладками і картками для виправлення колії), витік тягового струму, а місцями найбільш вірогідного утворення – тунелі, місцевості з солончаковими ґрунтами та вологим кліматом. Автор роботи [9] зазначає, що на корозію підошви рейки впливають обводненість, агресивність підземних вод, загазованість довгих тунелів (понад 500 м).

Рейки Р65 із каверною або місцевим зносом підошви глибиною (із краю) не більше 7 мм і Р50 – 6 мм є дефектними і підлягають плановій заміні. У разі глибших каверн або зносу рейки визнають гостродефектними, їх потрібно негайно замінити.

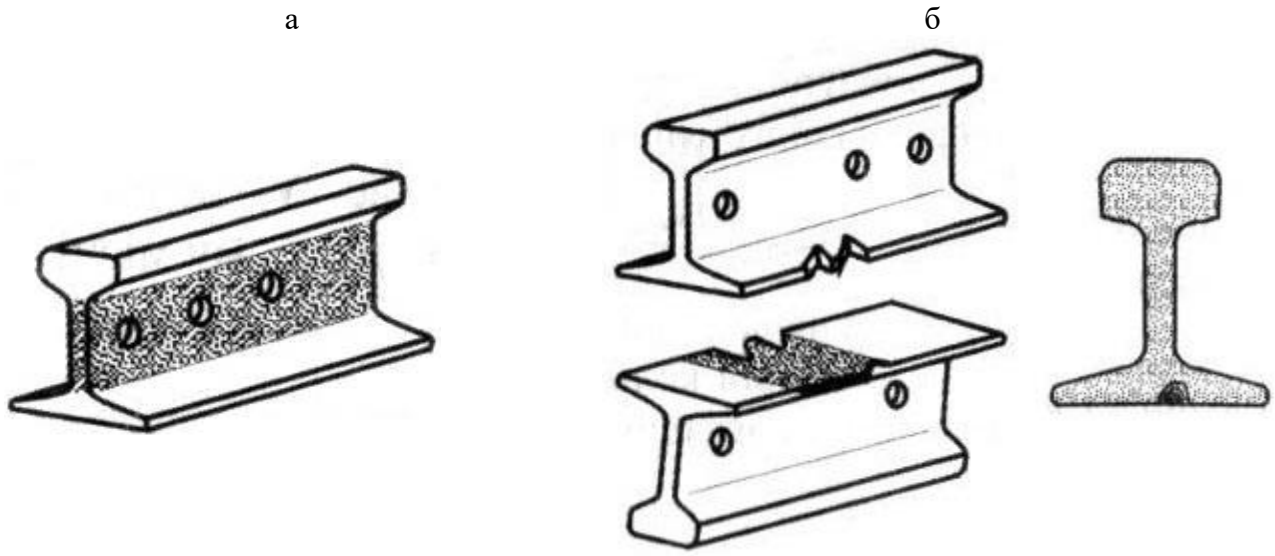


Рис. 1. Корозійні дефекти рейок: а – корозія шийки рейки (дефект № 59);
б – корозія, підгоряння або місцевий знос підошви рейок і втомлювальні тріщини через них (дефект № 69)

Отже, корозійні пошкодження рейок – корозія шийки та підошви найчастіше відмічають саме в тунелях. Проте даних про залежність кінетики їхнього розвитку від різних чинників у роботах [5, 9] немає, як і в інших джерелах, що ускладнює прогнозування виходу рейок і нормування їх заміни.

Металеві та залізобетонні конструкції і споруди залізниць, у т. ч. рейки та рейкові скріплення, зазнають електрокорозії струмами витоку з контактної мережі постійного струму, особливо в обводнених умовах [10, 11].

На залізницях України до широкомасштабного вторгнення налічували 44 тунелі, із яких 41 експлуатовані, у т. ч. новий Бескидський тунель, три законсервовані [12]. Довжина тунелів складає від 41 до 2063 м, найбільша кількість тунелів – 20 шт. або 35 % загальної протяжності має довжину від 200 до 500 м. Вік тунелів – від 2 до 146 років, найбільша кількість тунелів (23 шт. або 49 % загальної протяжності) експлуатована від 100 до 134 років. Отже, проблема виходу і заміни рейок у тунелях є досить масштабною.

Залізничні тунелі найчастіше будують гірським способом. До XX століття оправу тунелів зводили із кам'яного мурування, у XX столітті – із збірних залізобетонних тюбінгів, у XXI столітті – переважно із монолітного залізобетону [13, 14]. На залізницях України найстаріші тунелі мають оправу із кам'яного мурування, більш сучасні – залізобетонну [12], новий двоколійний Бескидський тунель зведено вже із монолітного залізобетону.

Виникнення та розвиток більшості пошкоджень (дефектів) тунелів і колії в них, як показали дослідження [15, 16], є наслідком їх обводненості. Насичуючи оправу тунелю та фільтруючись крізь неї, вода спричиняє вилуговування,

вивітрювання, розморожування цементного розчину, бетону, кам'яного мурування. Тому одним із основних завдань утримання тунелів є усунення або хоча б мінімізація їх обводненості. У сучасній практиці обводненості тунелів намагаються позбутися різними способами [13], які можна об'єднати у дві групи: осушення гірського масиву та гідроізоляція тунелю. Заходи з осушення гірського масиву передбачають перехоплення та організоване відведення атмосферних опадів із надтунельної поверхні, а також підземних вод у безпосередній близькості від оправи і тих, що надходять крізь неї. Заходи гідроізоляції передбачають забезпечення водонепроникності самої оправи тунелю або заоправних порід.

Конструкція верхньої будови колії в тунелях переважно така сама, як і на мостах із їздою по баласту – безстикова або ланкова на залізобетонних чи дерев'яних шпалах. У найдовшому на залізницях України Лутугинському тунелі (зараз на тимчасово окупований території) колію укладали на безбаластне полотно із залізобетонних плит. Під час нового будівництва тунелів зараз у світі перевагу віддають безбаластній конструкції на залізобетонних плитах [14]. У Готардському базовому тунелі [14], уведеному в експлуатацію у 2016 році, конструкція колії безстикова на безбаластній монолітній залізобетонній підрейковій основі, у якій залізобетонні підрейкові блоки ізольовані від залізобетонної монолітної плити полімерними оболонками, що забезпечують зниження шуму та вібрації, а також посилюють електричну ізоляцію рейок. Від такої конструкції можна очікувати мінімальних електрокорозійних ушкоджень матеріалів верхньої будови колії.

Основна частина дослідження. Механізм електрокорозії рейкової сталі. Рейки виготовляють із низьколегованих сталей (У10А, R260) перлітної структури із вмістом вуглецю С – 0,6–0,8 %, марганцю Mn – 0,8–1,3 %, кремнію Si – 0,2–0,6 %. За традиційними уявленнями [11], корозія сталі в атмосферних умовах є електрохімічною, природа якої обумовлена електрохімічною гетерогенністю поверхні розподілу метал – електроліт із виникненням на поверхні анодних і катодних ділянок. У літературі наведено різні схеми електрохімічного процесу, але, незважаючи на їхні відмінності, усі вони в принципі схожі (узагальнені на рис. 2) і передбачають обов'язковість анодного та катодного процесів на анодній і катодній ділянках. Проте причину і кількісний механізм виникнення цих ділянок, на нашу думку, глибоко не розкрито або здійснено описово. Унаслідок цього неможливо кількісно описати процес електрохімічної корозії та електрокорозії сталі. Виконаємо критичний аналіз традиційних схем та опису процесу електрохімічної корозії.

Під час електрохімічної корозії сталі у складі анодного процесу на анодній ділянці відбувається реакція окиснення (віддавання електронів) [11] атомів заліза Fe^0 з утворенням катіонів Fe^{2+} відповідно (рис. 2):

$$Fe^0 = Fe^{2+} + 2e^-. \qquad (1)$$

Це призводить до зміщення заряду анода в позитивний бік – анодної поляризації. Анодна поляризація призводить до того, що катіони Fe^{2+}, утворені за рахунок окиснення, переходять в електроліт (рис. 2).

Катодний процес полягає в тому, що електрони, звільнені в анодній зоні, переміщуються всередині сталі від анодних ділянок до катодних. Це призводить до зміщення заряду катода в негативний бік – катодної поляризації. Катодна поляризація призводить до реакції відновлення (прийняття електронів) киснем (киснева деполяризація). Киснева деполяризація характерна для слабокислих, нейтральних і лужних середовищ:

$$½O_2 + 2e^- + H_2O = 2OH^-. \qquad (2)$$

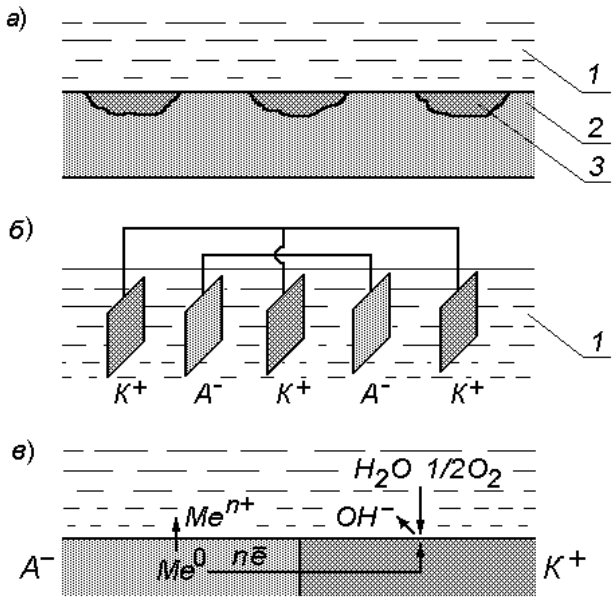


Рис. 2. Схема електрохімічної корозії металу: а – домішки на поверхні металу; б – утворення багатоелектродного гальванічного елемента; в – анодний і катодний процеси; 1 – електролітичне середовище; 2 – метал із більш негативним (менш позитивним) потенціалом (анод); 3 – метал із більш позитивним (менш негативним) потенціалом (катод)

У кислих середовищах може відбуватися реакція відновлення водню (воднева деполяризація):

$$2H^+ + 2e^- = H_2, \qquad (3)$$

але тільки в повітряному середовищі, що містить кислі гази CO_2, SO_2, NO, NO_2, H_2S, які, розчиняючись у конденсатній плівці води, знижують значення її pH до 5 і навіть менше. Отже, pH має вплив на інтенсивність електрохімічної корозії сталі. За такої кислотності конденсатної плівки в разі надлишку кисню повітря катодна реакція відбувається з нейтралізацією протонів киснем повітря за рівнянням

$$O_2 + 2e^- + 2H^+ = H_2O. \qquad (4)$$

Виходячи з цих реакцій, у нейтральних і лужних середовищах відбуваються вторинні реакції:

$$Fe^{2+} + 2OH^- = Fe(OH)_2, \qquad (5)$$
$$2Fe(OH)_2 + ½O_2 + H_2O = 2Fe(OH)_3. \qquad (6)$$

Таке пояснення не дає змогу оцінити кінетику процесу. Схема електрохімічної корозії, подана на рис. 2, по суті є окремим випадком корозії на межі трьох фаз, що не повністю відображує дійсну схему і механізм утворення анодної та катодної ділянок на поверхні сталі, а отже, і механізм електрохімічної корозії. Схема корозійного елемента і електрохімічної корозії (рис. 2) є надто умовною, яка не відображує, на нашу думку, дійсну структуру металів у поверхневих шарах.

Дійсний механізм виникнення анодної та катодної ділянок і механізмів електрохімічної корозії та електрокорозії сталі (як і більшості інших металів) обумовлений реальною мікро- та субмікроструктурою сталі, а також існуванням у всіх простих (хімічних елементів) і складних речовин абсолютних електроповерхневих потенціалів, В. У контакті з водою відбувається розподіл заряду, блоки і зерна набувають подвійного електричного шару ПЕШ з потенціаловизначальними іонами ПВІ Fe^{2+} і

відповідно протиіонами OH^- (що містяться у воді) або O^{2-}, які утворені за рахунок відновлення кисню електронами. У цьому разі встановлено рівноважні електроповерхневі потенціали ψ_{en}^{p} [17]. У роботі [18] показано, що у сталі рівноважний потенціал зерен фериту, перліту є більш негативним порівняно з цементитом міжзеренної границі у сталях із феритною структурою або шарів у зернах перліту.

Усе це дає змогу розробити кількісну теорію електрокорозії рейок, зокрема, у тунелях. Залізниці в Україні електрифіковані постійним струмом напругою 3,3 кВ або змінним напругою 27,5 кВ. Контактна мережа залізниць, електрифікованих постійним струмом, живиться від тягових підстанцій, розташованих уздовж лінії на відстані до 20 км, і розділена на окремі секції (рис. 3). У секції виділяють також контактну мережу станцій, парків, великих інженерних споруд – мостів, тунелів. На такі самі секції за допомогою ізолюючих стиків поділено і рейкові колії, які в колах живлення виконують функції зворотного проводу.

На контактний провід залізниці, електрифікованої постійним струмом, подано позитивний потенціал, на ходові рейки – негативний. Під час проходження секцією електричного рухомого складу ЕРС у колі живлення струм рейками протікає від ЕРС до відсмоктувальних ліній (зворотних кабелів підстанцій (рис. 3)). Рейки через скріплення, шпали і баласт у багатьох місцях електрично з'єднані із землею, яка фактично є паралельним їм провідником. Тому струм, що тече рейками, відгалужується в землю, як у паралельно приєднаний провідник, розтікається в землі (блукаючі струми), із якої поблизу тягових підстанцій знов натікає на рейки [10].

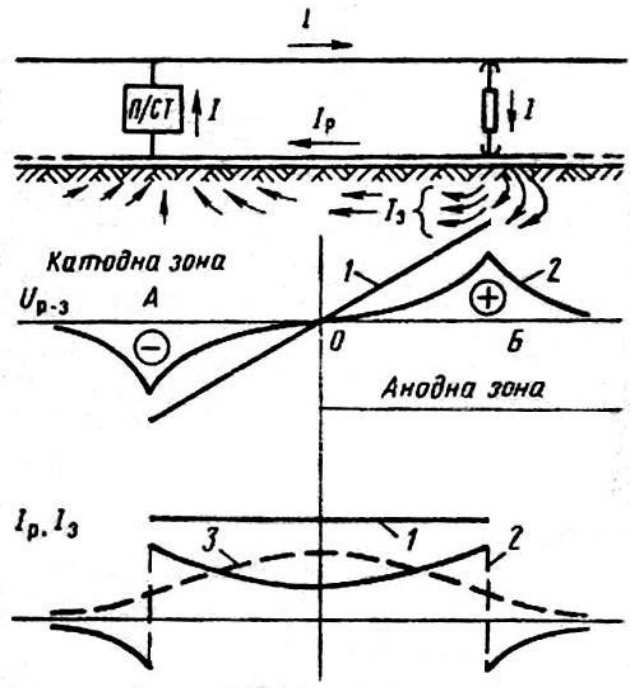


Рис. 3. Схема стікання тягового струму з рейкової колії і розподіл струмів і потенціалів уздовж рейок з однобічним живленням секції: I – тяговий струм; $I_р$ – струм у рейках; $I_з$ – струм у землі; $U_{р-з}$ – потенціал рейка – земля; 1 – значення за повної ізоляції рейок від землі; 2 – фактичні значення; 3 – струм у землі

Ділянка рейкової колії, із якої струм стікає, набуває відносно землі позитивного потенціалу і є анодною зоною, а ділянка, на яку струм натікає, залишається з негативним потенціалом і є катодною зоною (рис. 3). Із переміщенням ЕРС максимальний позитивний потенціал переміщується вздовж колії разом із ним, а максимальний негативний потенціал залишається закріпленим у точці підключення до відсмоктувальної лінії. Отже, існує й знакозмінна зона, яка залежно від місцезнаходження ЕРС може бути анодною чи катодною. В анодних зонах струми витоку стікають з елементів верхньої будови колії, у катодних зонах блукаючі струми натікають на елементи верхньої будови колії.

На електрифікованому постійним струмом рейковому транспорті струми витоку обумовлюють електрокорозію металевих конструкцій і деталей, арматури і навіть бетону залізобетонних конструкцій залізничних споруд, а блукаючі струми – близько розташованих металевих споруд. У таких спорудах ділянки, на які струми натікають, є катодними зонами, а з яких стікають − анодними, причому також існують знакозмінні зони.

Електрокорозійне руйнування металу полягає в його електрохімічному розчиненні на анодних ділянках, із яких в електролітичне середовище стікає постійний струм. Отже, на анодних ділянках колії електрокорозії зазнають рейки, скріплення, арматура залізобетонних конструкцій – шпал, мостових опор, тунельної оправи тощо.

На катодних ділянках колії, на які блукаючі струми натікають, електрокорозії металевих конструкцій і деталей, арматури залізобетонних конструкцій не відбувається.

Електрокорозії металевих конструкцій і деталей не відмічають також на рейковому транспорті, електрифікованому змінним струмом. У цьому випадку катодні та анодні процеси відбуваються на одних і тих самих ділянках і змінюються з частотою, яка виключає розвиток корозійних процесів.

Позитивний потенціал від ЕРС передається на рейку від колісних пар через невеликі за площею контакти, умовно точкові, що переміщуються разом із ним.

У цьому разі рейка в поздовжньому напрямку від ЕРС до відсмоктувальної лінії поляризується так, що ближча до ЕРС зона рейки (десь на половину відстані між відсмоктувальними лініями), набуває позитивного потенціалу, а частини, ближчі до відсмоктувальних ліній, – негативного. Електричний опір рейки на цих ділянках

$$R_{\text{р}} = \rho L/S_{\text{р}}. \qquad (7)$$

Для питомого електричного опору сталі $\rho = 12\cdot10^{-8}$ Ом·м, площі поперечного перерізу рейки Р65 $S_{\text{р}} = 82{,}65$ см^2 = 0,0083 м^2 та довжини ділянки близько $L = 10$ км = 10000 м

$$R_{\text{р}} = 12\cdot10^{-8}\cdot10000/0{,}0083 = 0{,}144$$
$$[\text{Ом}\cdot\text{м}\cdot\text{м}/\text{м}^2 = \text{Ом}].$$

Як бачимо, електричний опір рейки вкрай малий.

Через гранично малий електричний опір рейки і значний (порівняно з рейкою) опір ізолюючих деталей рейкових скріплень рейка поляризується – виникає поле поляризації напруженістю $E_{\text{пол}}$ також у напрямку від головки до підошви. У цьому разі електрони з підошви зміщуються в бік позитивного потенціалу на колісних парах, у головці рейки (у поперечному перерізі) накопичується надлишкова кількість електронів e^- (негативний заряд), а в нижній частині – надмірна кількість катіонів Fe^{2+} (позитивний заряд) із переходом через нульовий заряд у зоні нейтральної осі.

Ураховуючи це і форму рейки (рис. 4), припускаємо для спрощення, що весь позитивний заряд накопичується рівномірно в підошві рейки. Відповідно негативний – у головці рейки.

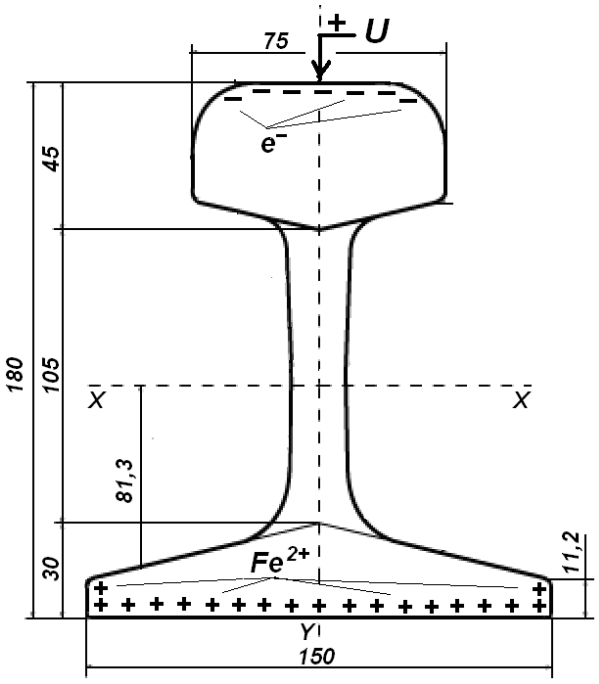


Рис. 4. Поляризація рейки під впливом потенціалу $U_р$

Напруженість поля поляризації залежатиме від потенціалу на рейці $U_р$ (або електричного заряду Q) і висоти рейки $H_р$:

$$E_{пол} = U_р/H_р = Q_р/H_р^2 \text{ [В/м]}. \quad (8)$$

Оскільки напруженість електричного поля – це щільність поверхневого заряду на відстані від нього $H_р$, що відповідає визначенню напруженості електричного поля, електричний заряд у підошві рейки дорівнює

$$Q_р = E_{пол}H_р^2 = UH \text{ [Кл]}. \quad (9)$$

Для висоти рейки $H_р$ = 180 мм = 0,018 м і максимально можливого для умов тунелів потенціалу на рейці 80 В електричний заряд дорівнюватиме

$$Q_р = 80\cdot0{,}18 = 14{,}4 \text{ [В·м = Кл]}.$$

Об'єм підошви рейки над підкладкою в місці стікання корозійного струму для ширини підкладки 140 мм дорівнюватиме

$$V_р \approx (11{,}2+(30–11{,}2)/2)\cdot150\cdot140 = 432600 \text{ мм}^3 = 432{,}6 \text{ см}^3 = 0{,}00433 \text{ м}^3.$$

Заряд $Q_р$ утворився з виникненням потенціалу на рейці за рахунок стікання з поверхні зерен перліту поверхневих потенціалвизначальних електронів ПОЕ (вільних електронів) і їх переходу в головку рейки.

Отже, на місці, звідки пішли електрони, залишаються катіони Fe^{2+}, зрушуючи в позитивний бік негативний абсолютний і рівноважний електроповерхневі потенціали зерен перліту, які приймемо рівними потенціалам зерен фериту [36] – $\psi_{еп}^0$ = –1,77 В і $\psi_{еп}^р$ = –1,36 В відповідно.

Питома поверхня зерен перліту розміром b складе

$$s_ф = 6b^2/b^3 = 6/b \text{ м}^2/\text{м}^3. \quad (10)$$

Для b = 13 мкм вона складе

$$s_ф = 6/(13\cdot10^{-6}) = 4{,}6\cdot10^5 \text{ м}^2/\text{м}^3.$$

Загальна площа поверхні зерен перліту в об'ємі, що розглядають,

$$S_ф = 4{,}6\cdot10^5\cdot0{,}00433 = 1992 \text{ [(м}^2/\text{м}^3)\cdot\text{м}^3 = \text{м}^2\text{]}.$$

Зміна густини поверхневого заряду зерен перліту в разі наведення на рейку потенціалу $U_р$ = 80 В складе

$$q_ф = U_р H_р/s_ф = 80\cdot0{,}18/1880 = 0{,}0072 \text{ Кл/м}^2. \quad (11)$$

Електроповерхневий потенціал сталі [36] зміниться:

$$\Delta\psi_{еп} = q_ф d_1/\varepsilon\varepsilon_0. \quad (12)$$

де d_1 – відстань між потенціалвизначальним іоном і протиіоном у подвійному електричному шарі, $2{,}52\cdot10^{-10}$ м;

ε – відносна діелектрична проникність вакууму, 1;

ε_0 – електрична стала, $8{,}85\cdot10^{-12}$ Ф·м.

$$\Delta\psi_{еп} = 0{,}0072\cdot2{,}52\cdot10^{-10} / 1\cdot8{,}85\cdot10^{-12} = 0{,}206 \text{ В}.$$

У результаті отримаємо

$$\Delta\psi_{еп} = 9{,}04\cdot10^{-5}\cdot U_р\cdot2{,}52\cdot10^{-10} / 1\cdot8{,}85\cdot10^{-12} = 2{,}57\cdot10^{-3}\cdot U_р, \text{ В}. \quad (13)$$

Наведений потенціалом на рейці рівноважний (на контакті з водою) електроповерхневий потенціал перліту сталі в підошві рейки

$$\psi_{еп} = \psi_{еп}^{р} + \Delta\psi_{еп} = 2{,}57\cdot10^{-3}\cdot U_р - 1{,}36, \text{ В}. \quad (14)$$

Отже, потенціал на рейці, що дорівнює $U_р$ = 80 В, зміщує потенціал на підошві рейки в позитивний бік. Таке зміщення потенціалу еквівалентно зменшенню pH розчину (конденсатної плівки, води у ґрунті) [36] до величини

$$pH = 7 - 2{,}57\cdot10^{-3}\cdot U_р/0{,}059 = -0{,}044U_р + 7, \quad (15)$$

що для $U_р$ = 80 В складе pH = 3,5.

Залежності величини потенціалу перліту сталі в підошві рейки $\psi_{еп}$ та еквівалентної величини pH від потенціалу на рейці $U_р$ (14) і (15) подано на рис. 5, а, б.

Кінетика електрокорозійного пошкодження рейок. Величини pH добре корелюють із даними [11] щодо швидкості корозії вуглецевої сталі, мм/р. (табл. 1).

Таблиця 1

Швидкість корозії вуглецевої сталі, мм/р., у неорганічних кислих середовищах

Ступінь агресивного впливу	pH	Швидкість корозії, мм/р.
Неагресивний або дуже слабо агресивний	7	0
	5,5	0,01
Слабо агресивний		
	4	0,1
Помірно агресивний (середньо агресивний)		
	2	1
Сильно агресивний		
	0	5

У результаті апроксимації залежності, наведеної на рис. 5, а, отримано рівняння регресії – поліном четвертого ступеня, коефіцієнт кореляції якого складає $R = 1$:

$$x = 0{,}0045pH^4 - 0{,}1019pH^3 + 0{,}873pH^2 - 3{,}3743pH + 5. \quad (16)$$

У результаті підстановки отримано рівняння

$$x = 1{,}687\cdot10^{-8}\cdot U_р^4 - 2{,}053\cdot10^{-6}\cdot U_р^3 + 1{,}086\cdot10^{-4}\cdot U_р^2 - 1{,}865610^{-3}\cdot U_р + 0{,}0097. \quad (17)$$

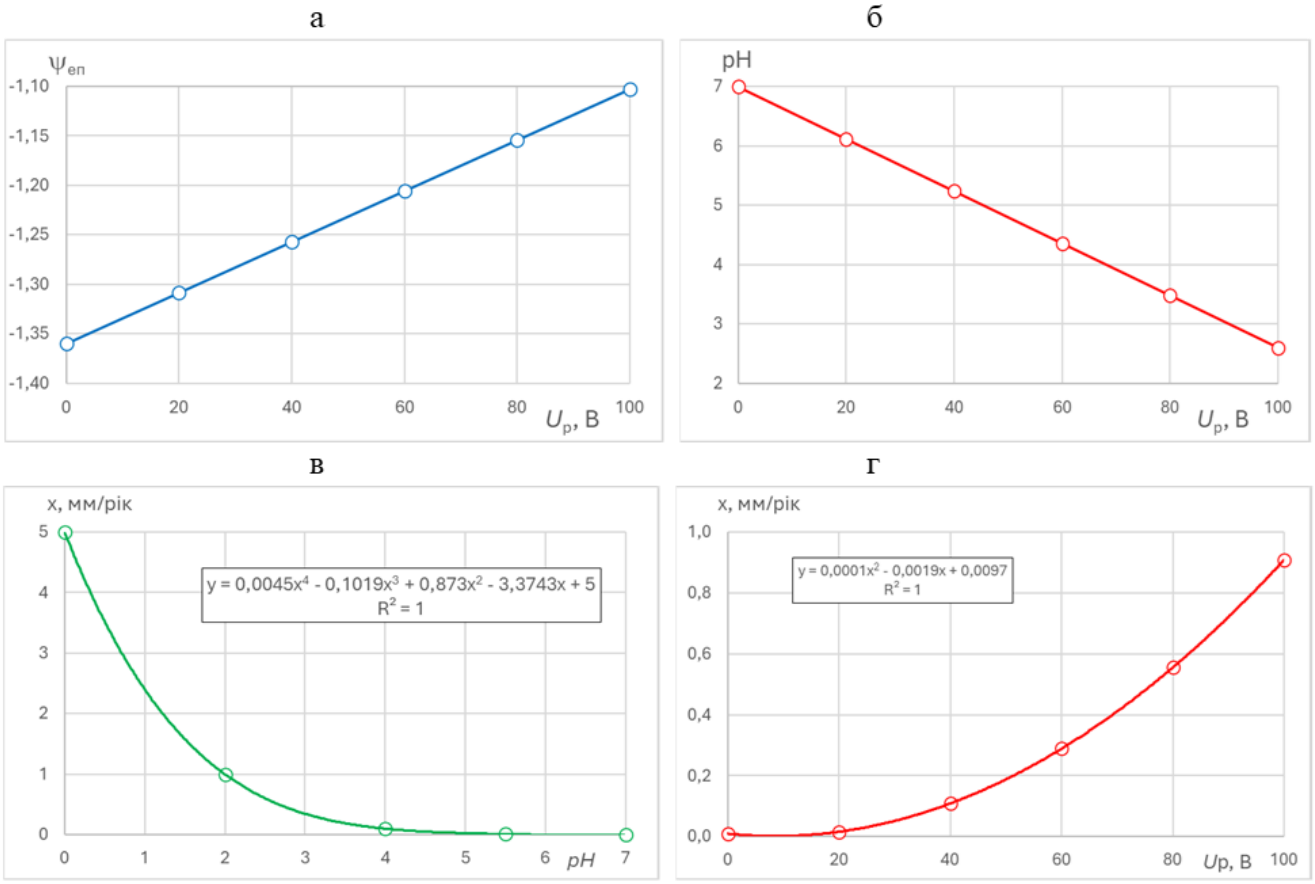


Рис. 5. Залежності від потенціалу на рейці $U_р$ електроповерхневого потенціалу перліту сталі в підошві рейки $\psi_{еп}$ (а), еквівалентної величини pH (б), швидкості корозії x, а також залежність швидкості корозії x від еквівалентної величини pH

Рівняння (17) може бути використано для оцінювання швидкості корозії рейок в обводнених залізничних тунелях залежно від величини потенціалу на рейках, який виникає під час проходження тунелем ЕРС.

Отже, якісно можна порівняти електрокорозію рейок від позитивного потенціалу на них із корозією в кислих середовищах. Поверхня блоків перліту в зернах сталі окиснюється з передаванням електронів молекулам (атомам), будучи

мікрокатодами за традиційною схемою електрохімічної корозії. Оскільки відрив катіонів заліза здійснюється з кутів цих блоків, анодами є точки атомних розмірів, а не ділянки.

Отже, теоретично доведено, що однією з причин корозії підошви рейок (дефект № 69) є струми витоку з рейок на електрифікованих ділянках залізниць, а ця корозія є електрокорозією. Електрокорозія підошви рейок відбувається в умовах наведення на рейку позитивного потенціалу під час проходження ЕРС і обводненості, а її інтенсивність залежить від величини потенціалу на рейці. Уперше отримано кінетичне рівняння просування корозії в підошву рейки залежно від потенціалу на ній, який наведений під час руху рухомого складу.

Аналіз результатів натурних досліджень. Проаналізовано результати натурних досліджень за роботою [16]. У складі натурних досліджень тунелів було виявлено показники обводненості тунелю, пошкоджень оправи і верхньої будови колії, визначено електричні потенціали на рейках та оправі. За показник обводненості приймали відсоток площі поверхні оправи, яка знаходиться в мокрому стані (з активними течіями) і вологому стані (волога без активних течій). Електричні потенціали вимірювали в режимі реального часу за допомогою цифрового мультиметра з високим вхідним опором Sanwa PC510 і ПЗ PC Link до нього за схемою, наведеною на рис. 6.

Було обстежено 13 залізничних тунелів на залізницях України: Донецькій – три, неелектрифікованих, довжиною від 41 м до 2063 м; Львівській – п’ять, електрифікованих постійним струмом, довжиною від 142 до 1746 м (рис. 6, а); Південній – один, електрифікований постійним струмом; Південно-Західній – один, електрифікований змінним струмом; Придніпровській – три, електрифікованих постійним струмом, довжиною від 301 до 453 м.

а б

Рис. 6. Вимірювання потенціалів на рейці та поверхні оправи тунелю: а – тунель на електрифікованій постійним струмом ділянці Львівської залізниці; б – схема вимірювання; 1 – оправа тунелю; 2 – рейкова колія; 3 – вимірювальні прилади (цифрові мультиметри Sanwa PC510); 4 – кріплення провідника вимірювальної схеми до рейки затискачем; 5 – мідно-сульфатний електрод; 6 – заземлюючий електрод (сталевий стрижень ∅12 мм, забитий у вологу землю на глибину 0,5 м на відстані не ближче 25 м від порталу тунелю)

На рис. 7 подані характерні (із максимальною з отриманих величин потенціалів) залежності електричних потенціалів на рейці та поверхні оправи на рівні головки рейки від часу під час проходження ЕРС. Як бачимо, з наближенням ЕРС потенціал на рейці збільшувався до 115 В, а потім із віддаленням знов зменшувався. Те саме спостерігали під час проходження ЕРС сусідньою колією, але максимальна величина потенціалу складала 48 В.

а б

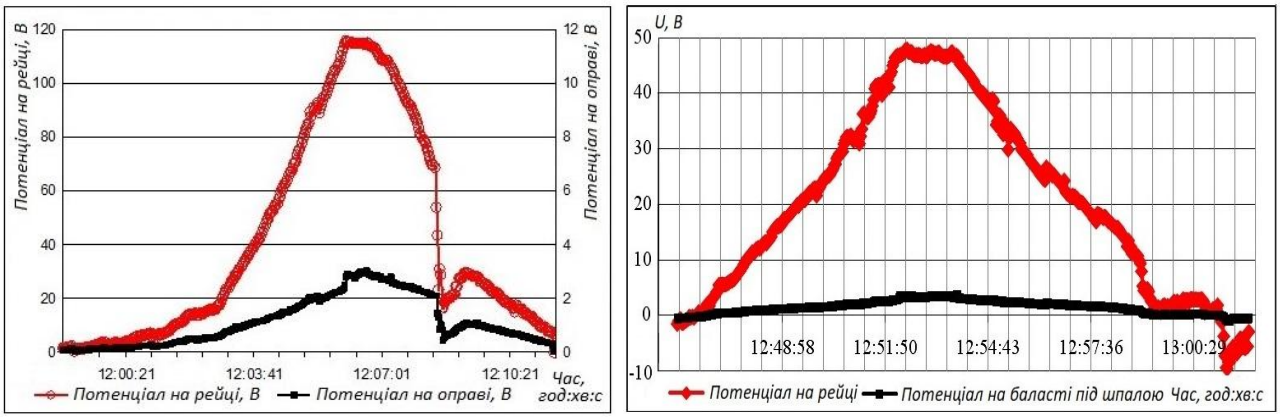


Рис. 7. Зміна в часі потенціалу U, В, на рейці, оправі тунелю на рівні головки рейки, баласті під шпалою під час проходження вантажного потяга:
а – колією, на якій вимірюють потенціал; б – сусідньою колією

На рис. 8 наведено найбільш характерні корозійні пошкодження елементів верхньої будови колії в тунелях. Як бачимо, у місцях більшої обводненості тунелю (із капежами) на шийці (рис 8, б) і підошві рейки (рис. 8, г), деталях скріплень (рис. 8, г), спостерігають більш глибокі корозійні ушкодження, що відповідають дефектам № 59 і 69 відповідно, ніж у менш обводнених місцях (рис. 8, а, в).

Натурні дослідження показали, що корозію елементів верхньої будови колії в тунелях спостерігали за їхньої обводненості від 0 до 90 % і величини постійного (пульсуючого) електричного потенціалу на рейці від 0 до +116 В. Корозію не спостерігали в тунелях з обводненістю від 0 до 15 % і потенціалу до +22 В, а також тунелі, електрифікованому змінним струмом. Отже, натурні дослідження підтвердили залежність інтенсивності корозії конструкцій оправи і верхньої будови колії від обводненості тунелів, наявності електрифікації постійним струмом і величини потенціалу на рейці. Зазначено також залежність інтенсивності корозії від довжини тунелів і, як наслідок, інтенсивності їх вентиляції, особливо за низької інтенсивності руху.

Експериментальні дослідження та аналіз результатів. Експериментальними дослідженнями імітували вплив електричного струму від проходження ЕРС на рейки та рейкові скріплення, що знаходяться в обводнених умовах. Дослідження проводили на зразках, складених із фрагменту рейки Р65 і підкладки, прикріплених костилями до фрагменту дерев’яної шпали (рис. 9, а, в), а також із фрагменту рейки, встановленої на бетон або деревину (рис. 9, б, в). Зразки встановлювали в комірки з проточною водою і накладали на них електричний потенціал за схемами рис. 9, в, г. На зразки

згідно зі схемами рис. 9, в, г подавали пульсуючий однонаправлений електричний потенціал 40 *В*, що моделює проходження ЕРС, у режимі 10 хв – увімкнуто, 7 хв – вимкнено, протягом 1850 год. Напругу і силу струму реєстрували в режимі реального часу з дискретністю 2 с.

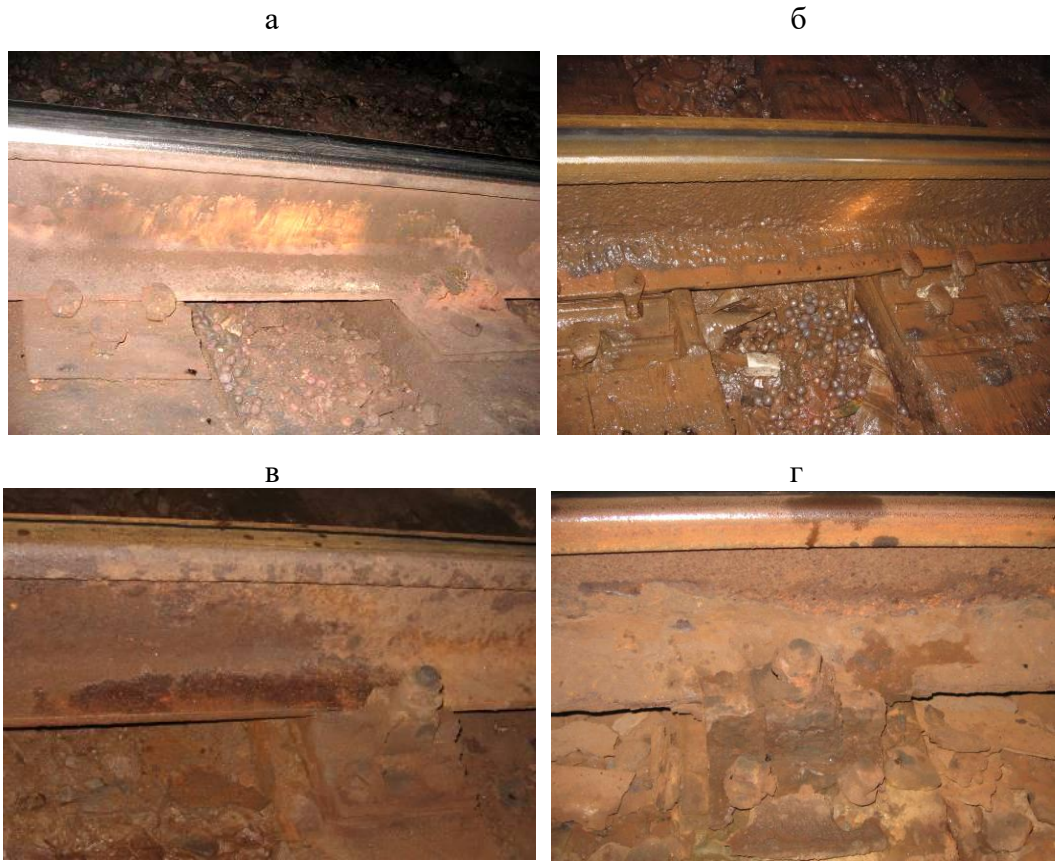


Рис. 8. Корозійні пошкодження рейки та елементів скріплень Д0 (а, б) і Д2 (в, г) тунелів у місцях зволоження баласту (а, в) і безпосереднього капежу на рейки (б, г)

Ступінь корозійного пошкодження визначали, періодично оглядаючи основний і контрольний зразки з інструментальним вимірюванням площі та глибини корозійного пошкодження підошви рейки та підкладки. Вигляд зразків після експозиції 1850 год наведено на рис. 10. Як бачимо, у результаті електричного впливу спостерігають більші корозійні пошкодження підошви підкладок (рис. 10, б), ніж без електричного впливу (рис. 10, а).

У результаті експериментальних досліджень встановлено, що інтенсивність електрокорозії сталі прямо пропорційно залежить від величини потенціалу, а інтенсивність електрокорозії в разі стікання струму крізь деревину вища, ніж у разі стікання струму через бетон, отже, інтенсивність електрокорозії елементів ВБК на дерев'яних шпалах за інших рівних умов вища, ніж на залізобетонних шпалах. У результаті експериментальних досліджень також підтверджено запропонований механізм електрокорозії підошви рейок в умовах обводнення внаслідок впливу пульсуючого однонаправленого електричного потенціалу, який наведений на рейку ЕРС.

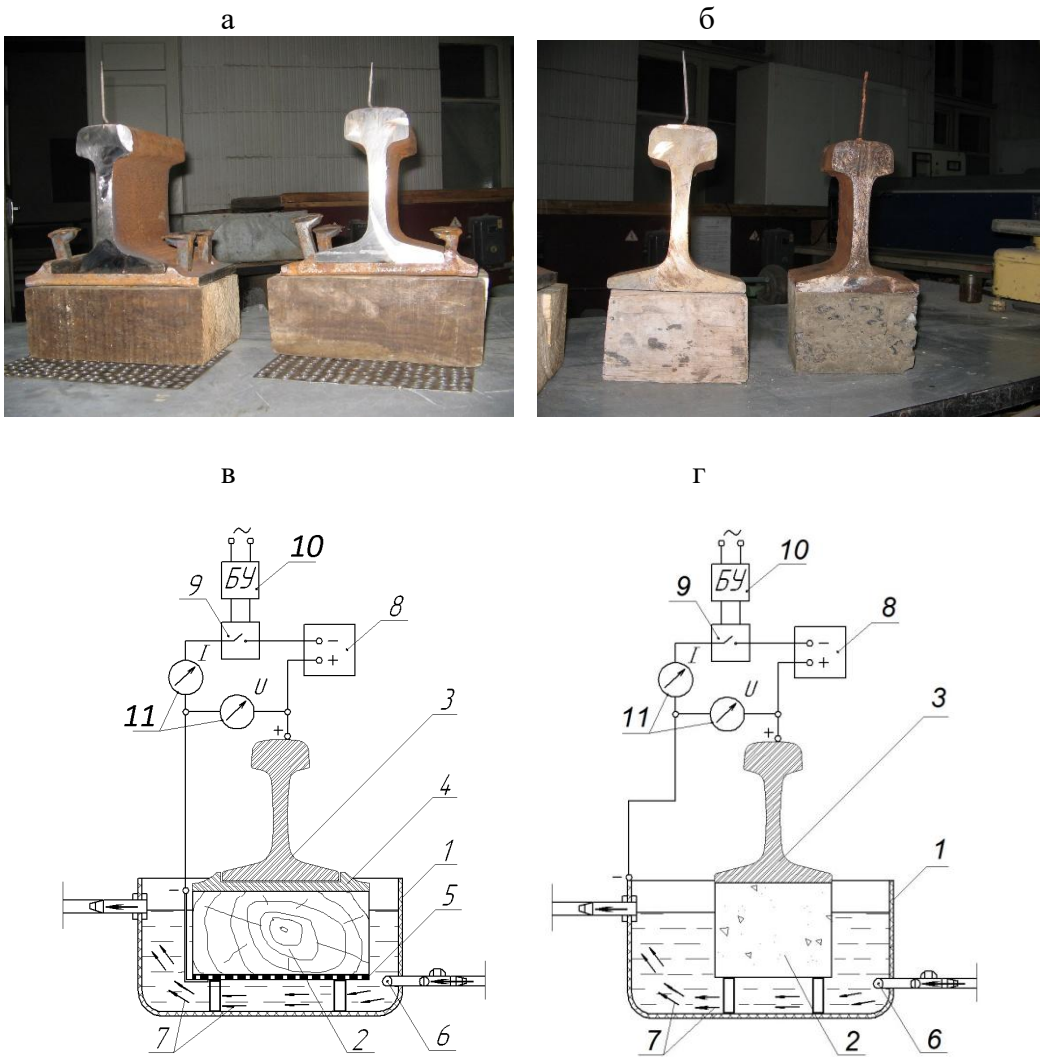


Рис. 9. Зразки та лабораторні установки для дослідження впливу пульсуючого однонаправленого струму і протікання води на рейки, встановлені:
а, в – на дерев'яну шпалу з підкладкою; б, г – на бетон або деревину без підкладки;
1 – поліетиленова (г – металева) комірка; 2 – фрагмент дерев'яної шпали (г – зразок деревини або бетону); 3 – рейка Р65; 4 – підрейкова підкладка;
5 –перфорований електрод; 6 – трубка подавання води; 7 – потік води;
8 – джерело живлення; 9 – реле; 10 – програмований блок управління;
11 – вимірювальні прилади (Sanwa PC510)

Розроблення пропозицій із корегування нормативних термінів експлуатації конструкцій та елементів верхньої будови колії в залізничних тунелях

За результатами проведеного аналізу встановлено чинники небезпеки корозії та електрокорозії елементів верхньої будови колії в залізничних тунелях: обводненість верхньої будови колії і тунелю в цілому; наявність і величина позитивного електричного потенціалу на рейках електрифікованих постійним струмом ділянках залізниць; розташування тунелю в умовах морського клімату ближче 1,5 км від моря; висока інтенсивність руху поїздів;

несправність рейкових скріплень (втрата властивостей прокладками тощо); агресивність підземних і ґрунтових вод, що потрапляють у тунель і на верхню будову колії; пошкодження шпал (гниль дерев'яних, корозія і тріщини залізобетонних); забрудненість баласту; агресивні вантажі, що просипаються; агресивні вихлопні гази тепловозів (на неелектрифікованих ділянках); значна довжина тунелів – понад 500 м у поєднанні з несправною або неефективною вентиляцією. Перші два чинники є найвпливовішими.

Рис. 10. Зразки, що експонували 1850 год без електричного впливу (тільки у воді) (а) і під електричним впливом (б, в, г): а, б – скріплення Д0, нижня грань підкладки (рис. 9, а); в, г – рейка на деревині (рис. 9, б); а – без електричного впливу (тільки у воді); б – під електричним впливом, рейка на деревині; в, г – рейка на бетоні; а, в – вигляд збоку; б – підошва рейки; г – нижня грань бетону

Виконано системний аналіз великого масиву інформації [16], у складі якого для кожного із дев'яти обстежених тунелів зіставлено дані про їхні довжину, обводненість (табл. 2), величину потенціалу на рейці (рис. 7), фактичні терміни заміни елементів ВБК згідно з експлуатаційною документацією, за результатами якого розроблено пропозиції з корегування нормативних термінів експлуатації конструкцій та елементів верхньої будови колії в залізничних тунелях.

Таблиця 2

Стан тунелів за обводненістю

Стан тунелю за обводненістю	Відсоток поверхні оправи та колії (площі або кількості кілець), що знаходиться у стані		
	сухому	вологому, з окремими капежами	мокрому, з інтенсивним капежем і течіями
сухий	понад 75	до 25	0
обводнений	будь-який	понад 25	до 50
дуже обводнений		будь-який	понад 50

Для забезпечення надійності та безпеки експлуатації колії в тунелях для елементів верхньої будови колії в них запропоновано призначати норми періодичності ремонтно-колійних робіт [1] і заміни матеріалів [3] з урахуванням поправок, наведених у табл. 3, залежно від довжини та обводненості тунелю, наявності і максимальної величини позитивного електричного потенціалу.

Таблиця 3

Зменшення норм періодичності ремонтно-колійних робіт [1] і збільшення норм витрат матеріалів на поточне утримання, комплексно-оздоровчий і середній ремонт колії [3] для тунелів

	Довжина тунелю, м	Величина зменшення / збільшення норм[1, 2], %, для тунелів: неелектрифікованих та електрифікованих змінним струмом / електрифікованих постійним струмом		
		сухих	обводнених	дуже обводнених
Зменшення норм періодичності ремонтно-колійних робіт	до 100	0/0	0/1	1/2
	понад 100 до 200	0/0	1/3	2/4
	понад 200 до 500	0/1	4/10	6/12
	понад 500 до 1000	1/2	7/16	10/22
	понад 1000 до 2000	3/3	18/22	25/28
	понад 2000	4/4	22/24	30/30
Збільшення норм витрат матеріалів	до 100	0/0	1/2	2/3
	понад 100 до 200	0/1	3/6	4/9
	понад 200 до 500	1/3	9/19	12/25
	понад 500 до 1000	2/5	14/33	20/43
	понад 1000 до 2000	6/7	36/44	50/57
	понад 2000	7/8	43/47	60/61

Примітки: [1] Залежно від максимального значення електричного потенціалу на рейці величину зменшення/збільшення норм потрібно множити на поправку: у разі максимального значення потенціалу до 0 В – 1; понад 0 до 10 В – 1,05; понад 10 до 50 В – 1,2; понад 50 В – 1,4.
[2] У разі збіжності декількох знижувальних чинників сумарне зменшення не має перевищувати 50/100 %.

Пропозиції повністю враховані в нещодавно чинному замість [3] стандарті [4].

Розроблено заходи із захисту конструкцій та елементів верхньої будови колії в залізничних тунелях. Як першочергові потрібно вживати всіх заходів з осушення гірського масиву та/або гідроізоляції тунелів, а також обмеження струмів витоку, без яких ефективність всіх інших у вигляді захисних покриттів, способів активного захисту тощо буде набагато меншою.

Висновки. У результаті теоретичних досліджень встановлено, що корозія підошви рейок відбувається на електрифікованих ділянках залізниць в умовах обводненості через стікання струмів із них, і, отже, є електрокорозією. Розроблено механізм електрокорозії підошви рейок, за яким під впливом наведеного на рейку під час проходження електрорухомого складу позитивного пульсуючого однонаправленого електричного потенціалу відбувається її вертикальна поляризація, яка змінює електроповерхневий потенціал зерен перліту сталі на кшталт зміни абсолютного електроповерхневого потенціалу до рівноважного під впливом *pH*. Обґрунтовано залежності величини електроповерхневого потенціалу перліту, еквівалентної величини *pH* і швидкості корозії, мм/р., від величини потенціалу на рейці. Потенціал на рейці 100 В еквівалентний впливу середовища з *pH* = 2,6, якому відповідає швидкість корозії сталі 0,91 мм/р. У результаті натурних та експериментальних досліджень підтверджено запропонований механізм електрокорозії підошви рейок в умовах обводнення, а також залежність інтенсивності корозії елементів ВБК від обводненості тунелів, наявності електрифікації постійним струмом і величини потенціалу на рейці, довжини тунелів. Для призначення періодичності ремонтно-колійних робіт у тунелях і витрат матеріалів ВБК для заміни запропоновано поправки, залежні від довжини і ступеня обводненості тунелю, наявності і максимальної величини позитивного електричного потенціалу, довжини тунелю.

Список використаних джерел

1. ДСТУ 9002:2020. Споруди транспорту. Класифікація, періодичність призначення та проведення планово-запобіжних ремонтів залізничних колій. Київ, 2020. 30 с.

2. ДБН В.2.3-19:2019. Споруди транспорту. Залізниці колії 1520 мм. Норми проектування. Чинні з 29.03.2019 р. URL: https://dbn.co.ua/load/normativy/dbn/1-1-0-126 .

3. ЦП 0123. Середні норми витрат матеріалів і виробів на поточне утримання та ремонт колії й інших пристроїв колійного господарства залізниць України. Київ: Укрзалізниця, 2005. 43 с.

4. СТП 06-009:2021. Колійне господарство. Норми витрат матеріалів і виробів на поточне утримання, реконструкцію, технічне переоснащення та ремонти. Київ: Укрзалізниця, 2021. 57 с.

5. ЦП 0150. Технічні вказівки з використання старопридатних матеріалів верхньої будови колії на залізницях України. Київ: Укрзалізниця, 2006. 56 с.

6. ВНД УЗ 32.2.03.018-2013. ЦП Класифікація і каталог дефектів і пошкоджень рейок на залізницях України (ЦП 0285).

7. Stark J. Alkali-Kieelsäure-Reaktion. Finger-Institutes für Baustoffkunde. Weimar (2008).

8. Пшінько П. О. Підвищення надійності залізничних залізобетонних шпал: автореф. дис… канд. техн. наук: 05.23.2001. Дніпропетровськ: ПДАБА, 2012. 20 с.

9. Бульба Т. Г. О корозії підошви рейок *Колія та колійне господарство*. 1967. 3. 12.

10. Котельников А. В. Блукаючі струми електрифікованого транспорту. Транспорт, 1986. 279 с.

11. Uhlig's Corrosion Handbook. 3rd ed. R. Winston Revie (ed). Wiley (2011). http://doi.org/10.1002/9780470872864.

12. Технічна характеристика інженерних споруд залізниць України. Київ: Укрзалізниця, 2014.

13. Tunnel Engineering Handbook. 2nd ed. J. O.Bickel, T. R.Kuesel, E. H.King (Eds) Springer. 1996.

14. Zacharie Grossen. Gotthard Base Tunnel at Sedrun multifunction station (east tube), looking north. The vertical distance to the ground is about 1100 metres from this point.CC BY-SA 4.0. https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=53217042.

15. Аналіз впливу агресивних дій на конструкції та споруди залізниць: верхня будова колії в залізничних тунелях / А. А. Плугін, А. М. Плугін, Д. А. Плугін та ін. *Збірник наукових праць Української державної академії залізничного транспорту.* Харків: УкрДАЗТ, 2011. Вип. 122. С. 187–201.

16. Проведення досліджень корозії елементів верхньої будови колії в залізничних тунелях, визначення їх термінів експлуатації та розробка заходів щодо їх захисту від корозії: звіт про НДР / УкрДАЗТ. Етап 1 (2010) 108 с.; Етап 2 (2010) 204 с.; Етап 3 (2011) 101 с. № 60/3-2010.

17. Основи теорії твердіння, міцності, руйнування та довговічності портландцементу, бетону та конструкцій із них. Т. 1. Колоїдна хімія та фізико-хімічна механіка цементних бетонів /за ред. А. М. Плугіна. Київ: Наукова думка, 2011. 331 с.

18. Плугін А. М., Плугін А. А., Горбачова Ю. М., Афанасьєв О. В. Електроповерхневий потенціал простих речовин – основа моделювання міцнісних і корозійних властивостей сталевих і залізобетонних конструкцій. *Науковий вісник Луганського національного аграрного університету.* 2010. 14. 19–41.

Плугін Олексій Андрійович, кандидат технічних наук, доцент кафедри будівельних матеріалів, конструкцій та споруд, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0002-4627-1039.
Тел.: +38 (095) 862-48-89. E-mail: plugin0785@gmail.com.
Плугін Андрій Аркадійович, доктор технічних наук, завідувач кафедри залізничної колії і транспортних споруд, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0002-6941-2076.
Тел.: +38 (050) 533-68-85. E-mail: aaplugin@gmail.com.
Геворкян Едвін Спартакович, доктор технічних наук, професор кафедри інженерії вагонів і якості продукції, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0003-0521-3577.
Тел.: +38 (050) 596-32-16. E-mail: edsgev@gmail.com.
Муригін Максим Андрійович, аспірант кафедри залізничної колії і транспортних споруд, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0009-0004-0532-4765. Тел.: +38 (099) 096-62-01.
E-mail: maks.murygin.1999@gmail.com.

Oleksii Pluhin, PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Building Materials, Structures, and Facilities, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0002-4627-1039.
Tel.: +38 (095) 862-48-89. E-mail: plugin0785@gmail.com.
Andrii Plugin, Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Railway Track and Transport Structures, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0002-6941-2076. Tel.: +38 (050) 533-68-85.
E-mail: aaplugin@gmail.com.
Edvin Gevorkyan, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Car Engineering and Product Quality, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0003-0521-3577. Tel.: +38 (050) 596-32-16.
E-mail: edsgev@gmail.com.
Maksym Murygin, Postgraduate Student of the Department of Railway Track and Transport Structures, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0009-0004-0532-4765. Tel.: +38 (099) 096-62-01.
E-mail: maks.murygin.1999@gmail.com.

Статтю прийнято 30.06.2025 р.

УДК 528:332.3

ОРГАНІЗАЦІЙНО-ПРОСТОРОВИЙ МЕХАНІЗМ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТЕРИТОРІАЛЬНОГО РОЗВИТКУ ВИКОРИСТАННЯ ЗЕМЕЛЬ РЕГІОНІВ

Д-р екон. наук К. А. Мамонов, д-р. техн. наук К. О. Метешкін,
канд. техн. наук Е. С. Штерндок, д-р філософії Р. С. В'яткін

ORGANIZATIONAL-SPITAL MECHANISM FOR ENSURING TERRITORIAL DEVELOPMENT OF LAND USE IN REGIONS

Dr. Sc. (Econ.) K. Mamonov, Dr. Sc. (Tech.) K. Meteshkin,
PhD (Tech.) E. Shterndok, PhD (Tech.) R. Viatkin

DOI: https://doi.org/10.18664/1994-7852.212.2025.336521

Анотація. *Доведено, що формування сучасної системи управління земельно-майновим комплексом потребує розроблення та реалізації напрямів використання земель на регіональному рівні, базованих на парадигмі сталого розвитку територій. Підвищення ефективності землекористування залежить від інструментарію та механізмів організації розвитку територій. На жаль, за останні роки відбувається гальмування розвитку земель на регіональному рівні, що обумовлено впливом комплексу чинників: порушення регіональних зв'язків, наслідки агресії РФ, зниження ефективності використання земель і взаємодії стейкхолдерів, зниження можливостей їх використання, руйнування земельно-майнового комплексу, зниження інвестиційної привабливості земель, особливо у прифронтових регіонах.*

Ключові слова: *територіальний розвиток, використання земель регіонів, організація розвитку територій, оцінка, організаційно-просторовий механізм, стейкхолдери, геоінформаційні системи.*

Abstract. *It has been proven that the formation of a modern land and property complex management system requires the development and implementation of land use directions at the regional level, which are based on the paradigm of sustainable development of territories. Increasing the efficiency of land use depends on the tools and mechanisms for organizing the development of territories. Unfortunately, in recent years, land development at the regional level has been slowing down, which is due to the influence of a complex of factors: disruption of regional ties, the consequences of the aggression of the Russian Federation, a decrease in the efficiency of land use and stakeholder interaction, a decrease in the possibilities of their use, the destruction of the land and property complex, a decrease in the investment attractiveness of lands, especially in front-line regions.*

It is proposed to define the development of territories as a qualitatively new state, which is ensured by the permanent growth of functional, spatial, urban planning, environmental, investment and innovation, stakeholder, and security factors to increase the socio-economic level and well-being of the population of the regions. To ensure the development of territories, an organizational and spatial mechanism for ensuring the territorial development of land use in regions is used, which is determined by a set of organizational and spatial components, the interaction of which is carried out

on the basis of the typological structure of territorial development factors and the formed quantitative basis for the development of development scenarios.

Organizational support for the development of territories is formed on the basis of stakeholder relations, interaction between organizational structures. In the system for forming organizational support for modeling the processes of territorial development of land use, geoinformation systems are used.

As a result of the study, a mediocre level of ensuring the territorial development of land use in most regions was established. At an insignificant level, territorial development processes are determined in front-line regions or in regions with significant aggressive influence: Zaporizhia, Mykolaiv, Odessa, Sumy, Kharkiv, Kherson, Chernihiv. A low level of territorial development of land use was characterized by regions where hostilities are underway and most of the territories are occupied: Donetsk and Luhansk.

Keywords: *territorial development, regional land use, organization of territorial development, assessment, organizational and spatial mechanism, stakeholders, geographic information systems.*

Вступ. Формування сучасної системи управління земельно-майновим комплексом потребує розроблення та реалізації напрямів використання земель на регіональному рівні, базованих на парадигмі сталого розвитку територій. Підвищення ефективності землекористування залежить від інструментарію та механізмів організації розвитку територій. На жаль, за останні роки відбувається гальмування розвитку земель на регіональному рівні, що обумовлено впливом комплексу чинників: порушення регіональних зв'язків, наслідки агресії РФ, зниження ефективності використання земель та взаємодії стейкхолдерів, зниження можливостей їх використання, руйнування земельно-майнового комплексу, зниження інвестиційної привабливості земель, особливо у прифронтових регіонах.

Для сформованого нормативно-правового забезпечення характерне врахування лише окремих елементів територіального розвитку використання земель: Закони України «Про державний земельний кадастр», «Про державний контроль за використанням та охороною земель», «Про землеустрій», «Про інвестиційну діяльність», «Про охорону навколишнього природного середовища», «Про оцінку земель», «Про регулювання містобудівної діяльності», «Про стимулювання розвитку регіонів», Наказ Міністерства регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства «Про затвердження Порядку надання містобудівних умов і обмежень забудови земельної ділянки, їх склад і зміст», Постанова Кабінету Міністрів України «Про містобудівний кадастр». Разом із цим актуальним питанням є розроблення і впровадження законодавчого забезпечення, що регулюють відносини у сфері територіального розвитку використання земель регіонів, ураховуючи вплив просторових, містобудівних, інвестиційних, екологічних, стейкхолдерних, інноваційних чинників.

У цьому процесі особливе значення має розроблення та застосування геоінформаційних систем для забезпечення територіального розвитку використання земель регіонів. При цьому сформовано нормативно-правове забезпечення, що впливає на цей процес: Закон України «Про національну інфраструктуру геопросторових даних», Постанова Кабінету Міністрів України «Про затвердження Порядку функціонування національної інфраструктури геопросторових даних», Наказ Міністерства аграрної політики та продовольства України «Про затвердження технічних вимог до геопросторових даних, метаданих і геоінформаційних сервісів національної інфраструктури геопросторових даних».

На недостатньому рівні розроблено та застосовувано організаційно-просторовий механізм забезпечення територіального розвитку використання земель регіонів. Отже, тема дослідження є актуальною і дає змогу вирішити важливе науково-практичне завдання організації розвитку територій, ураховуючи ефективність використання земель.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Обґрунтовуючи теоретичні положення про визначення розвитку територій, особливу увагу слід приділити напрямам та особливостям його формування на різних рівнях регіонального управління [1, 2].

Розвиток територій визначено як складну системну категорію, обумовлену необхідністю врахування сукупності функційних, просторових, містобудівних, екологічних, інвестиційно-інноваційних, стейкхолдерних чинників. У цьому контексті слід відзначити роботи [3–8].

Разом із цим потрібне подальше удосконалення теоретичного обґрунтування щодо визначення розвитку територій.

У сучасних наукових дослідженнях відсутні єдині підходи для визначення організаційно-просторового механізму забезпечення територіального розвитку використання земель регіонів. Зокрема, як системну категорію, що має специфічну соціально-економічну конструкцію, яка характеризує встановлення і застосування в певних інституційних контекстах і межах відповідних територій, часі і просторі певних методів використання земель та інших природних ресурсів, а також громадського порядку і співробітництва, спрямованих на планування та управління колективними діями з розвитку землекористування і територій, розглядають у роботі [9].

На структурних компонентах організаційно-просторового механізму, формуваннях кількісних параметрів і математичного моделювання сфокусовано увагу в роботі [10].

Організаційні аспекти рівня екологічного забезпечення землекористувань визначені в роботах [11–14].

Отже, у результаті дослідження систематизовано теоретичні положення щодо визначення розвитку територій та організаційно-просторового механізму забезпечення територіального розвитку використання земель регіонів, що дало змогу сформувати теоретико-методичну платформу і створити умови для обґрунтування організаційного забезпечення.

Визначення мети та завдання дослідження. Метою дослідження є розроблення організаційно-просторового механізму забезпечення територіального розвитку використання земель регіонів. Для досягнення поставленої мети слід вирішити такі завдання:

– обґрунтувати теоретичні положення щодо визначення розвитку територій;

– визначити організаційно-просторовий механізм забезпечення територіального розвитку використання земель регіонів;

– охарактеризувати організаційне забезпечення територіального розвитку;

– визначити напрями розроблення організаційно-просторового механізму забезпечення територіального розвитку використання земель регіонів.

Основна частина дослідження. Організаційне забезпечення територіального розвитку використання земель складається із відповідних компонентів:

– забезпечення стейкхолдерних відносин у системі територіального розвитку використання земель;

– рівень взаємодії між організаційними структурами, що здійснюють діяльність для забезпечення землекористування;

– формування кількісної основи для ухвалення обґрунтованих рішень;

– розроблення шкали рівня ефективності використання земель у системі територіального розвитку на регіональному рівні.

Характеризуючи організаційне забезпечення територіального розвитку використання земель, слід зазначити, що забезпечення стейкхолдерних відносин здійснюється відповідно до видів зацікавлених осіб і типів відносин: партнерські, перехідні, агресивні [15].

Формування кількісної основи для ухвалення обґрунтованих рішень здійснюється на основі розробленого інтегрального методу оцінювання рівня забезпечення територіального розвитку використання земель регіонів:

– розроблення інформаційно-аналітичного забезпечення територіального розвитку використання земель регіонів;

– виокремлення чинників, що впливають на територіальний розвиток: функційні, просторові, містобудівні, екологічні, інвестиційно-інноваційні, стейкхолдерні, безпекові;

– оцінювання локальних чинників із застосуванням експертних методів;

– побудова моделей оцінювання системних чинників з оцінювання рівня забезпечення територіального розвитку використання земель регіонів;

– оцінювання системних чинників;

– побудова моделі оцінювання інтегральних чинників рівня забезпечення територіального розвитку;

– визначення вагових коефіцієнтів із використанням методу аналізу ієрархій;

– оцінювання інтегрального показника рівня забезпечення територіального розвитку використання земель регіонів;

– інтерпретація отриманих результатів.

Слід зазначити, що узагальнення результатів оцінювання локальних чинників із застосуванням експертних методів здійснюється на основі моделі середньої арифметичної:

$$D_{T_{ij}} = \frac{D_{T_{ijn}}}{\sum_{i=1}^{n} D_{T_{ijn}}}, \quad (1)$$

де $D_{T_{ij}}$ – узагальнені локальні чинники рівня забезпечення територіального розвитку використання земель регіонів, відн. од.;

$D_{T_{ijn}}$ – локальні функційні, просторові, містобудівні, екологічні, інвестиційно-інноваційні, стейкхолдерні, безпекові, бали;

n – кількість чинників, од.;

і – рівень чинника територіального розвитку;

j – порядковий номер локального чинника.

Модель оцінювання системних чинників з оцінювання рівня забезпечення територіального розвитку використання земель регіонів така:

$$D_{T_i} = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^{n} D_{T_{ij}}}, \quad (2)$$

де D_{T_i} – системні функційні, просторові, містобудівні, екологічні, інвестиційно-інноваційні, стейкхолдерні, безпекові чинники оцінювання рівня забезпечення територіального розвитку використання земель регіонів, відн. од.

Результати оцінювання системних чинників подано у табл. 1.

Застосовуючи метод аналізу ієрархій, запропоновано модель оцінювання вагових коефіцієнтів:

$$k_i = \frac{K_i}{\sum_{i=0}^{n} K_i}, \quad (3)$$

де k_i – вагові коефіцієнти взаємного впливу та впливу функційних, просторових, містобудівних, екологічних інвестиційно-інноваційних, стейкхолдерних, безпекових чинників на узагальнюючий критерій рівня забезпечення територіального розвитку використання земель регіонів, відн. од.;

K_i – власний вектор для системних показників, відн. од.

Результати оцінювання вагових коефіцієнтів подано на рис. 1.

Таблиця 1

Результати оцінювання системних чинників рівня забезпечення територіального розвитку використання земель регіонів, відн. од.

Регіон	D_{T_1}	D_{T_2}	D_{T_3}	D_{T_4}	D_{T_5}	D_{T_6}	D_{T_7}
Вінницький	4,223	4,889	4,130	4,140	2,112	4,631	4,998
Волинський	4,010	4,772	4,014	4,018	2,112	4,016	4,017
Дніпропетровський	4,165	4,908	4,224	4,334	2,789	4,932	3,995
Донецький	0,211	0,544	0,224	0,203	0,014	0,378	0,180
Житомирський	4,012	4,450	4,332	4,445	2,001	4,329	4,221
Закарпатський	4,533	4,776	4,417	4,221	2,658	4,752	5,889
Запорізький	2,221	3,776	3,221	4,309	1,773	3,546	2,112
Івано-Франківський	4,287	4,705	4,413	4,401	2,577	4,744	4,013
Київський	4,769	5,221	5,018	5,008	3,996	5,422	4,223
Кіровоградський	4,109	4,843	4,308	4,447	2,554	4,329	4,018
Луганський	0,012	0,010	0,013	0,009	0,002	0,076	0,001
Львівський	4,708	5,119	5,012	5,001	3,885	5,234	4,018
Миколаївський	2,985	4,010	3,671	3,708	2,001	3,622	3,557
Одеський	3,016	4,224	4,018	3,889	2,658	3,927	3,998
Полтавський	4,120	4,774	4,234	4,221	2,554	4,875	4,002
Рівненський	4,001	4,798	4,217	4,112	2,408	4,604	4,334
Сумський	3,632	4,012	3,672	3,209	1,665	3,717	3,012
Тернопільський	4,224	4,724	4,227	4,449	2,402	4,877	4,338
Харківський	3,017	4,012	3,018	3,221	2,001	3,814	2,991
Херсонський	2,623	3,998	2,212	2,228	1,557	3,182	1,998
Хмельницький	4,119	4,668	4,228	4,225	2,553	4,746	4,001
Черкаський	4,002	4,663	4,001	4,113	2,442	4,465	4,337
Чернівецький	4,118	4,553	4,014	4,111	2,504	4,584	4,776
Чернігівський	3,228	4,014	3,896	4,001	2,014	4,434	4,008

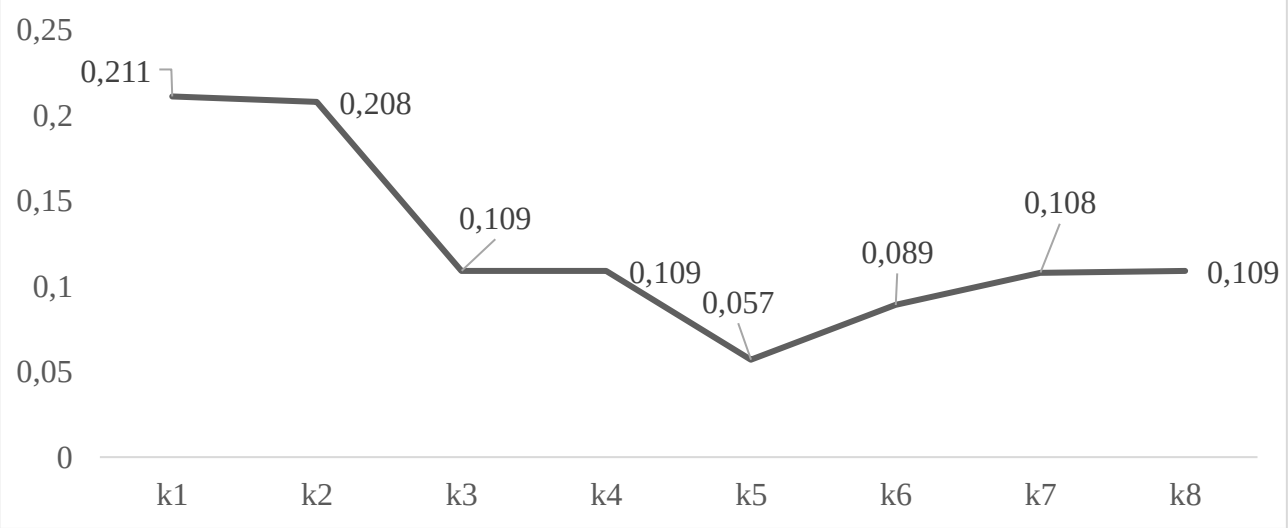


Рис. 1. Результати оцінювання вагових коефіцієнтів, відн. од.

Розроблено модель оцінювання інтегрального показника рівня забезпечення територіального розвитку використання земель регіонів:

$$I_{D_T} = \sum_{i=1}^{n} D_{T_i} k_i, \quad (4)$$

де I_{D_T} – інтегральний показник рівня забезпечення територіального розвитку використання земель регіонів, відн. од.

Результати оцінювання інтегрального показника подано на рис. 2.

Розроблено шкалу рівня ефективності використання земель у системі територіального розвитку регіонів (табл. 2).

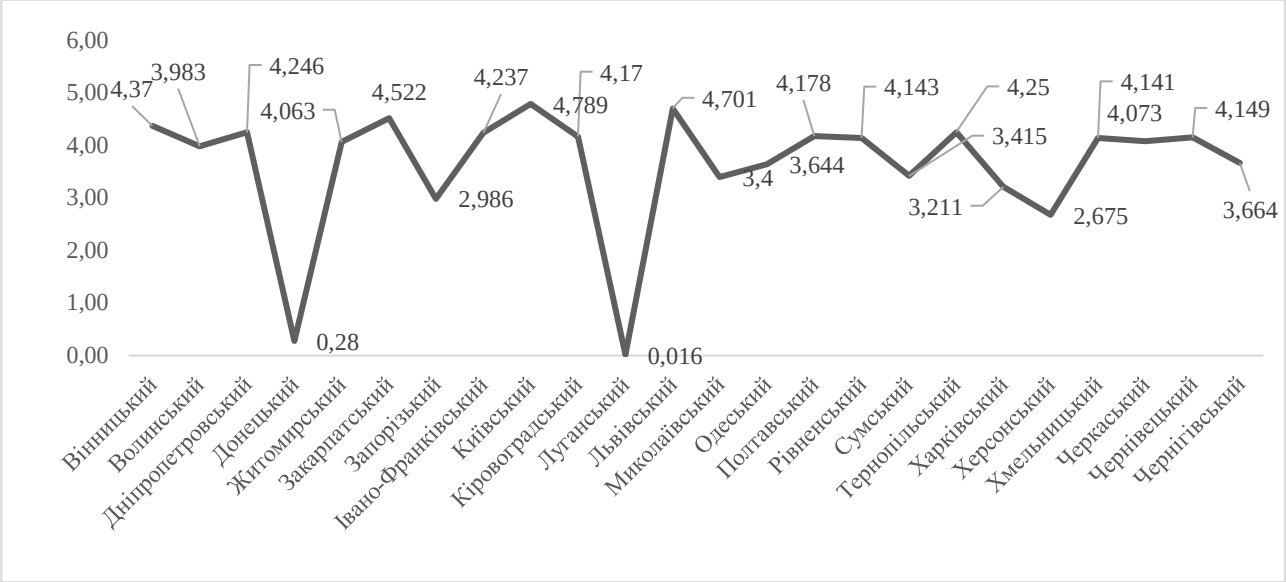


Рис. 2. Результати оцінювання інтегрального показника рівня забезпечення територіального розвитку використання земель регіонів, відн. од.

Таблиця 2

Шкала рівня ефективності використання земель у системі територіального розвитку регіонів, відн. од.

Значення рівня ефективності використання земель	Рівень територіального розвитку
0	відсутній
0,01 – 2	низький
2,01 – 4	несуттєвий
4,01 – 6	посередній
6,01 – 8	суттєвий
8,01 – 9,99	високий
10 і більше	абсолютний

Запропоновано напрями розроблення організаційно-просторового механізму забезпечення територіального розвитку використання земель регіонів:

– формування інформаційно-аналітичного забезпечення територіального розвитку на основі сформованого кількісного підґрунтя;

– побудова організаційної складової механізму з урахуванням рівня взаємодії стейкхолдерів і формування відносин, ефективності регіональних структур, що забезпечують територіальний розвиток;

– визначення просторової складової та її впливу на територіальний розвиток використання земель регіонів;

– застосування сформованої кількісної основи територіального розвитку використання земель;

– ухвалення рішень відповідно до шкали рівня ефективності використання земель у системі територіального розвитку регіонів;

– розроблення та застосування сценарію територіального розвитку використання земель.

Висновки. Запропоновано визначення розвитку територій як якісно новий їхній стан, що забезпечено перманентним зростанням функційних, просторових, містобудівних, екологічних інвестиційно-інноваційних, стейкхолдерних, безпекових чинників для збільшення соціально-економічного рівня та добробуту населення регіонів.

Для забезпечення розвитку територій застосовано організаційно-просторовий механізм забезпечення територіального розвитку використання земель регіонів, визначений як сукупність організаційних і просторових складових, взаємодія яких здійснюється на основі типологічної структури чинників територіального розвитку та сформованої кількісної основи для розроблення сценаріїв розвитку.

Організаційне забезпечення розвитку територій формується на основі стейкхолдерних відносин, взаємодії між організаційними структурами. У системі формування організаційного забезпечення для моделювання процесів територіального розвитку використання земель застосовано геоінформ. У результаті дослідження встановлено посередній рівень забезпечення територіального розвитку використання земель у більшості регіонів. На несуттєвому рівні визначено процеси територіального розвитку у прифронтових регіонах або областях зі значним агресивним впливом: Запорізькій, Миколаївській, Одеській, Сумській, Харківській, Херсонській, Чернігівській. Низький рівень територіального розвитку використання земель характерний для регіонів, де ведуться бойові дії та більшість територій окуповані: Донецькій і Луганській.

Список використаних джерел

1. Територіальний розвиток та регіональна політика в Україні / НАН України. ДУ «Інститут регіональних досліджень імені М. І. Долішнього НАН України»; наук. ред. В. С. Кравців. Львів, 2015. 246 с. URL: https://ird.gov.ua/irdp/p20160101.pdf.

2. Єрошкіна О. О. Територіальні природно-економічні відмінності як об’єктивна основа територіального розподілу праці і регіонального розвитку. *Державне будівництво*. 2009. № 2. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/DeBu_2009_2_26.

3. Мамонов К. А., Метешкін К. О., Штерндок Е. С., Ковальчук В. С. Моделювання і дослідження складних кадастрових систем нерухомості для забезпечення територіального розвитку. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*. 2024. Вип. 116. Частина 2. С. 135–143. URL: http://publications.ntu.edu.ua/avtodorogi_i_stroitelstvo/116.2/135.pdf.

4. Мамонов К. А., Метешкін К. О., Гой В. В., В’яткін Р. С. Математичне моделювання чинників, що впливають на функціонування складних систем територіального розвитку використання земель регіонів. *Комунальне господарство міст. Серія: Інженерні науки і*

архітектура. 2024. Том 6. Вип. 187. С. 180–184. URL: https://khg.kname.edu.ua/index.php/khg/article/view/6404/6325.

5. Мамонов К. А., Ковальчук В. С., Гой В. В., Мамонов В. К. Містобудівні чинники територіального розвитку використання земель регіонів. *Науковий вісник будівництва*. 2024. Випуск № 111. С. 154–159. URL: https://svc.kname.edu.ua/index.php/svc/article/view/1804/1769.

6. Мамонов К. А., Паламар А. Ю., Вяткін Р. С., Гой В. В. Просторове забезпечення використання нерухомості регіонів для розробки геоінформаційних моніторингових карт. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*. 2024. Вип. 115. Частина 2. С. 199–206. URL: http://publications.ntu.edu.ua/avtodorogi_i_stroitelstvo/115.2/199.pdf.

7. Просторовий розвиток регіону: соціально-економічні можливості, ризики і перспективи: монографія / за ред. д.е.н., проф. Л. Т. Шевчука. Львів, 2011. 256 с.

8. Грек М. О. Визначення стейкхолдерів у системі земельних відносин міст. *Комунальне господарство міст. Серія: Землекористування, оцінка землі та нерухомості*. 2017. Вип. 135. С. 171–174. URL: https://khg.kname.edu.ua/index.php/khg/article/view/5045/4996

9. Третяк А. М., Третяк В. М., Прядка Т. М., Третяк Н. А. Територіально-просторове планування землекористування: навч. посіб. / за заг. ред. А. М. Третяка. Біла Церква: «ТОВ «Білоцерківдрук», 2022. С. 11. URL: https://rep.btsau.edu.ua/bitstream/BNAU/7530/1/Територіально-просторове%20планування%20землекористування.pdf.

10. Мамонов К. А., Нестеренко С. Г., Кондратюк І. В., Фролов В. О. Сучасний інструментарій забезпечення використання нерухомості на регіональному рівні. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*. 2023. Вип. 114. Част. 2. С. 153–163. URL: http://publications.ntu.edu.ua/avtodorogi_i_stroitelstvo/114.2/153.pdf.

11. Грещук Г. І. Організаційно-економічне та правове забезпечення розвитку землевпорядного механізму сталого сільськогосподарського землекористування: монографія. Київ : ДКС-Центр, 2018. 308 с.

12. Дорош Й. Напрями удосконалення екологічної політики в галузі земельних відносин. *Землевпорядний вісник*. 2012. № 2. С. 28–33.

13. Чудовська В. А. Механізм державного регулювання екобезпечного використання земельних ресурсів. *Збалансоване природокористування*. 2015. № 1. С. 65–69.

14. Dissart J. C., Vollet D. Landscapes and territory-specific economic bases. *Land Use Policy*, 2011. Vol. 28. P. 563–573.

15. Формування партнерських стейкхолдерних відносин на будівельних підприємствах: організаційно-економічні аспекти / К. А. Мамонов, Є. В. Грицьков, В. А. Величко та ін. *Фінансово-кредитна діяльність: проблеми теорії і практики*. 2021. № 2 (37). С. 362–373. URL: https://fkd.net.ua/index.php/fkd/article/view/3255/3207.

Мамонов Костянтин Анатолійович, доктор економічних наук, професор, завідувач кафедри земельного адміністрування та геоінформаційних систем, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова. ORCID iD: 0000-0002-0797-2609. Тел.: +38(099)291-73-54.
E-mail: kostia.mamonov2017@gmail.com.

Метешкін Костянтин Олександрович, доктор технічних наук, професор кафедри земельного адміністрування та геоінформаційних систем, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова. ORCID iD: 0000-0002-1170-2062. E-mail: meteshkin@gmail.com.

Штерндок Ернест Сергійович, кандидат технічних наук, доцент кафедри земельного адміністрування та геоінформаційних систем, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова. ORCID iD: 0000-0003-1107-7401. E-mail: shterndok@ukr.net.

В'яткін Роман Сергійович, доктор філософії, асистент кафедри земельного адміністрування та геоінформаційних систем, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова. ORCID iD: 0000-0001-8807-9988. Тел.: +38(095)003-44-39. E-mail: viatkinr@gmail.com.

Mamonov Kostiantyn, Dr. Sc. (Econ.), Professor, Department of Land Administration and Geographic Information Systems, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. ORCID iD: 0000-0002-0797-2609. Tel.: +38(099)291-73-54. E-mail: kostia.mamonov2017@gmail.com.
Meteshkin Kostiantyn, Dr. Sc. (Techn.), Professor, Department of Land Administration and Geographic Information Systems, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. ORCID iD: 0000-0002-1170-2062. E-mail: meteshkin@gmail.com .
Shterndok Ernest, PhD (Tech.), Docent, Department of Land Administration and Geographic Information Systems, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. ORCID iD: 0000-0003-1107-7401. E-mail: shterndok@ukr.net.
Vyatkin Roman, PhD (Tech.), assistant, Department of Land Administration and Geographic Information Systems, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. ORCID iD: 0000-0001-8807-9988. Tel.: +38(095)003-44-39. E-mail: viatkinr@gmail.com.

Статтю прийнято 26.02.2025 р.

УДК 631.147

ІНВАЙРОМЕНТАЛЬНА ЕКОНОМІЧНА СИСТЕМА – БАЗИС СТАЛОГО ПРОСТОРОВОГО РОЗВИТКУ УКРАЇНИ

**Д-р екон. наук Г. І. Шарий, д-р техн. наук Є. Б. Угненко,
асистентки С. Ю. Шара, Н. І. Сорочук**

ENVIRONMENTAL ECONOMIC SYSTEM – THE BASIS FOR SUSTAINABLE SPATIAL DEVELOPMENT OF UKRAINE

**Dr. Sc. (Econ.) G. Shariy, Dr. Sc. (Tech.) Ye. Ugnenko,
Assistant S. Shara, Assistant N. Sorochuk**

DOI: https://doi.org/10.18664/1994-7852.212.2025.336540

Анотація. *У статті розглянуто і переосмислено значущість економічних учень, наукових шкіл і теорій розвитку інвайроментальної економіки, урахування вченими впливу факторів використання економікою природно-ресурсного потенціалу та внесок економічних теорій для досягнення цілей забезпечення сталого розвитку. Під час досліджень визначено унікальну цінність окремих економічних теорій, наукових шкіл і роль учених, адже народи і країни проживають у різному часовому економічному сьогоденні та несхожих соціально-економічних умовах, коли традиційно-ментальні, геополітичні, релігійні, природно-кліматичні і мілітарні фактори формують локальні інституціональні особливості та закономірності економічного розвитку. Визначено високу значущість економічних стимулів екологічної нейтральності та санкцій, еколого-економічних жорстких регламентів і нормативних платежів, екологічних податків як для господарюючих суб'єктів, окремих громад, так і країн – екологічних агресорів. Запропоновано для найбільш раціонального і сталого розвитку світу сформувати механізми інституційної рівноваги та екологічних компромісів на основі підходів інституціональної інвайроментальної економіки та цілісного розуміння інвайроментальної системи світу в рамках теоретичних напрацювань теорії еколого-економічних рівноваг та інституціонального розвитку.*

Ключові слова: *еколого-економічна теорія, інвайроментальна економіка, економічне сьогодення, інституційний баланс, екологічна рівновага, екологічна нейтральність, вуглецеве землеробство.*

Abstract. *This paper examines and reevaluates the significance of economic doctrines, scientific schools, and theories of environmental economics, considering the impact of economic activities on the natural resource potential and the contribution of economic theories to achieving the goals of sustainable development.*

The current state of geopolitical economic opportunism among most nations and countries of the world not only consumes the planet's natural resources but also depletes its natural resource potential. The search for mechanisms to improve and rectify this situation defines the purpose of this scientific study, which proposes one of the most acceptable and effective economic models for organizing economic systems to ensure sustainable development at the levels of individual countries, regions, and the global community. The research employs methods of systemic analysis, synthesis, synergetic approaches, and their generalization using mathematical statistics and abductive reasoning methods in the context of economic, social, and eco-economic phenomena and events.

The study highlights the unique value of various economic theories, scientific schools, and the role of scholars, given that different nations and countries exist within diverse economic realities and socio-economic conditions. Traditional mentalities, geopolitical factors, religious influences, natural and climatic conditions, and military aspects shape the local institutional characteristics and patterns of economic development. The necessity and rationality of regulatory influence by the state and society on economic systems, particularly in the sphere of natural resource management, have been investigated and confirmed. This regulation aims to prevent the negative manifestations of natural and economic entropy, both at the level of individual entities and across countries, regions, and continents.

The study emphasizes the high importance of economic incentives for environmental neutrality, as well as strict environmental and economic regulations, mandatory payments, and ecological taxes applicable to economic entities, individual communities, and countries that act as environmental aggressors.

To achieve the most rational and sustainable global development, it is proposed to establish mechanisms for institutional balance and environmental compromises based on the approaches of institutional environmental economics and a holistic understanding of the global environmental system. This aligns with the theoretical advancements in eco-economic equilibrium theory and institutional development.

It is scientifically proven that institutional imperatives and strict state regulation not only protect the planet's natural systems but also establish social and environmental justice and economic behavior norms. These serve as essential state and geopolitical guarantees for preserving life on Earth, halting environmental and military aggressions, and preventing eco-economic opportunism by economic entities and individuals.

Keywords: *ecological-economic theory, environmental economics, economic reality, institutional balance, environmental equilibrium, environmental neutrality, carbon farming.*

Вступ. Економічні теорії, учення та наукові школи в різні історичні епохи намагалися описати існуючі суспільні економічні відносини, порядки і визначити найбільш раціональні шляхи перспективного розвитку та ефективної діяльності суб'єктів економічних відносин.

Якщо раніше економічні теорії стосувалися, переважно проблем матеріальних благ і економічних переваг, джерел багатства та благополуччя влади і народів, недопущення та подолання виробничо-економічних криз і негативних соціально-демографічних явищ, то сучасні геополітичні виклики потребують концентрації наукової думки в еколого-економічних та еколого-виробничих сферах, які погіршує антропогенний вплив людства на ноосферу та ігнорування екологічних і загальнолюдських цінностей

із боку країн-агресорів у війнах проти людства, людяності та довкілля.

Учені світу знаходяться в постійному пошуку методик і механізмів впливу на суспільства, виробництво, споживання та ментальність людства для раціонального подолання соціально-економічних загроз і екологічних викликів планетарного масштабу.

Пошук шляхів і механізмів подолання геополітичного економічного опортунізму щодо споживання природних ресурсів планети і зниження природно-ресурсного потенціалу економічними методами формує мету дослідження.

В історичному плані, особливо в економічну теорію, виділено внесок таких учених-мислителів: Гесіода, Ксенофонта, Арістотеля, Евкліда, Томаса Мальтуса, Давида Рікардо, Франсуа Кене [1].

Учені-економісти і сьогодні повинні зайняти особливе місце поряд з екологами та природознавцями, адже тільки регуляторні норми і дієві економічні, фінансові механізми, санкції і стимули можуть сформувати інвайроментальну економічну систему майбутнього як базис сталого життя планетарного масштабу.

Визначення мети, завдання та методів дослідження. Сучасний стан геополітичного економічного опортунізму більшості народів і країн світу не просто споживає природні ресурси планети, а й знижує природно-ресурсний потенціал. Пошук шляхів і механізмів поліпшення і виправлення ситуації формує мету цього наукового дослідження, яке пропонує одну з найбільш прийнятних і дієвих економічних моделей організації економічних систем для сталого розвитку як окремих країн, регіонів, так і світової спільноти.

Завданням дослідження є підтвердження необхідності та раціональності регуляторного впливу держави та суспільства на господарюючу систему, особливо у сфері природокористування, з метою попередження негативних явищ природної та економічної ентропії як для окремих об'єктів, так і окремих країн, регіонів і материків.

Під час досліджень використано методи системного аналізу, синтезу, синергетичних підходів і їх узагальнення за допомогою методів математичної статистики і методів абдукції в контексті розвитку економічних, суспільних і еколого-економічних явищ і подій.

Теоретична частина дослідження. Після наукового дослідництва Гесіода, Ксенофонта, Арістотеля і тисячоліття темних віків, у яких релігійні догми і норми поведінки все ж таки підтримували соціальну, економічну справедливість, рух до загального блага розпочали Ф. Аквінський (1225-1274) та Ібн-Хальдун (1332-1406) із концепцією «Соціальної фізики», де гроші відображували вміст людської праці в товарах [1].

Фома Аквінський розглядав товарно-грошові відносини, але стверджував, що гроші не можуть породжувати гроші, повертаючись до релігійних установ єдності моралі та економічного життя, але, на відміну від релігійних пророків, обґрунтовуючи відсоток позичальників, підкреслював, що приватна власність більше відповідає природі людей, ніж колективна [2].

З давніх часів еволюція економічних знань, теорій і шкіл пройшла складний шлях наукового пошуку, починаючи з ранніх економічних творів Гесіода, який ще у VIII ст. до н. е. вбачав розвиток суспільства тільки в чесній праці, започаткування основ економічного вчення в «домострої» Ксенофонта (430-355 рр. до н. е.), праць борця з приватною власністю і поборника державного регулювання Платона (427-347 рр. до н. е.) і дійсно титана наукового пізнання, логіки і виявлення абстрактних економічних закономірностей, але захисника рабства, Арістотеля (384-322 рр. до н. е.) (табл. 1).

Таблиця 1

Еволюція та розвиток наукового пізнання сфери економіки
від VIII ст. до н. е. до XIX ст.

Давні часи		Передсучасний період (докласичні школи)	
VIII – VII ст. до н. е.	Ранні твори	XVI - XVIII ст.	Меркантилізм
	«Робота і дні»		Економічний націоналізм. Гроші понад усе. Гроші і Саламанкська школа. Торговий баланс
	Гесіод (776 р. до н. е. – VII ст. до н. е.)		Ж. Боден (1530-1596), В. Стаффорд (1554-1612), Т. Ман (1571-1641), Т. Мор 1478-1535), А. Монкретьєн (1575-1621), Ж. Кольбер (1619-1688), В. Петті (1623-1687)
IV ст. до н. е.	Основи наукового пізнання і економічної логіки		
	Фан Л. (517 р. до н. е.), Ксенофонт (430-335 рр. до н. е.), Чапакія (350 р. до н. е.), Арістотель (384-322 рр. до н. е.)	1659 р.	Теорія економічної бази
			Регіональна економіка
			П. Курт (1620-1695)
I-X ст.	Релігійні постулати, заповідні, норми економічної поведінки	XVIII ст.	Фізіократи
	Закони економічної і соціальної справедливості		«Природні ресурси найважливіші»
	Ісус Христос, Пророк Мухаммед, Апостоли, Святі		Франсуа Кене (1694-1774), В. Гурне (1712-1759). Клінічні школи Ж. Тюрго (1727-1781)
XIII ст.	Розвиток учень з економіки	XVIII ст.	Багатство народів
			Адам Сміт (1723-1790)
	Фома Аквінський (1225-1274) Ібн-Халдун (1332-1406) Дунс Скот (1265-1308) Антонін Флорентійський (1389-1459) М. Коперник (1473-1543)	XIX ст.	Теорія Мальтуса
			Томас Мальтус (1766-1834)
		XIX ст.	Теорія земельної ренти
			Давид Рікардо (1772-1823)

Меркантилізм вперше довів необхідність впливу держаного регулювання господарської діяльності, пільгове кредитування і субсидіювання національних економік, високі митні платежі, але на користь торгово-монопольних інститутів, виділяючи гроші як головне багатство держав, діючи виключно для цілей наживи і споживання, коли грошові економічні інтереси переважали інші морально-етичні, соціальні, екологічні та інші інтереси (табл. 1). У прірві економічного опортунізму, на вершинах грошових пірамід меркантилізм так і не знайшов шляхи суспільного і геополітичного та суспільного успіху.

У 1659 р. сформовано оригінальну і раціональну економічну теорію «економічної бази» П. Курта (1620-1695), який виділяв базовий (локальний) сектор, що здатний забезпечити економічне зростання регіонів [2].

Але фізіократи на чолі з Франсуа Кене визначали чистий дохід від землі як основу основ національного багатства, а фермерів як найбільш «продуктивний клас», у той же час визначаючи купців, промисловиків і ремісників «безплідним класом».

У XVII ст. Франсуа Кене, чиї ідеї в майбутньому мали вплив і на К. Маркса, який розвинув теорію комунізму, і на А. Сахарова, який розвінчував марксистську теорію [3], на емпіричному рівні пізнання підійшов і підвів економічну теорію до визначення унікальної значущості природних ресурсів, особливо землі, до сучасних систем ближче, ніж більшість вчених економістів не тільки XIX, а і XX ст. [1].

Теоретичні наукові праці Адама Сміта (1723-1790), Томаса Мальтуса (1766-1834), Давида Рікардо (1772-1823), Дж. Мілля (1806-1873) завершили процес становлення класичної політичної економії, а теоретичні розробки Ж. Бодена, Д. Юма [2] лише підсилили класичну теоретичну базу політекономії, яка підвела економічну теорію до проблем розвитку, людства, народонаселення та перерозподілу доходів від природних ресурсів (ренти) (табл. 1).

Тріада Адама Сміта: земля, праця, капітал, будучи класичним фундаментом економічного базису, слугувала вченому опорою в дослідженнях про природу і джерела добробуту народів, посередництвом дії «невидимої руки ринку у концепції вільного ринку, завдяки якому через власний приватний інтерес, на думку вченого, виграють усі» [2].

Ідеї А. Сміта підсилив Д. Рікардо, але відокремивши особливу значущість землі та інших природних ресурсів у теорії ренти.

Спираючись на класичні економічні вчення, сучасні економічні теорії і школи продовжують пошук економічної істини, часто переплітаючись і запозичуючи ідеї, отримуючи синергетичні результати, поєднуючи економіку з природничими науками, соціальними, екологічними, релігійними та правовими інститутами і геополітикою (табл. 2).

Марксизм Карла Маркса, розвиваючи теорію трудової і доданої вартості, фактично описав теорію капіталу як тогочасну об'єктивну модель економічного опортунізму і розвитку протиріч капіталістичної системи.

Маржиналісти австрійської школи сформували теорію граничної корисності, описуючи економічні процеси і розвиток із позицій теорії вартості.

Неокласицизм багатством економічних шкіл, спираючись на маржиналізм, моделюючи економічну істину, сформував такі економічні школи: математичну, американську, кембриджську та австрійську. Представники шкіл розглядають чисто економічні моделі і визначають «обличчя» економічної науки світу, де переважають суб'єктивізм, статистичні методи аналізу, граничні величини, чисто ринкові теорії, економічно нейтральні до політики і соціальних факторів, виключно з позиції відомої моделі: «попиту-пропозицій». Указані школи об'єднує методичний економічний індивідуалізм, раціоналізм чисто-економічної поведінки економічних агентів в умовах ринкових рівноваг.

Німецький біолог Е. Геккель (1866) дав визначення екології як економіки природи, термін, який і завоював світ [3].

Екопотенціарне збільшення споживання природних ресурсів людством після промислової революції визначено як нормальний шлях прогресу, але починаючи з 1930-х рр. економісти звернули увагу на моделі управління «невідновними» ресурсами (правило Хотеллінга). Тоді у працях учених бачимо перші визначені проблеми у сфері невідновних природних ресурсів.

Таблиця 2

Розвиток сучасних економічних теорій XIX–XXI ст.

Маржиналізм (1860)	Марксизм (1840)	Історична школа (1820)
Австрійська школа К. Менгер, У. Джевонс, Л. Вальрас	К. Маркс	В. Рошер, Ф. Ліст, Р. Джон, Т. Веблен

Неокласицизм (1870)						Інституціоналізм (1900)
Австрійська Ф. Візер, К. Менгер, Ф. Еджворт	Математична Дж. Кейс, В. Паретто, Д. Кларк	Американська Ф. Стокман, Ф. Перу, Ф. Нортгауз	Кембриджська А. Маршалл, А. Пігу, С. Джевонс	Кейнсіанство (1930) Дж. Кейнс	Соціалізм (1920) Ф. Тейлор, О. Ланге, А. Лернер	Р. Веблен, О. Конт, Л. Мітчел, У. Гамільтон, М. Вебер, Д. Коммон

Неолібералізм (1970)	Нова класична теорія (1970)	Неокейнсіанство (1960)	Неконституціоналізм (1970)
Ф. Хайєк, Л. Мізее, В. Ойкен, Л. Ерхард	Р. Лукас, Д. Мут, Е. Прескотт	Дж. Хікс, С. Кузнець, А. Харсен Самуельсон, П. Сраффа	Р .Коуз, Дж. Гелбрейт, Дж. Бюкенет

Монетаризм (1975)	Нова кейнсіанська економіка	Конституційна економіка (1960)
Чиказька школа М. Фрідмен, Т. Беккер, Р. Познер, Ю. Фома	Е. Фелпс, Д. Тейлор, Д. Акерлоф, Х. Діксон	Е. Сото, Д. Ролз, Дж. Кейнс, Б. Леоні, Д. Б'юкенен, Г. Таллок

Теорія базових чинників (2008)	Інформаційна економіка (1980)	Відродження кейнсіанства (1980)	Нова інституціональна економіка (1980)
Л. Гурвич, Е. Мескін, Р. Маєрсон	Дж. Акелар, Дж. Стігліц	Д. Стросс-Кан, О. Бланшар, М. Волф	Д. Неш, Д. Норт, Г. Саймон

Еколого-економічні школи (1990)		Інвайроментальна економіка (1995)
Н. Георгеску-Роген, Г. Дейогі, К. Панар, Е. Остром, Р. Констанца	А. Янсон, М. Ширлі, Е. Шумахер, К. Боулдін, Д. Альтена-Альєр	А. Холпер, Б. Кант, Б. Шолтенс, М. Реймерс

Т. Мальтус (1798) описував катастрофу перенаселення, Д. Мілль визначив необхідність розвитку і приведення до сталого стану економіки, щоб та не перевищувала несучу здатність екосистеми планети, що і переплітається з доповіддю Римського клубу «Межі зростання» (1972), адже ми споживаємо в півтора раза більше природних ресурсів, ніж регенерує планета, а деякі країни в чотири-п'ять разів.

Ці ж тенденції вивчав і порушував ще А. Сміт у роботі «Багатство народів», де вказував, що з часом природні ресурси збіднюють, а розподіл досягне меж ефективності, визначаючи 200 років періоду зростання, а потім перехід до стабільної чисельності людства [2].

Джон Кейнс також зазначав, що жага частини людства до наживи вимагає цілей вище за засоби і віддає перевагу корисному.

Н. Георгеску-Роген у роботі «Закон ентропії і економічний процес» (1971) доводив, що другий закон термодинаміки визначає межі економічного зросту, а зростання ентропії в економіці формує екологічні межі, яких вона може досягнути [1].

Ернст Шумахер у праці «Прекрасне в малому: Вивчення економіки з огляду на інтереси людей» (1973) описав екологічні наслідки економічного зростання, запропонувавши «буддійську економіку» [3].

У 1990 р. Г. Дейлі, Р. Констанца, А. Янссон, Д. Мартінес-Альєр створили «Міжнародне товариство екологічної економіки», визначивши три основні положення:

- економіка вбудована в природу, а економічні процеси є біологічними, фізичними і хімічними процесами перетворення природи;
- екологічна економіка – місце зустрічі екологів і економістів;
- екологічна економіка вимагає наукових міждисциплінарних досліджень, де економічні процеси пов'язані з фізичною реальністю.

По суті екологічна економіка є свого роду синергетичним синтезом неокласичної і ресурсної економіки в поєднанні з економікою природокористування і традиційною екологією (рис. 1).

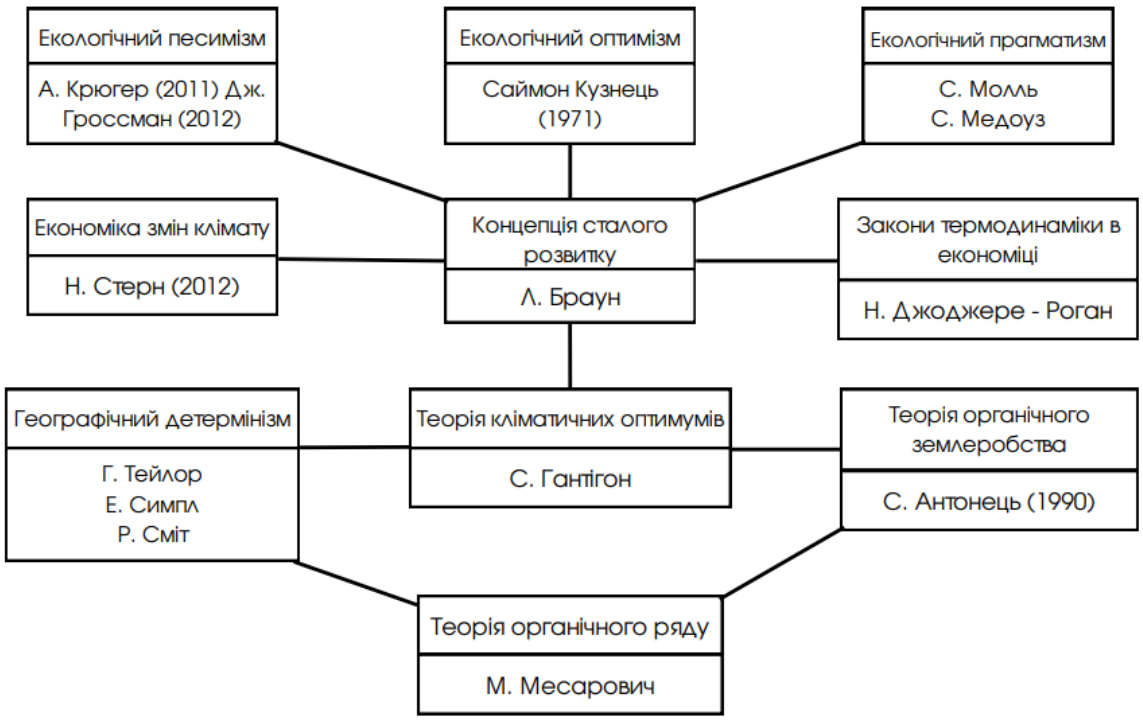


Рис. 1. Еколого-економічні теорії сучасності

Незалежно від ефективності виробництва, природні ресурси будуть виснажуватися, а ентропія у Всесвіті буде наростати.

На теренах України започатковане вчення В. Вернадського про ноосферу, плату за природокористування почали вводити тільки з 1988 р., адже екологічна ціна економічних благ дуже висока, але ціна природних ресурсів ще вища.

Екологічна революція суспільної свідомості, започаткована В. Вернадським, привела людство до інвайроменталогії, що породила інвайроменталізм як соціальний екологічний рух (рис. 2).

Держави не можуть його ігнорувати, і формуючи парадигму соціально-відповідального управління і враховуючи обмеженість природних ресурсів створюють елементи інвайроментальної безпеки та інвайроментальні економічні системи країн (рис. 3).

Визначальним об'єктом інвайроментальної економіки є екологічні, економічні та соціально-ментальні інститути та інституції, на різних ієрархічних рівнях поєднуючи природне середовище, виробництво (економіку) і людину, регулюючи їхні комплексні взаємодії і забезпечуючи раціональний розвиток відносин, які у свою чергу і є предметом вивчення інвайроментальної економічної науки.

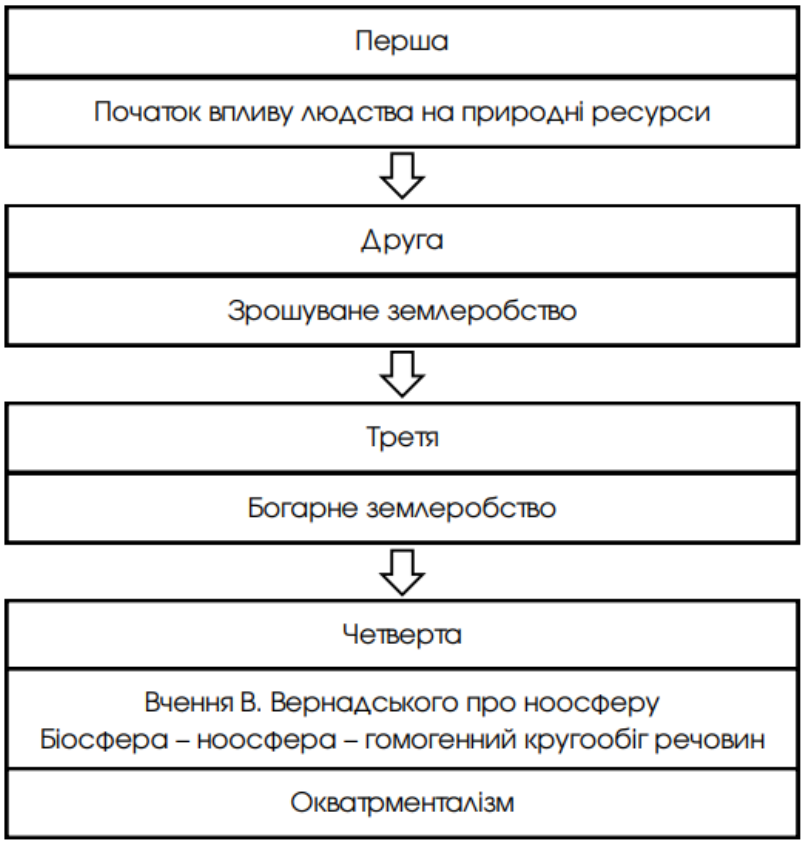


Рис. 2. Екологічні революції людства

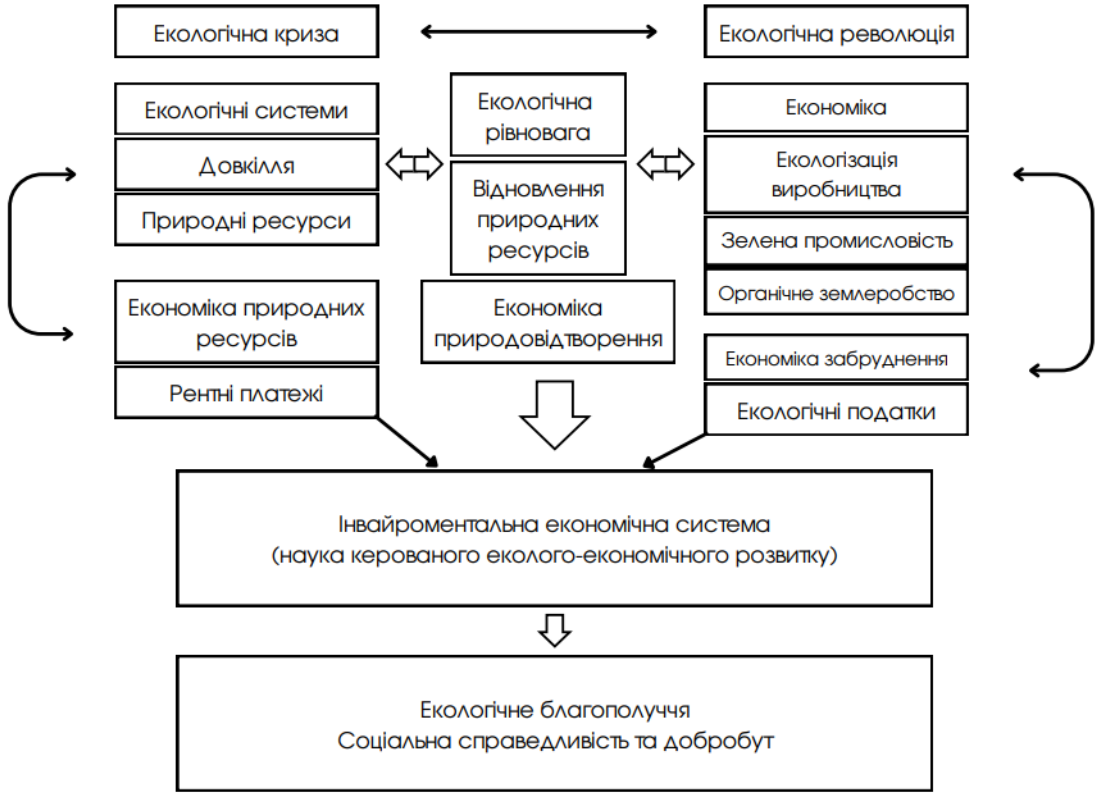


Рис. 3. Структурно-логічна схема інвайроментальної економічної системи

Місія інвайроментальної економіки реалізована і запроваджена рядом країн Європи та включає:

- справедливе оцінювання потенціалу суспільних благ навколишнього природного середовища і обмежених природних ресурсів;
- оцінювання і зіставлення витрат і результатів у сфері споживання і замінності природних ресурсів як обґрунтування раціонального суспільного вибору;
- моніторинг, вивчення та попередження ринкових провалів використання ноосфери;
- моніторинг і економічне оцінювання та розрахунок еколого-економічних екстерналій як зовнішніх негативних екологічних ефектів та індексація факторів, процесів і результатів;
- методи і системи оцінювання екологічних збитків від екологічної агресії, забруднення, споживання ресурсів, війни;
- розроблення світових стандартів, нормативів, стимулів і санкцій;
- формування моделей і механізмів регулювання раціонального соціально-економічного середовища.

Інвайроменталізм відображує не тільки необхідність урахування обмеженості природних ресурсів, а потребує від маркетингу враховувати негативний вплив на природу, коли споживання збільшується, ігноруючи негативні наслідки для довкілля.

Учені постійно повертаються до еколого-економічної сфери. Так, Клод Пинар (Канада), відстоюючи теорію інституціональних договорів, розвиває економічні школи у сфері природо-користування, особливо водокористування.

Перша жінка, Нобелевський лауреат в економіці, Еліонор Остром (2009) сформувала оптимальний інституційний механізм управління природними ре-

сурсами і спільно з О. Уільямсоном (2009) – представником нового інституціоналізму – побудували модель управління, де екологічні ресурси використовують без приватизації, одержавлення, а напряму «людина – природа» [4].

Учені на чолі з М. Ширлі, президентом інституту Р. Кроуза, вивчають виключно питання ресурсопостачання та еколого-економічного регулювання. Вплив природних ресурсів на інститути дали світу «теорію ресурсного прокляття» [5].

Особлива цінність окремих економічних теорій, економічних шкіл, аналізу в економіці визначена тим, що народи і країни проживають у різних економічних часових періодах, але екологічне життя проходить в екологічному сьогоденні.

Іван Франко підкреслював, що «ліків від усіх хвороб не існує», тому роль кожної економічної теорії і наукових учень – це як ліки для окремої економічної проблеми, часового та локального рівня, що мають право на життя та безцінні для суспільства.

Умовою успішного геополітичного розвитку будь-якої країни в сучасному світі є не лише успішне політичне союзне оточення або блок, а радше геополітична самодостатня стійкість і безпека в усіх вимірах: еколого-економічному, природно-ресурсному, енергетичному, продовольчому, суспільно-демографічному, освітньо-науковому і мілітарному.

Еколого-економічна базово-фундаментальна об'єктивна реальність спирається на постулати економічної нейтральності, інвайроменталізму, раціонального та ефективного природо-ресурсного користування, екологобезпечну інноваційну економіку з мінімальним навантаженням і мінімальною ентропією на екосистеми, що забезпечує не лише споживання відновних і невідновних ресурсів, а і приріст природно-ландшафтного потенціалу як сталий розвиток для прийдешніх поколінь, сучасний тренд розвитку світової спільноти [6].

Усе це можна реалізувати лише за умови підкорення приватних і суспільних інтересів цілям інвайроменталізму та визначення економічних і фінансових цілей інвайроментальної економіки, що означає формування і підтримку реальних натуральних, біосферних і грошових балансів (економічного) споживання та ентропії і відновлення природи, включаючи самовідновлення природних систем комплексів і штучне відновлення.

Візьмемо «Державну стратегію управління лісами України до 2035 року», де слова «…глобальне потепління… застарілі підходи… нагальна потреба, оптимізація, реорганізація, гендерно-орієнтовані підходи, екологічна стійкість…» не мають ні організаційного, ні економічного, ні екологічного навантаження. Але за текстом дві новини: комунальні ліси – до держави, а держлісгоспи об'єднати в одне єдине акціонерне товариство, ДП «Ліси України», і два абзаци із 40 сторінок відведено екологічній стійкості. Тобто екологічна «Лісова казка» не говорить ні про великі вирубки – «Сезон тиші» – і не визначає жодних доступних планових площ заліснення в Україні на 2024-2025 роки (виробництво лише 200 млн саджанців на рік).

За результатами досліджено, визначено, що в реальній інвайроментальній економічній системі спожитий ресурс підлягає відновленню і приросту, за умови, якщо [7]:

- кошти від вирубки лісів (лісова рента) в Україні (1 млрд 100 млн грн як плата за спеціальне використання лісових ресурсів (1 куб сосни – 304 грн)) виключно направляють на лісовідновлення, лісопосадки та лісоутримання (Великобританія 13,7 фунт ст./м^3, що у два рази вище, ніж плата в Україні);

- кошти за водокористування в Україні (рента) (з Дніпра – 0,86 грн/м^3, підземні води Полтавщини – 1,16 грн) сумарно складають 1100 млн грн/р. по Україні (для порівняння

в Європі рента від 12 злотих (120 грн) у Польщі до 9 євро/м^3 води в Данії направляють на захист і охорону прісних вод);

- земельна рента в Україні складає близько 27 млрд грн (до 2022 р.), або близько 500 грн/га, включаючи землі всіх категорій, причому за сільськогосподарські землі рента складає від 0,3 до 5 % НГО ріллі, або від 100 до 1500 грн/га за рік. У Європі від 1,6 до 3,4 % вартості землі, тобто якщо в Данії вартість 1 га близько 20 тис. євро, то податок складає від 300 до 650 євро/га на рік, або в 100 разів вищий, ніж в Україні. Роботи з докорінного поліпшення земель (меліорації) в Україні припинені, а кошти від землі до землі не повертаються.

Рентні платежі за руди і природні вуглеводні складають від 5 до 24 % вартості і за рівнем відповідають нормативам ЄС і Світу.

Крім рентних платежів, екологічні податки в державних фінансах країн Європи, і головне за умови цільового використання, складають близько 400 млн євро – за забруднення, транспорт і енергію [8].

Цілі екологічного курсу і екологічної нейтральності України залишаться нездійсненними попри всі декларативні заяви і намагання посадовців, якщо в Україні не будуть здійснені кроки щодо формування інвайроментальної економіки, а еколого-економічні розрахунки не сформують стан раціонального ресурсоспоживання та суспільно-справедливого формування, сплати і перерозподілу та цільового використання рентних платежів [9].

Особливо далекі від цілей сталого розвитку чинні державні нормативи платежів ренти за спеціальне лісокористування, використання прісних вод і землі. Низькі ренти за вирубані ліси, використану воду і природну родючість дорого коштуватимуть не тільки нинішньому поколінню, а і прийдешнім поколінням, яких ми обкрадаємо, до того ж дорожче [10].

Без еколого-економічної політики в Україні, націленої на цільове використання рентних платежів і екологічних податків, не можна не тільки відновити природно-ресурсний потенціал, а і утримати ситуацію, коли ентропія буде поглинати територію, поселення, річки, тваринний і рослинний світ і населення нашої країни, приріст якого найнижчий у світі.

Висновки і пропозиції. Учені в постійному пошуку економічних теорій і різних варіантів вирішення еколого-економічних проблем зупинилися на концепції формування інституціональної інвайроментальної економіки, яка найбільш раціонально вбирає ідею сталого розвитку і має механізм еколого-економічних компромісів, передбачаючи і економічне зростання, і збереження довкілля.

Необхідно підтримувати регуляторний вплив на господарюючу систему, або окремий об’єкт, без якого економічна ситуація тільки погіршуватиметься, а економічна система впадатиме в стан хаосу і природної ентропії.

Необхідно сформувати світову та державну економічну систему стимулів і санкцій та еколого-економічних нормативів, вуглецевого податку, втілювати планову ревіталізацію штучних об’єктів і землеробства та «зеленої» промисловості як новітній світовий тренд розвитку людства.

До країн-агресорів, як військових, так і екологічних, які знищують природно-ресурсний потенціал планети, басейни рік, морів і океанів, необхідно застосовувати світові економічні санкції, які компенсують і зупиняють шкоду ноосфері та змусять агресора відновити природно-ресурсний баланс екосистем.

В Україні занижені і несправедливі рентні платежі за спожиті природні ресурси та екологічні податки не тільки обкрадають народ України, а і підривають економічну, фінансову та мілітарну геополітичну стійкість України, знищують еколого-ландшафтний і соціально-демократичний потенціал країни.

Тільки детінізація і виведення економіки України з підпілля, використання

і встановлення нормативів рентних платежів на рівні країн Європи створять еколого-економічний фундамент геополітичної мілітарної стійкості, здатності та безпеки України.

Запропоновані інвайроментальні підходи та формування інвайроментальної економіки цільової рентної політики – це основа забезпечення сталого розвитку України.

Список використаних джерел

1. Holberg J. B. Sirius: Brightest Diamond in the Night Sky. Chichester, UK: Praxis Publishing, 2007. P. 15-16.
2. Свежавски С. Святий Фома, прочитаний заново. *Символ*. Париж. Липень 1995. № 33. С. 154.
3. Hoepner A. Gt. F., Kant B., Scholtens B. Influencing the perception of what and who is important in ecological economics. *Ecological Economics.* 2013. 89. P. 174-176.
4. Розвиток адміністративно-територіального устрою України як відповідь на мілітарні виклики / Г. І. Шарий, Є. Б. Угненко, Н. І. Сорочук та ін. *Зб. наук. праць Укр. держ. ун-ту залізнич. трансп.* Харків: УкрДУЗТ, 2023. Вип. 206. С. 129-138.
5. Актуалітети земельного розвитку громад та оборонної стійкості України / Г. І. Шарий, Є. Б. Угненко, Н. І. Сорочук та ін. *Зб. наук. праць Укр. держ. ун-ту залізнич. трансп.* Харків: УкрДУЗТ, 2024. Вип. 210. С. 145-153.
6. Угненко Є. Б., Ужвієва О. М., Сорочук Н. І. Аналіз нормативної бази оцінки шкоди та збитків, завданих земельним ресурсам України внаслідок збройної агресії. *Матеріали XXVI Міжнар. наук.-техн. конф. «Технологія-2023», Україна, м. Київ, Східноукраїнський національний університет ім. В. Даля, 26 травня 2023 року*. С.192-195.
7. Сорочук Н. І., Сорочук Ю. О. Визначення розміру шкоди, завданої земельним ресурсам України під час дії воєнного стану. *Матеріали VI Міжнар. наук.-практ. Інтернет-конференції «Сучасні тенденції економічного розвитку регіонів: теоретичні та прикладні аспекти», 09-10 травня 2024 року, Україна, м. Одеса, ОДАБА*. С. 348-351.
8. Особливості раціонального використання земель сільськогосподарського призначення в умовах воєнного стану / Є. Б. Угненко, О. М. Ужвієва, Н. І. Сорочук, Ю. О. Сорочук. *Матеріали VIII Міжнар. наук.-практ. конф. «Сучасні технології землеустрою, кадастру та управління земельними ресурсами», Україна, м. Київ, НАУ, 16 – 17 березня 2023 р.* С. 101-103.
9. Сорочук Н. І., Сорочук Ю. О. Оцінка шкоди, завданої земельним ресурсам водного та природоохоронного фондів України в ході російської збройної агресії. *Матеріали XVI Міжнар. наук.-практ. конф. «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті, MINTT – 2024», 29–31 травня 2024 року, Україна, м. Одеса, Херсонська державна морська академія: тези доповідей конференції.* С. 340-341.
10. Сорочук Н. І., Зеленська А. А., Сорочук Ю. О. Екологічні проблеми в галузі використання та охорони земель під час воєнних дій. *Матеріали Всеукр. наук.-практ. інтернет-конф. студ., асп. та молодих вчених «Екологічно сталий розвиток урбосистем», Україна, м. Харків, ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2-3 листопада 2022 року.* С. 90-92.

Шарий Григорій Іванович, доктор економічних наук, завідувач кафедри автомобільних доріг, геодезії та землеустрою, Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка».
ORCID iD: 0000-0001-5098-2661. Тел.: +38(050)8504444. E-mail: shariy.grigoriy61@gmail.com.

Угненко Євгенія Борисівна, доктор технічних наук, завідувачка кафедри вишукувань та проєктування шляхів сполучення, геодезії та землеустрою, Український державний університет залізничного транспорту.
ORCID iD: 0000-0002-3945-788X. E-mail: ugnenko.ievgenia@gmail.com.
Шара Світлана Юріївна, аспірантка, асистентка кафедри прикладної екології та природокористування, Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка». ORCID iD: 0000-0002-6669-6667.
E-mail: sv.shara12@gmail.com.
Сорочук Наталія Ігорівна, асистентка кафедри вишукувань та проєктування шляхів сполучення, геодезії та землеустрою, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0002-6042-2681. E-mail: nat.sorochuk50@gmail.com.

Shariy Grygoriy, Dr. Sc. (Econ.), Professor, Head of the Department of Highways, Geodesy and Land Management of the Yuri Kondratyuk Poltava National Technical University. ORCID iD: 0000-0001-5098-2661.
Tel.: +38 (050) 850 44 44. E-mail: shariy.grigoriy61@gmail.com.
Ugnenko Yevgeniia, Dr. Sc. (Tech.), Professor, Head of the Department of Researches and Design of Means of Communication, Geodesy and Land Management of Ukrainian State University of Railway Transport.
ORCID iD: 0000-0002-3945-788X. E-mail: ugnenko.ievgenia@gmail.com.
Shara Svitlana, PhD student, Assistant of the Department of Applied Ecology and Nature Management of the Yuri Kondratyuk Poltava National Technical University. ORCID iD: 0000-0002-6669-6667.
E-mail: sv.shara12@gmail.com.
Sorochuk Nataliia, Assistant of the Department of Researches and Design of Means of Communication, Geodesy and Land Management of Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0002-6042-2681.
E-mail: nat.sorochuk50@gmail.com.

Статтю прийнято 16.06.2025 р.

УДК 528.9

ГЕОІНФОРМАЦІЙНА СИСТЕМА ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНОГО МАРШРУТУ В УМОВАХ НАВІГАЦІЙНИХ ОБМЕЖЕНЬ

Канд. техн. наук Є. М. Коростельов, канд. пед. наук Л. М. Коваленко

GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEM FOR OPTIMAL ROUTE DETERMINATION UNDER NAVIGATION LIMITATIONS

PhD (Tech.) Ye. Korostelov, PhD (Ped.) L. Kovalenko

DOI: https://doi.org/10.18664/1994-7852.212.2025.336637

Анотація. *У статті висвітлено методологічні та практичні засади побудови автономної геоінформаційної системи для визначення оптимальних маршрутів пересування в умовах урбанізованої території за відсутності або обмеженого доступу до сучасних навігаційних сервісів. Дослідження спрямовано на підвищення рівня безпеки та мобільності населення в надзвичайних ситуаціях (зокрема під час повітряних тривог, аварійних чи воєнних обставин), коли стає неможливим використання онлайн-картографічних платформ чи GPS-навігації. Запропоновано алгоритм формування структурованої бази геоданих із використанням відкритих джерел і муніципальних реєстрів, обґрунтовано вибір основних тематичних шарів (дорожня мережа, укриття, зупинки громадського транспорту, об'єкти критичної інфраструктури). Наведено детальний опис технологічного процесу побудови маршрутів у середовищі QGIS із урахуванням просторової доступності укриттів, фактичного стану транспортної інфраструктури, альтернативних шляхів евакуації та*

особливостей пішохідного і транспортного сполучення. Особливу увагу приділено порівнянню міжнародного досвіду щодо впровадження автономних ГІС у кризових ситуаціях, аналізу актуальних обмежень, викликів впровадження та перспектив подальшого розвитку системи у вітчизняній практиці. Результати роботи можуть бути використані органами місцевого самоврядування, екстреними службами, волонтерськими організаціями для підвищення рівня готовності міського середовища до надзвичайних ситуацій і забезпечення оперативної навігаційної підтримки населення.

Ключові слова: *геоінформаційна система, оптимальний маршрут, укриття, навігація, QGIS, транспортна інфраструктура, безпека, урбанізована територія, кризові ситуації.*

Abstract. *The article explores both theoretical and applied aspects of developing an autonomous geographic information system (GIS) for determining optimal routes in urban environments, particularly under conditions of restricted or absent navigation services. In the context of modern challenges facing Ukrainian cities–such as military threats, air raid alerts, infrastructure disruptions, or technological failures–the ability to generate safe and effective routes for urban mobility becomes critical for protecting civilians and supporting the work of emergency responders. The research presents a methodology for building a structured geospatial database that integrates data from open sources and municipal registries, including layers for road networks, civil protection shelters, public transport stops, and objects of critical infrastructure. Special attention is devoted to the selection and verification of spatial data, ensuring its relevance and completeness under dynamic crisis conditions.*

The technological workflow is described in detail, with a focus on practical implementation in the QGIS environment. This includes data import and harmonization, spatial analysis for shelter accessibility, road network assessment, creation of buffer zones, and the design of offline route-finding algorithms that prioritize both distance minimization and safety. Scenarios for user interaction are presented, ranging from individual city residents to local authorities and volunteer groups. A comparative analysis is conducted with international approaches to autonomous GIS deployment in crisis management, highlighting best practices in data updating, user communication, and multi-format delivery (digital, print, mobile).

Key limitations, such as data incompleteness, the necessity for regular updates, digital literacy barriers, and information security risks, are critically examined. The results demonstrate the feasibility and effectiveness of the proposed system for increasing urban resilience, enabling timely evacuation, and improving the preparedness of local communities. The article concludes with recommendations for integrating such solutions into the broader emergency response framework of Ukrainian cities and suggests directions for further research, including the development of mobile applications and integration with official alert systems. This work may serve as a methodological reference for municipalities, rescue services, and researchers working on urban safety and crisis GIS applications.

Keywords: *geographic information system, urban safety, optimal routing, civil protection shelters, offline navigation, QGIS, crisis management, spatial analysis, emergency preparedness.*

Вступ. В умовах ескалації воєнних загроз, терористичних атак і зростання кількості надзвичайних ситуацій питання безпеки міського простору набувають особливої актуальності. Забезпечення своєчасної та безпечної мобільності мешканців великих міст – критично важливе завдання для органів місцевого самоврядування, служб цивільного захисту і фахівців у галузі геодезії та просторового планування. Досвід останніх років в Україні, зокрема події у Харкові та інших містах, переконливо продемонстрував таке: за умов повітряних тривог, масових обстрілів,

руйнування інфраструктури або тотальних перебоїв зв'язку можливість отримати актуальну інформацію про безпечні шляхи переміщення стає питанням не лише комфорту, а й виживання населення [1].

Особливо гострою ця проблема постає для маломобільних категорій громадян – людей похилого віку, осіб з інвалідністю, сімей із дітьми, а також персоналу екстрених служб і волонтерів, які забезпечують оперативну допомогу в зоні ризику. Втрата доступу до онлайн-навігації, GPS і мобільного інтернету суттєво обмежує можливості самостійного планування маршрутів до укриттів, пунктів евакуації або медичних установ. Це створює додаткові загрози в динамічних кризових умовах, коли кожна хвилина має значення.

На сучасному етапі розвитку геоінформаційних технологій особливе значення мають автономні рішення, здатні працювати офлайн, базовані на актуальних просторових даних і максимально доступні для широкого кола користувачів [2]. Впровадження таких систем у практику дає змогу:

- підвищити рівень захищеності міського населення;
- мінімізувати ризики під час переміщення в надзвичайних ситуаціях;
- забезпечити оперативний доступ до перевіреної картографічної інформації незалежно від стану комунікаційної інфраструктури;
- оптимізувати маршрути евакуації з урахуванням наявних укриттів, стану дорожньої мережі і транспортної доступності [3].

У цій статті подано комплексний підхід для розроблення та впровадження автономної геоінформаційної системи для міського середовища. Запропоновано детальний алгоритм її створення, принципи побудови бази просторових даних, механізми адаптивної маршрутизації та приклади практичного використання для потреб населення, органів влади і рятувальних служб. Окрему увагу приділено аналізу міжнародного досвіду, оцінюванню наявних обмежень і перспектив подальшого розвитку таких систем у вітчизняній практиці просторового планування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На сучасному етапі розвитку просторових технологій особливо важливими є питання застосування геоінформаційних систем для підвищення ефективності управління міським середовищем в умовах надзвичайних ситуацій. Світова наукова спільнота накопичила значний досвід впровадження ГІС для навігації, аналізу доступності та оптимізації транспортних потоків у кризових умовах. Так, у роботі Lu D. [1] автор наголошує на важливості інтеграції просторово-часових моделей для підтримки ухвалення рішень у містах із високою динамікою подій. Дослідження Saraf M. H. M. [2] і Yalpir S. [3] підтверджують ефективність використання ГІС для планування евакуації, оптимізації маршрутів громадського транспорту, урахування реальних інфраструктурних обмежень, стану дорожнього покриття і розміщення основних об'єктів інфраструктури.

Особливе місце займають праці, присвячені кризовому управлінню, у яких проаналізовано застосування ГІС для побудови альтернативних маршрутів у разі стихійних лих, масових техногенних аварій чи бойових дій. Наприклад, у роботах Ayedun C. A. [5] і Taha M. M. [6] розглянуто алгоритми маршрутизації з урахуванням доступності укриттів, часових вікон евакуації, транспортних коридорів і потенційних зон ризику.

Вітчизняний науковий доробок у цьому напрямі, на жаль, ще не набув належного рівня системності. Більшість досліджень зосереджені на кадастрових, земельно-ресурсних чи екологічних аспектах геоінформаційних технологій (Губар Ю. [7], Лященко А. [8], Воронова В. [9]), тоді як проблематика автономної

навігації, адаптивного маршрутизування та убезпечення пересування у великих містах України в умовах обмеженої роботи навігаційних сервісів вивчена недостатньо. Слід також зазначити поодинокі проєкти, що спрямовані на створення цифрових карт укриттів і поширення інструкцій для населення (Степаненко П. [10]), але їх застосування переважно має фрагментарний характер і не інтегровано в цілісні ГІС-системи для кризового реагування.

Отже, актуальність тематики зумовлена не лише сучасними викликами воєнного часу, а і відсутністю комплексних досліджень, які поєднують просторове моделювання, аналіз інфраструктурних обмежень і практичну реалізацію автономних навігаційних рішень для міського середовища. Саме заповнення цієї наукової прогалини і становить основну мету цієї статті, яка покликана запропонувати новий інноваційний підхід щодо побудови безпечних маршрутів у кризових ситуаціях для великих міст України.

Визначення мети та завдання дослідження. Головною метою дослідження є розроблення і впровадження автономної геоінформаційної системи, призначеної для побудови оптимальних маршрутів у межах міста Харкова з урахуванням наявних навігаційних обмежень, структури транспортної мережі, розташування захисних споруд (укриттів) і актуального стану міської інфраструктури. Такий підхід покликаний не лише забезпечити безпечне та оперативне пересування містом у кризових ситуаціях, а й надати ефективний інструмент для планування дій як пересічним мешканцям, так і оперативним службам чи волонтерським організаціям.

Для досягнення поставленої мети в рамках дослідження визначено такі основні завдання:

- здійснити комплексний збір, систематизацію та аналіз геопросторових даних щодо дорожньої мережі, розташування укриттів, транспортних зупинок і основних об'єктів міської інфраструктури Харкова [13];
- сформувати повноцінну базу просторових даних у середовищі QGIS із використанням відкритих джерел інформації (зокрема OpenStreetMap [11], офіційних муніципальних реєстрів і відомчих порталів);
- розробити і апробувати алгоритм побудови маршрутів, який дає змогу функціонувати в автономному режимі (офлайн), забезпечує гнучке врахування безпекових критеріїв і оперативно адаптується до змін ситуації на місцевості;
- візуалізувати результати просторового аналізу шляхом створення наочних картографічних матеріалів, інструктивних схем і цифрових додатків для різних категорій користувачів (мешканців, рятувальників, служб підтримки);
- експертно оцінити потенціал та перспективи практичного використання розробленої системи в типових сценаріях надзвичайних ситуацій різного характеру – від повітряних тривог і масових евакуацій до локальних інцидентів на транспортній інфраструктурі.

Реалізація цих завдань має сприяти підвищенню готовності міського середовища до викликів надзвичайного стану та забезпечити стійкість функціонування критично важливих об'єктів інфраструктури у Харкові.

Методика дослідження. Методологічною основою дослідження стало використання сучасного програмного забезпечення з відкритим кодом – QGIS, яке забезпечує широкий функціонал для створення, обробки, візуалізації та аналізу просторових даних у міському середовищі. Для формування вихідної інформаційної бази були використані як загальнодоступні просторові дані з міжнародної платформи OpenStreetMap, так і офіційні відкриті ресурси Харківської міської ради та Державної служби України з надзвичайних ситуацій (ДСНС), що дало змогу

максимально деталізувати структуру транспортної мережі та розташування об'єктів критичної інфраструктури [12-14].

Основні етапи дослідження включали таке.

Формування багатошарової бази геоданих, яка охоплює дорожню мережу міста, локалізацію всіх доступних укриттів, зупинки громадського транспорту, адміністративні межі районів та основні соціально важливі об'єкти.

Імпорт і попередня обробка даних у середовищі QGIS, виконання топологічного контролю для виявлення помилок у просторових зв'язках між об'єктами, створення та наповнення атрибутивних таблиць, що містять характеристики кожного елемента інфраструктури.

Побудова буферних зон (Buffer) навколо укриттів та інших важливих точок для оцінювання зони їх досяжності в пішохідному або транспортному режимі, що дає змогу визначити «білі плями» на мапі доступності.

Геокодування та верифікація координат за допомогою сервісу Nominatim і ручної перевірки точності для критично важливих об'єктів (у тому числі через співставлення з муніципальними реєстрами та польовими даними) [15].

Використання плагіна RoadGraph для побудови маршрутів у режимі офлайн із можливістю налаштування критеріїв оптимальності – мінімізація довжини шляху, максимальна кількість доступних укриттів на маршруті, доступність громадського транспорту на шляху евакуації [16].

Комплексне оцінювання оптимальності та безпеки запропонованих маршрутів із застосуванням просторового аналізу, включаючи врахування щільності забудови, транспортних вузлів і наявність альтернативних шляхів.

Візуалізація отриманих результатів у вигляді інтерактивних картографічних схем, інструктивних матеріалів для мешканців і друкованих карт для служб порятунку, а також створення рекомендацій щодо розміщення маршрутних схем у громадських місцях.

Завдяки такому підходу було забезпечено комплексність, достовірність і актуальність моделі міського простору для вирішення завдань навігації та безпечної евакуації населення в надзвичайних ситуаціях.

Виклад основного матеріалу дослідження. Створення повноцінної, надійної та актуальної бази геоданих є основним етапом у розробленні будь-якої геоінформаційної системи, орієнтованої на завдання кризового планування та навігації. Для забезпечення комплексного відображення міського простору було зібрано і систематизовано просторову інформацію з кількох незалежних джерел, що підвищило надійність і точність кінцевого продукту.

Перш за все визначено основні тематичні шари, які мають безпосередній вплив на мобільність мешканців у надзвичайних умовах (табл. 1).

Дорожня мережа міста – базовий лінійний шар, який містить інформацію про всі вулиці, провулки, пішохідні зони і транспортні артерії. Атрибутивний склад включає назву, категорію, тип покриття, стан проїзної частини, довжину та призначення (основна магістраль, другорядна, внутрішньодворова тощо).

Пункти укриттів і захисних споруд – точковий шар, що містить дані про місцезнаходження об'єктів цивільного захисту різних типів (підвали, сховища, підземні переходи), їхню місткість, рівень облаштування, стан доступності та режим роботи. Джерела: ДСНС, офіційні муніципальні ресурси.

Зупинки громадського транспорту – точковий шар з інформацією про розташування, назву, тип (автобусна, трамвайна, тролейбусна), наявність накриття, доступність для маломобільних груп.

Основні об'єкти критичної інфраструктури – комбінований шар (точки/полігони), що охоплює лікарні, школи, дитячі садки, адміністративні будівлі, пожежні частини, пункти поліції тощо.

Адміністративні межі та райони – полігональні шари, які допомагають орієнтуватися в межах міста і спрощують зональний аналіз.

Дані збирали поетапно.

Імпорт основної транспортної мережі та інфраструктурних об'єктів з OpenStreetMap з подальшою перевіркою їхньої актуальності за допомогою локальних відкритих ресурсів та офіційних сайтів міської ради.

Завантаження і оновлення даних про укриття із загальнодоступних реєстрів та інтеграція їх у загальний проєкт QGIS із подальшим геокодуванням і ручною верифікацією місцезнаходження.

Створення атрибутивних таблиць із максимальною деталізацією: до кожного об'єкта додавали не лише просторові координати, а і додаткові характеристики, що мають значення для ухвалення рішень у кризових умовах (наприклад час роботи укриття, кількість входів, наявність засобів комунікації тощо).

Формування буферних зон навколо укриттів і основних об'єктів із заданим радіусом для аналізу досяжності в пішохідному і транспортному режимах.

Для зручності користувачів усі шари містили чіткі ідентифікатори, атрибути для фільтрації та сортування, а також були інтегровані в загальний просторовий проєкт QGIS із можливістю швидкої актуалізації даних у разі появи нової інформації. Особливу увагу приділяли коректності топології: очищення від дубльованих об'єктів, злиття суміжних ліній, перевірка замкненості полігонів.

Отже, база геоданих дає змогу проводити складний просторовий аналіз і забезпечує основу для побудови адаптивних маршрутів з урахуванням різних сценаріїв надзвичайних ситуацій.

Таблиця 1

Основні тематичні шари ГІС для автономної навігації

Номер з/п	Назва шару	Опис шару	Джерело/Примітка
1	Дорожня мережа	Вулиці, дороги, пішохідні зони, проїзди	OpenStreetMap, місцеві БД
2	Будівлі	Контури будівель і споруд	Державний земельний кадастр
3	Укриття	Об'єкти цивільного захисту, підземні укриття	ДСНС, місцева влада
4	Медичні заклади	Лікарні, аптеки, пункти невідкладної допомоги	Офіційні портали міст
5	Комунікації	Лінії електропередач, водопроводи, газопроводи	Міські служби
6	Громадський транспорт	Зупинки, маршрути транспорту	Міські транспортні БД
7	Рельєф	Висотні відмітки, ізолінії	Геопортал України
8	Межі районів	Адміністративні межі, квартали	Кадастрова карта

Вирішення завдання формування оптимального маршруту в умовах обмеженої навігаційної доступності потребує комплексного підходу щодо використання ГІС-інструментів, що дають змогу поєднати аналіз просторової структури міста із критеріями безпеки та доступності. З огляду на потенційні перебої з онлайн-сервісами, побудова маршруту здійснюється автономно, тобто без залучення зовнішніх серверів чи постійного підключення до інтернету.

На першому етапі користувач (мешканець, співробітник служби порятунку чи волонтер) попередньо завантажує необхідні картографічні шари – дорожню мережу, укриття, зупинки транспорту – у локальний проєкт QGIS. Такий підхід гарантує незалежність роботи системи навіть у разі повного зникнення зв'язку.

Далі діє послідовний алгоритм:

Задавання параметрів маршруту. Користувач у середовищі QGIS вибирає початкову та кінцеву точки переміщення (наприклад місце свого перебування і найближче рекомендоване укриття або пункт евакуації). Для цього передбачено ручне або автоматизоване введення координат, використання пошуку за адресою чи інтерактивний вибір на карті.

Налаштування критеріїв оптимізації. Окрім мінімізації довжини шляху, система дає змогу враховувати додаткові фактори: максимізацію кількості доступних укриттів уздовж маршруту, наявність зупинок громадського транспорту, мінімізацію проходження через зони підвищеної щільності забудови чи потенційної небезпеки. Можлива пріоритизація маршрутів, які проходять поруч із критичними об'єктами інфраструктури або мають кращу доступність для маломобільних груп населення.

Автоматизований розрахунок маршруту. За допомогою спеціалізованого плагіна RoadGraph у QGIS будують оптимальний маршрут за заданими критеріями, як показано на рисунку. Перевагою цього підходу є повна автономність: маршрутизацію виконують локально на комп'ютері чи мобільному пристрої користувача без необхідності онлайн-доступу до зовнішніх картографічних сервісів.

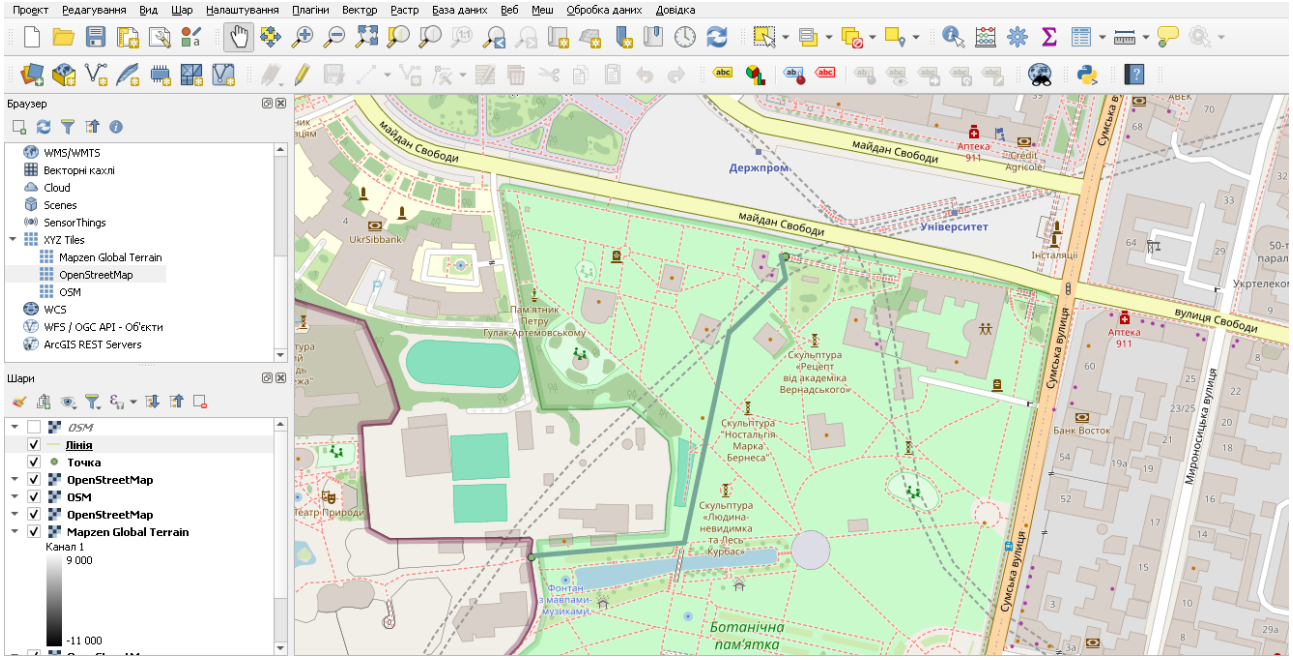


Рис. Приклад побудови маршруту до укриття в QGIS

Аналіз та експортування результату. Отриманий маршрут можна детально переглянути на карті, проаналізувати доступність укриттів, визначити альтернативні шляхи в разі блокування певних ділянок дорожньої мережі. Система дає змогу експортувати маршрут у форматах, придатних для друкування, передавання іншим користувачам або збереження на фізичному носії.

Створення спеціалізованих схем. Для потреб маломобільних груп населення, людей похилого віку, соціальних працівників чи екстрених служб система генерує друковані схеми руху з підписами та графічними підказками. Такі матеріали рекомендовано розміщувати у громадських місцях, житлових будинках, навчальних закладах і медичних установах для забезпечення широкої доступності інформації.

Упровадження цього підходу забезпечує можливість швидкої адаптації до змін ситуації, оперативної побудови маршрутів з урахуванням поточних обмежень і потреб різних груп користувачів, а також підвищує загальний рівень безпеки і стійкості міського середовища за надзвичайних обставин.

Запропонована автономна геоінформаційна система на базі QGIS має універсальний характер і може бути адаптована до потреб різних категорій користувачів у реальних надзвичайних умовах. Через особливості міського середовища було виділено кілька типових сценаріїв застосування, кожен із яких вирішує специфічне завдання та ілюструє переваги інтегрованого підходу щодо навігації у кризових ситуаціях (табл. 2).

1. Евакуація мешканця під час повітряної тривоги. У разі оголошення повітряної тривоги мешканці міста змушені максимально швидко орієнтуватися у просторі та вибирати безпечний маршрут до найближчого укриття. За допомогою автономної ГІС користувач має змогу:

- оперативно визначити найближче захисне спорудження з урахуванням наявних обмежень дорожньої мережі (перекриття, аварійні ділянки, ремонтні роботи);
- вибрати маршрут, що мінімізує час перебування на відкритому просторі;
- отримати інструкцію із зазначенням критичних точок (місця переходу дороги, вхідні групи до укриття, наявність зупинок транспорту тощо);
- роздрукувати схему або зберегти її для використання на мобільному пристрої навіть без інтернету.

2. Волонтерська допомога маломобільним групам населення. Для людей похилого віку, осіб з інвалідністю або сімей із дітьми особливо актуальним є отримання доступної, наочної та зрозумілої інформації про безпечні шляхи евакуації. Волонтери та соціальні працівники можуть заздалегідь сформувати і розповсюдити друковані маршрутні схеми для конкретних житлових масивів чи будинків. Це дає можливість:

- знизити рівень дезорієнтації у стресових ситуаціях;
- уникати маршрутів із крутими підйомами, сходами, складними переходами;
- ураховувати наявність укриттів, які обладнані для потреб маломобільних осіб;
- інтегрувати додаткову інформацію (телефони екстрених служб, адреси пунктів медичної допомоги).

3. Діяльність екстрених служб за надзвичайних обставин. Рятувальники, пожежники, медичні працівники та поліція часто стикаються з необхідністю швидкого доступу до місця події навіть у випадку часткового руйнування або блокування певних ділянок транспортної мережі. Автономна ГІС дає змогу:

- швидко формувати альтернативні маршрути з урахуванням інформації про непрохідність чи пошкодження окремих вулиць і перехресть;
- координувати дії кількох підрозділів, розраховуючи оптимальні шляхи для різних типів техніки та спецтранспорту;

- здійснювати просторовий аналіз для пошуку обхідних шляхів, мінімізуючи затримки у прибутті на місце події;
- оперативно оновлювати дані про стан інфраструктури й обмінюватися схемами з іншими службами.

Отже, розроблена система є ефективним інструментом підтримки ухвалення рішень у надзвичайних ситуаціях, підвищує загальний рівень безпеки населення та сприяє координації дій усіх залучених сторін у кризовий період.

Таблиця 2

Типові сценарії використання автономної ГІС

Номер з/п	Сценарій використання	Короткий опис ситуації	Основні функції системи
1	Екстрена евакуація під час повітряної тривоги	Виявлення оптимального маршруту до найближчого укриття	Автоматична побудова маршруту, друкована схема
2	Робота соціальних служб	Доставлення допомоги маломобільним громадянам у кризових умовах	Планування маршруту з урахуванням особливих потреб
3	Навігація для служб порятунку	Оперативне переміщення екстрених служб до місця події	Оновлення маршрутів з урахуванням блокувань, аналіз альтернатив
4	Індивідуальна підготовка громадян	Ознайомлення з укриттями, прокладання маршрутів у разі НС	Інтерактивна карта, збереження маршрутів
5	Проведення навчальних евакуацій	Організація тренувальних заходів у школах, лікарнях, офісах	Генерація схем для різних груп користувачів
6	Підтримка роботи волонтерських штабів	Координація доставлення гуманітарної допомоги в міські райони	Аналіз доступності, прокладання оптимальних маршрутів

Процес упровадження автономних геоінформаційних систем у міське середовище, особливо в контексті кризового планування й навігації, супроводжений низкою важливих технічних, організаційних і соціальних бар'єрів, які суттєво впливають на ефективність і сталість функціонування таких рішень [4].

Актуальність і повнота просторових даних. Використання відкритих джерел, зокрема OpenStreetMap, муніципальних реєстрів, даних ДСНС, хоча й дає змогу швидко сформувати базу геоданих, не гарантує повної актуальності й достовірності відомостей про розташування укриттів, стан дорожньої мережі чи наявність транспортних обмежень. Постійна урбанізація, інфраструктурні зміни, сезонні ремонти й навіть стихійні руйнування в умовах воєнних дій призводять до швидкого «старіння» картографічної інформації. Це потребує організації регулярного оновлення даних, залучення волонтерських спільнот, тісної співпраці з місцевими органами влади.

Офлайн-функціонування та цифрова грамотність. Запуск автономної ГІС передбачає роботу з локальною базою даних, що зберігається на пристрої користувача. Проте не всі мешканці міста мають достатній рівень цифрової грамотності або доступ до сучасних пристроїв для самостійного завантаження, оновлення й використання картографічної інформації в режимі офлайн. Особливої уваги потребують маломобільні групи, для яких необхідно створювати максимально прості у використанні рішення – друковані картосхеми, стенди з інструкціями, спеціальні інформаційні пункти в житлових будинках і місцях масового перебування.

Доступність інформації для різних категорій користувачів. Інтерфейс ГІС має бути адаптований під потреби людей різного віку, із різним рівнем підготовки та фізичними можливостями. Особливо гостро стоїть питання для людей похилого віку, осіб з інвалідністю, батьків із маленькими дітьми. У таких випадках необхідно забезпечити альтернативні способи донесення інформації – через друковані довідники, стенди в під'їздах, інфографіку в публічних місцях, телефони гарячих ліній, консультаційні пункти тощо.

Питання інформаційної безпеки. Публікація повних координат усіх захисних споруд, маршрутів евакуації та чутливих об'єктів інфраструктури у відкритому доступі несе ризик для безпеки міста в цілому. Надмірна відкритість таких даних може бути використана уразливими сторонами або створити додаткову небезпеку для цивільного населення. Тому дуже важливо впроваджувати обмеження щодо поширення критично важливої інформації, застосовувати диференційований доступ для різних категорій користувачів і співпрацювати з органами влади з питань кіберзахисту.

Технічна підтримка та оновлення системи. Ще одним викликом є необхідність постійної технічної підтримки платформи, оперативного реагування на повідомлення про помилки чи зміни в міській інфраструктурі. Для цього доцільно залучати ІТ-спільноту, розвивати мережу локальних адміністраторів і забезпечити швидкі канали зворотного зв'язку з користувачами.

Успішне впровадження автономної ГІС потребує не лише сучасних технічних рішень, а і системного підходу для організації оновлення даних, навчання користувачів, захисту інформації та соціальної адаптації. Подолання цих бар'єрів є передумовою для забезпечення стійкості й ефективності кризової навігації у великих містах України.

Порівняння з міжнародним досвідом впровадження автономних ГІС для кризової навігації. Міжнародна практика зазначає високу ефективність впровадження автономних геоінформаційних систем для вирішення завдань навігації, евакуації та інформування населення в надзвичайних ситуаціях різного походження – від стихійних лих і техногенних аварій до терористичних загроз і воєнних дій. Розвинуті країни, зокрема США, Японія, Ізраїль і держави Європейського Союзу, накопичили значний досвід створення і підтримки подібних систем, які мають високу технологічність, постійну інтеграцію новітніх інформаційних рішень, орієнтовані на користувача.

Наприклад, у Сполучених Штатах Америки та Японії автономні ГІС використовують як елемент державної системи цивільного захисту. Однією з характерних рис є наявність багатомовної підтримки (англійська, японська, іспанська, китайська та інші мови), що дає змогу інформувати різноетнічне населення навіть у стресових ситуаціях. Такі системи інтегровані з каналами екстреного сповіщення, зокрема SMS, push-нотифікаціями на мобільні пристрої та голосовими сервісами, що істотно підвищує охоплення та швидкість передавання важливої інформації у кризовий момент [17, 18].

У країнах ЄС, а також Ізраїлі велику увагу приділяють розробленню інтерактивних офлайн-карт евакуації, щоб мешканці орієнтувалися навіть у разі відключення електромережі або інтернету. Використовують мобільні застосунки з інтегрованими маршрутними алгоритмами, які дають змогу завантажити останню актуальну версію карт на пристрій для подальшого використання без доступу до мережі [19].

Важливою особливістю західного підходу є залучення до процесу оновлення даних не лише офіційних структур, а й волонтерських спільнот, муніципальних працівників і активістів. Регулярне оновлення інформації про стан доріг, укриття, наявність перешкод чи блокпостів здійснюють за допомогою відкритих платформ або чат-ботів, що сприяє оперативному реагуванню на зміни обстановки та підвищує точність просторових даних у реальному часі.

Крім того, сучасні ГІС-системи за кордоном підтримують можливість друкування карт та інструкцій для людей похилого віку, дітей і маломобільних груп, а також розміщення інформаційних стендів у публічних місцях – на вокзалах, у лікарнях, адміністративних будівлях. Це забезпечує доступність інструкцій навіть для тих, хто не користується цифровими технологіями.

Отже, зарубіжний досвід демонструє доцільність широкої інтеграції автономних ГІС у систему цивільного захисту, орієнтацію на багатоформатне інформування населення та залучення громади до постійного удосконалення інструментів кризової навігації. Застосування цих підходів в українських реаліях має значний потенціал для підвищення ефективності реагування на надзвичайні ситуації та забезпечення захищеності мешканців великих міст.

Висновки. У результаті проведеного дослідження запропоновано та впроваджено новий підхід щодо створення автономної геоінформаційної системи для побудови оптимальних маршрутів у міських умовах з урахуванням обмежень навігації, реального стану інфраструктури та доступності захисних споруд. Наукова новизна роботи полягає в розробленні алгоритмів автономної маршрутизації, які не потребують доступу до онлайн-сервісів, а також поєднанні багатошарової просторової бази даних із можливістю залучення волонтерських ініціатив для її актуалізації. На відміну від відомих зарубіжних систем кризової навігації (наприклад у країнах ЄС, Японії, Ізраїлі), запропонована система орієнтована на специфічні умови українських міст під час воєнних дій, містить локалізовані шари даних про захисні споруди та функціонує повністю автономно, що забезпечує її стійкість навіть за відсутності інтернету.

Апробація системи на прикладі міста Харкова засвідчила її практичну дієвість: побудовано багатошарову базу геоданих, реалізовано алгоритми маршрутизації з урахуванням безпекових критеріїв, створено картографічні схеми для різних категорій користувачів, у тому числі маломобільних груп населення. Це дає змогу підвищити рівень захищеності мешканців, оптимізувати роботу екстрених служб і органів влади в умовах надзвичайних ситуацій і підвищити стійкість міського простору до раптових загроз. Запропонований підхід може бути адаптований для інших міст України з урахуванням місцевої специфіки та інформаційних ресурсів.

Подальші дослідження спрямовані на розроблення мобільних додатків для автономної навігації, інтеграцію із системами екстреного сповіщення, удосконалення механізмів оновлення геоданих у режимі реального часу та масштабування системи для широкого впровадження у практику кризового планування.

Список використаних джерел

1. Lu D., Weng Q. Spatiotemporal Analysis of Urban Growth. *GIScience & Remote Sensing.* 2020. Vol. 57, No. 5. P. 599–616.

2. Saraf M. H. M., Suhaili W. S. H., Yusof M. M. GIS-Based Emergency Response Management. *ISPRS International Journal of Geo-Information*. 2021. Vol. 10, No. 4. Article 221.

3. Yalpir S., Kucukali S. GIS-based shelter allocation during crisis. *Sustainable Cities and Society*. 2022. Vol. 78. Article 103643.

4. Yang J. P., Liu Y. H. Urban Navigation in Crisis: GIS Application. *Journal of Transport Geography*. 2019. Vol. 76. P. 85–94.

5. Ayedun C.A., Akinyemi O.J. Crisis Mapping with OpenStreetMap. *Journal of Urban Technology*. 2021. Vol. 28, No. 2. P. 3–19.

6. Taha M. M., Harb A. M. Urban Evacuation Routing with GIS. *Alexandria Engineering Journal*. 2020. Vol. 59, No. 6. P. 4571–4580.

7. Губар Ю.В. ГІС для управління міською інфраструктурою. *Геоінформатика*. 2020. № 2. С. 33–41.

8. Лященко А. С. Геоінформаційні моделі безпеки міста. *Вісник Київського національного університету будівництва і архітектури*. 2022. № 11. С. 71–76.

9. Воронова В. І. ГІС в кризовому управлінні містом. *Проблеми сучасної геодезії.* 2021. № 3. С. 91–96.

10. Степаненко П. Г. Цифрові карти укриттів міста. Харків: Вид-во ХНУМГ, 2023. 76 с.

11. OpenStreetMap: офіційний сайт. URL: https://www.openstreetmap.org/.

12. Харківська міська рада. Реєстр укриттів. URL: https://city.kharkov.ua/.

13. Державна служба України з надзвичайних ситуацій. Портал захисних споруд. URL: https://dsns.gov.ua/.

14. QGIS Documentation. URL: https://qgis.org/.

15. Nominatim: OpenStreetMap Search API. URL: https://nominatim.openstreetmap.org/.

16. RoadGraph plugin for QGIS. URL: https://plugins.qgis.org/plugins/roadgraph/.

17. FEMA. Emergency Management and Evacuation Maps. URL: https://www.fema.gov/.

18. Disaster Prevention GIS, Japan. URL: https://www.gsi.go.jp/.

19. Alert4All Project, EU. URL: https://alert4all.eu/.

Коростельов Євген Миколайович, кандидат технічних наук, доцент кафедри вишукувань та проектування шляхів сполучення, геодезії та землеустрою, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0002-9589-8196. Тел.: +38 (099) 78-59-524. E-mail: korostelov@kart.edu.ua.
Коваленко Любов Миколаївна, кандидат педагогічних наук, доцент кафедри управління земельними ресурсами, геодезії та кадастру, Державний біотехнологічний університет. ORCID iD: 0000-0002-7955-2056. Тел.: +38 (099) 78-59-524. E-mail: klm180248@btu.kharkov.ua.

Korostelov Ye., PhD (Tech.), Associate Professor at the Department of Surveying and Design of Transport Routes, Geodesy and Land Management, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0002-9589-8196. Tel.: +38 (099) 78-59-524. E-mail: korostelov@kart.edu.ua.
Kovalenko L., PhD (Pedagogy), Associate Professor at the Department of Land Resources Management, Geodesy and Cadastre, State Biotechnological University. ORCID iD: 0000-0002-7955-2056. Tel.: +38 (099) 78-59-524. E-mail: klm180248@btu.kharkov.ua.

Статтю прийнято 27.06.2025 р.

УДК 528.4:332.3

ЗАСТОСУВАННЯ РЕГРЕСІЙНОГО АНАЛІЗУ ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ ОСНОВНИХ ЧИННИКІВ ЗЕМЛЕКОРИСТУВАННЯ В ЖИТЛОВІЙ І ГРОМАДСЬКІЙ ЗАБУДОВІ РЕГІОНІВ

Канд. екон. наук В. В. Гой, канд. пед. наук А. М. Крохмаль, асп. В. В. Харів

APPLICATION OF REGRESSION ANALYSIS TO IDENTIFY KEY FACTORS OF LAND USE IN RESIDENTIAL AND PUBLIC DEVELOPMENT OF REGIONS

PhD (Econ.) V. Goi, PhD (Pedagogy) A. Krokhmal, postgraduate student V. Khariv

DOI: https://doi.org/10.18664/1994-7852.212.2025.336645

Анотація. *У статті вирішено актуальне завдання відносно встановлення причинно-наслідкових зв'язків між чинниками землекористування в житловій і громадській забудові регіонів із застосуванням методів регресійного аналізу. Предметом дослідження є визначення впливу просторових, функціональних, містобудівних, екологічних чинників на узагальнюючий критерій рівня розроблення і реалізації геопросторового моніторингу землекористування в житловій і громадській забудові. Це дало змогу побудувати кількісну основу для ухвалення обґрунтованих рішень підвищення ефективності використання земель житлової та громадської забудови завдяки застосуванню технології геопросторового моніторингу. У роботі застосовані методи регресійного аналізу, визначення критеріїв адекватності математичних моделей. Для розроблення реалізації технології геопросторового моніторингу рекомендовано застосовувати сучасні геоінформаційні системи.*

Ключові слова: *землекористування, житлова забудова, громадська забудова, чинники впливу, регресійний аналіз, математичне моделювання, геопросторовий моніторинг, геоінформаційні системи.*

Abstract. *The article solves an urgent task regarding the establishment of cause and effect relationships between land use in residential and public development of regions using methods of using regression analysis methods. The subject of the study is to determine the impact of spatial, functional, urban planning, environmental factors on the general criterion of the level of development and implementation of geospatial monitoring of land use in residential and public development. This made it possible to build a quantitative basis for making sound solutions to improve the efficiency of use of residential and public land by applying geospatial monitoring technology. The work uses methods of regression analysis, determination of the criteria of adequacy of mathematical models. Modern geoinformation systems are proposed to be used for the development and implementation of geospatial monitoring technology.*

It is necessary to test mathematical models on these specific regions and it is established that the growth of spatial, functional, urban planning, environmental factors leads to an increase in the level of efficiency of formation and implementation of geospatial monitoring, the use of residential and public development at the regional level and vice versa. Moreover, the creation and use of spatial, functional and urban planning support for existing extraordinary conditions in the field of use of land and public development lands. In addition, the conditions related to environmental safety and the implementation of the relevant areas at the regional level are worsening.

The use of regression analysis as a modern tool for establishing cause and effect relationships between factors has made it possible to create a basis for the development of organizational and spatial mechanism of improving the efficiency of use of residential and public development.

Keywords: *land use, residential development, public development, factors of influence, regression analysis, mathematical modeling, geospatial monitoring, geoinformation systems.*

Вступ. Сучасні системи використання земель житлової та громадської забудови на регіональному рівні потребують застосування інструментарію, який дає змогу формувати кількісну основу та моделювати процеси землекористування, що визначені зниженням ефективності використання земель на регіональному рівні, розбалансуванням регіональних і стейкхолдерних зв'язків, уповільненням основних показників будівельної сфери, зниженням просторового, містобудівного забезпечення, зростанням екологічних проблем, скороченням рівня інвестиційної привабливості земельних ресурсів.

Для забезпечення використання земель житлової та громадської забудови сформовано та застосовано нормативно-правове забезпечення. Проте залишаються невирішеними питання визначення можливостей застосування сучасного інструментарію для моделювання та ухвалення рішень у сфері землекористування житлової та громадської забудови на регіональному рівні.

Виникають певні протиріччя щодо рівня професійної підготовки стейкхолдерів для здійснення регресійного аналізу чинників використання земель житлової та громадської забудови регіонів. Це впливає на рівень інформаційно-аналітичного забезпечення землекористування.

Отже, тема дослідження відносно встановлення причинно-наслідкових зв'язків між чинниками землекористування в житловій і громадській забудові регіонів із застосуванням методів регресійного аналізу є актуальною.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Процеси здійснення математичного моделювання, особливостей його застосування кваліфікують як наукові розробки. Зокрема, у деяких роботах охарактеризовано методи і моделі математичного моделювання [1, 2]. Визначено напрями та особливості здійснення математичного моделювання, які дають змогу сформувати кількісну основу в різних сферах діяльності [3–7]. Напрями та особливості застосування математичних методів і моделей у системі використання земель визначено в роботах [8–10].

Запропоновано напрями здійснення математичного моделювання чинників формування та реалізації геопросторового моніторингу використання земель житлової та громадської забудови на регіональному рівні:

– формування інформаційно-аналітичного забезпечення для математичного моделювання;

– визначення коефіцієнтів детермінації впливу чинників на інтегральний критерій;

– розроблення математичної моделі;

– визначення критеріїв адекватності математичної моделі;

– інтерпретація отриманих результатів.

Проте на недостатньому рівні сформована кількісна основа для ухвалення рішень у системі землекористування в житловій і громадській забудові на регіональному рівні із застосуванням регресійного аналізу. Залишаються невирішеними питання розроблення і впровадження геопросторового моніторингу використання земель у сфері житлової та громадської забудови, який базований на результатах регресійного аналізу і можливостях застосування геоінформаційних систем. У контексті визначення напрямів та особливостей

розроблення і реалізації моніторингу використання земель заслуговують на увагу розробки Ю. Радзінської, С. Нестеренка, К. Мамонова, І. Кондратюка [11–13].

Для використання моніторингу земель застосовують інструментарій геоінформаційних систем, результати імплементації якого визначені в роботах [14–16].

Визначення мети та завдання дослідження. Метою дослідження є встановлення причинно-наслідкових зв'язків між чинниками землекористування в житловій і громадській забудові регіонів із застосуванням методів регресійного аналізу. Для досягнення поставленої мети вирішують такі завдання:

– розробити математичні моделі впливу просторових, функціональних, містобудівних, екологічних чинників на інтегральний показник формування та реалізації геопросторового моніторингу використання земель житлової та громадської забудови на регіональному рівні;

– визначити критерії адекватності розроблених математичних моделей;

– провести апробацію математичних моделей на даних конкретних регіонів.

Основна частина дослідження. Причинно-наслідкові зв'язки між чинниками формування та реалізації геопросторового моніторингу використання земель житлової та громадської забудови на регіональному рівні встановлюють на основі застосування інструментарію регресійного аналізу і методів математичного моделювання, які подані в розробках К. Мамонова, В. Гоя, К. Метешкіна [8, 17]. Для отримання результатів аналізу застосовано програмний комплекс Statistica.

За результатами наведеного аналізу визначено високий рівень впливу просторових, функціональних, містобудівних, екологічних чинників на інтегральний показник формування та реалізації геопросторового моніторингу використання земель житлової та громадської забудови на регіональному рівні:

- для просторових чинників

$$D = 0{,}917;$$

- функціональних чинників

$$D = 0{,}891;$$

- містобудівних чинників

$$D = 0{,}962;$$

- екологічних чинників

$$D = 0{,}756.$$

Побудовано математичні моделі:

$$I_{GML} = 0{,}558 * I_{GML11} + 1{,}054; \quad (1)$$

$$I_{GML} = 0{,}611 * I_{GML12} + 1{,}175; \quad (2)$$

$$I_{GML} = 0{,}849 * I_{GML13} + 0{,}301; \quad (3)$$

$$I_{GML} = 2{,}506 * I_{GML14} - 3{,}884. \quad (4)$$

Визначено критерії адекватності математичних моделей впливу просторових, функціональних, містобудівних, екологічних чинників на інтегральний показник формування та реалізації геопросторового моніторингу використання земель житлової та громадської забудови на регіональному рівні, зокрема фактичні t-критерії Стьюдента і нормативні значення (табл. 1).

Отже, виконана умова, що підтверджує достовірність встановлених зв'язків чинників формування та реалізації геопросторового моніторингу використання земель житлової та громадської забудови на регіональному рівні:

- модель (1):

$$t_1 = 9{,}744 > t_0 = 2{,}074;$$

$$t_2 = 15{,}607 > t_0 = 2{,}074;$$

- модель (2):

$$t_1 = 10{,}04 > t_0 = 2{,}074;$$

$$t_2 = 13{,}415 > t_0 = 2{,}074;$$

- модель (3):

$$t_1 = 2{,}922 > t_0 = 2{,}074;$$

$$t_2 = 23{,}585 > t_0 = 2{,}074;$$

- модель (4):

$$t_1 = 4{,}855 > t_0 = 2{,}074;$$

$$t_2 = 8{,}25 > t_0 = 2{,}074.$$

Слід зазначити, що фактичне значення визначали для порівняння за модулем.

Перевірку математичних моделей за суттєвістю встановлених зв'язків за F-критерієм Фішера подано в табл. 2.

Таблиця 1

Перевірка математичних моделей за t-критерієм Стьюдента, відн. од.

Параметр математичної моделі	Фактичне значення	Нормативне значення	Відповідність умови адекватності (+), невідповідність (-)
Модель (1)			
Постійний параметр	9,744	2,074	+
Чинник I_{GML11}	15,607		+
Модель (2)			
Постійний параметр	10,04	2,074	+
Чинник I_{GML12}	13,415		+
Модель (3)			
Постійний параметр	2,922	2,074	+
Чинник I_{GML13}	23,585		+
Модель (4)			
Постійний параметр	-4,855	2,074	+
Чинник I_{GML14}	8,25		+

Таблиця 2

Перевірка математичних моделей за суттєвістю встановлених зв'язків за F-критерієм Фішера, відн. од.

Математична модель	Фактичне значення	Нормативне значення	Відповідність умови адекватності (+), невідповідність (-)
модель (1)	243,58	4,3	+
модель (2)	179,97	4,3	+
модель (3)	556,28	4,3	+
модель (4)	68,058	4,3	+

Відповідність умови адекватності математичних моделей така:

- модель (1):

$$F_1 = 243{,}58 > F_0 = 4{,}3;$$

- модель (2):

$$F_1 = 179{,}97 > F_0 = 4{,}3;$$

- модель (3):

$$F_1 = 556{,}28 > F_0 = 4{,}3;$$

- модель (4):

$$F_1 = 68{,}058 > F_0 = 4{,}3.$$

Отже, визначена суттєвість встановлених причинно-наслідкових зв'язків між чинниками формування та реалізації геопросторового моніторингу використання земель житлової та громадської забудови на регіональному рівні.

Значення критеріїв Дарбіна-Уотсона (d) для перевірки залишків моделі на автокореляцію залишків подано в табл. 3.

Таблиця 3

Значення критеріїв Дарбіна-Уотсона для перевірки залишків моделі на автокореляцію залишків, відн. од.

Математична модель	Фактичне значення	Нормативне найбільше значення у проміжку значень критерію Дарбіна-Уотсона	Відповідність умови адекватності (+), невідповідність (-)
модель (1)	2,455	1,45	+
модель (2)	1,994	1,45	+
модель (3)	2,332	1,45	+
модель (4)	1,955	1,45	+

Визначено умови адекватності математичних моделей за критерієм Дарбіна – Уотсона:

- модель (1):

$$d_1 = 2{,}455 > d_0 = 1{,}45;$$

- модель (2):

$$d_1 = 1{,}994 > d_0 = 1{,}45;$$

- модель (3):

$$d_1 = 2{,}332 > d_0 = 1{,}45;$$

- модель (4):

$$d_1 = 1{,}955 > d_0 = 1{,}45.$$

Значення критерію Спірмена (S) для перевірки щодо однорідності розподілу вибірки даних подано в табл. 4.

Виконана умова однорідності вибірки даних відповідно до математичних моделей:

- модель (1):

$$S = 0{,}799 < t_0 = 2{,}074;$$

- модель (2):

$$S = 0{,}969 < t_0 = 2{,}074;$$

- модель (3):

$$S = 0{,}855 < t_0 = 2{,}074;$$

- модель (4):

$$S = 0{,}506 < t_0 = 2{,}074.$$

Таблиця 4

Значення критерію Спірмена для перевірки щодо однорідності розподілу вибірки даних, відн. од.

Математична модель	Фактичне значення	Нормативне значення критерію Стьюдента	Відповідність умови адекватності (+), невідповідність (-)
модель (1)	0,799	2,074	+
модель (2)	0,969	2,074	+
модель (3)	0,855	2,074	+
модель (4)	0,506	2,074	+

Висновки. Встановлено причинно-наслідкові зв'язки між чинниками землекористування в житловій і громадській забудові регіонів із застосуванням методів регресійного аналізу, що, на відміну від інших, дало змогу побудувати математичні моделі впливу просторових, функціональних, містобудівних, екологічних чинників на інтегральний показник розроблення і застосування геопросторового моніторингу для моделювання прогнозних змін у майбутніх періодах, сформувати кількісну основу ухвалення рішень у сфері використання земель житлової та громадської забудови.

Для підтвердження достовірності і повності встановлених зв'язків визначено критерії, що підтвердили адекватність розроблених математичних моделей.

Проведено апробацію математичних моделей на даних конкретних регіонів і встановлено, що зростання просторових, функціональних, містобудівних, екологічних чинників призводить до збільшення рівня ефективності формування й реалізації геопросторового моніторингу, використання земель житлової та громадської забудови на регіональному рівні і навпаки. Причому про «пристосування» до сучасних надзвичайних умов у сфері використання земель житлової та громадської забудови свідчить створення й застосування просторового, функціонального і містобудівного забезпечення. Разом із цим погіршуються умови, пов'язані з екологічною безпекою та реалізацією відповідних напрямів на регіональному рівні.

Список використаних джерел

1. Лавров Є. А., Перхун Л. П., Шендрик В. В. Математичні методи дослідження операцій. Суми: Сумський державний університет, 2017. 212 с.

2. Гусак Л. П., Гулівата І. О. Математичне моделювання як засіб здійснення професійної спрямованості навчання математики на економічних спеціальностях ВНЗ. *Науковий вісник Ужгородського університету*. 2016. Вип. 1(38). С. 105–107.

3. Іващук О. Т. Економетричні методи та моделі: навч. посіб. Тернопіль: ТАНГ «Економічна думка», 2002. 348 с.

4. Іващук О. Т. Кількісні методи та моделі фінансового прогнозування: навч. посіб. Тернопіль: ТАНГ «Економічна думка», 2004. 262 с.

5. Грабовецький Б. Є. Планування та економічне прогнозування: навч. посіб. Вінниця: ВНТУ, 2013. 66 с.

6. Лисогор В. М., Яремко С. А., Ольшевська О. В. Застосування методів прогнозування в процесі моделювання економічної діяльності підприємства. *Вісник Хмельницького національного університету*. 2011. № 2. Т. 1. С. 21–25.

7. Вітлінський В. В., Піскунова О. В. Моделювання та управління розвитком малого підприємництва. *Вчені записки*. 2012. Вип. 14. Ч. 1. С. 261–268.

8. Мамонов К. А., Метешкін К. О., Гой В. В., В'яткін Р. С. Математичне моделювання чинників, що впливають на функціонування складних систем територіального розвитку використання земель регіонів. *Комунальне господарство міст*. 2024. Т. 6. Вип. 187. С. 180–184. URL: https://khg.kname.edu.ua/index.php/khg/article/view/6404/632.

9. Математичне моделювання показників геопросторового розвитку територіальних громад / К. А. Мамонов, М. О. Пілічева, В. О. Фролов та ін. *Український журнал прикладної економіки та техніки*. 2024. Т. 9. № 3. С. 287–292. DOI: https://doi.org/10.36887/2415-8453-2024-3-50.

10. Мамонов К. А., В'яткін Р. С., Штерндок Е. С., Штерндок А. В. Математичне моделювання чинників використання земель об'єктів природно-заповідного фонду регіонів. *Комунальне господарство міст*. 2024. Т. 1. Вип. 182. С. 132–136. DOI: https://doi.org/10.33042/2522-1809-2024-1-182-132-136.

11. Нестеренко С. Г., Радзінська Ю. Б., Євдокімов А. А., Штерндок Е. С. Сучасні аспекти методичного забезпечення геодезичного моніторингу об'єктів та територій. *Комунальне господарство міст*. 2024. Т. 6. Вип. 187. С. 199–203. DOI: https://doi.org/10.33042/2522-1809-2024-6-187-199-203.

12. Мамонов К. А., Пілічева М. О., Штерндок Е. С., Фролов В. О. Особливості формування геоінформаційних моніторингових систем використання земель територіальних громад на регіональному рівні. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*. 2024. Вип. 115. Ч. 2. С. 207–213. DOI: https://doi.org/10.33744/0365-8171-2024-115.2-207-213.

13. Нестеренко С. Г., Радзінська Ю. Б., Кондратюк І. В., Халіков С. А. Інструментальні методи моніторингу земель міст. *Комунальне господарство міст*. 2023. Т. 3. Вип. 177. С. 98–103. DOI: https://doi.org/10.33042/2522-1809-2023-3-177-98-103.

14. Mamonov K., Viatkin R., Frolov V. Land use monitoring of the regions: geoinformation aspects. *Комунальне господарство міст*. 2023. Т. 6. Вип. 180. С. 98–102. DOI: https://doi.org/10.33042/2522-1809-2023-6-180-98-102.

15. Мамонов К. А., Кондращенко О. В., Метешкін К. О., Нестеренко С. Г. Містобудівне забезпечення розробки геоінформаційних моніторингових карт використання нерухомості регіонів. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*. 2024. Вип. 115. Ч. 2. С. 190–198. URL: http://publications.ntu.edu.ua/avtodorogi_i_stroitelstvo/115.2/190.pdf.

16. Мамонов К., Гой В., Штерндок А. Геопросторовий моніторинг використання земель об'єднаних територіальних громад. *Технічні науки та технології*. 2024. № 1(35). С. 311–318. DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2024-1(35)-311-318.

17. Мамонов К. А., Гой В. В., Вяткін Р. С., Тіщенко А. Г. Математичне моделювання як інструментарій, що застосовується для аналізу ринку нерухомості. *Комунальне господарство міст*. 2025. Т. 1. Вип. 189. С. 296–300. URL: https://khg.kname.edu.ua/index.php/khg/article/view/6480/6400.

Гой Василь Васильович, кандидат економічних наук, докторант кафедри економіки та маркетингу, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова. ORCID iD: 0000-0003-1822-4478.
Тел.: +38(099)033-30-22. E-mail: vasssgoi@gmail.com.
Крохмаль Алла Миколаївна, кандидат педагогічних наук, доцент, доцент кафедри іноземних мов, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова. ID ORCID: 0000-0002-9490-489X.
E-mail: alla.krokhmal@kname.edu.ua.

Харів Владислав Вікторович, аспірант кафедри земельного адміністрування та геоінформаційних систем, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова. ORCID iD: 0009-0006-7937-5324. E-mail: v.khariv@ukr.net.

Goi Vasyl, PhD (Econ.), Doctoral Candidate at the Department of Economics and Marketing, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. ORCID iD: 0000-0003-1822-4478. Tel.: +38(099)033-30-22. E-mail: vasssgoi@gmail.com.
Alla Krokhmal, PhD (Pedagogy), Associate Professor (foreign languages), O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. ID ORCID: 0000-0002-9490-489X. E-mail: alla.krokhmal@kname.edu.ua.
Khariv Vladyslav, postgraduate student of the department of Land Administration and Geographic Information Systems, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. ORCID iD: 0009-0006-7937-5324. E-mail: v.khariv@ukr.net.

Статтю прийнято 30.06.2025 р.

УДК 711.14:528.9:004.9

ЦИФРОВА ТРАНСФОРМАЦІЯ СИСТЕМИ ЗЕМЛЕУСТРОЮ: АВТОМАТИЗАЦІЯ УПРАВЛІНСЬКИХ ПРОЦЕСІВ У СФЕРІ ВИКОРИСТАННЯ ТА ОХОРОНИ ЗЕМЕЛЬНИХ РЕСУРСІВ

Кандидати екон. наук О. І. Ступень, Н. І. Прокопенко,
д-р геогр. наук С. М. Шевчук

DIGITAL TRANSFORMATION OF THE LAND MANAGEMENT SYSTEM: AUTOMATION OF MANAGEMENT PROCESSES IN THE FIELD OF LAND USE AND PROTECTION

Cand. Sc. (Econ.) O. Stupen, Cand. Sc. (Econ.) N. Prokopenko,
Dr. Sc. (Geogr.) S. Shevchuk

DOI: https://doi.org/10.18664/1994-7852.212.2025.336296

Анотація. *У статті досліджено сучасні підходи щодо автоматизації землеустрою за допомогою цифрових технологій. Розглянуто використання ГІС, ДЗЗ та інших інструментів для підвищення ефективності управління земельними ресурсами. Встановлено, що цифровізація процесів землеустрою є основним фактором підвищення ефективності управління земельними ресурсами, зменшення бюрократичних перешкод і забезпечення прозорості земельних відносин. Визначено переваги та виклики цифровізації, а також перспективні напрями розвитку цифрових технологій в Україні.*

Ключові слова: *автоматизація управління земельними ресурсами, цифрові технології, геоінформаційні системи, дистанційне зондування, управління земельними ресурсами, цифровізація, земельні відносини, кадастр, моніторинг земель.*

Abstract. *The article explores modern approaches to land management automation through digital technologies. The main trends in the use of Geographic Information Systems (GIS), remote sensing (RS), and other innovative tools—such as blockchain and web technologies—are considered in terms of enhancing the efficiency of land resource management. Special attention is given to the challenges and prospects of digital transformation in this field, including legal and regulatory*

frameworks, infrastructure limitations, and workforce training needs. It is established that the digitalization of land management processes is a key factor in improving the efficiency of land resource governance, reducing bureaucratic barriers, and ensuring transparency in land relations. The main benefits of implementing digital technologies in land management practices are identified. These include the creation of accurate digital cadastral maps, land use scenario modeling, real-time land parcel change monitoring, data compatibility between agencies, optimization of land rights registration procedures, and improved citizen access to land information via electronic services. The article analyzes major challenges accompanying the digitalization process, such as insufficient infrastructure for processing large volumes of data, fragmented legal regulations governing land relations, the need to develop new data exchange standards, a shortage of next-generation professionals with advanced digital competencies in land management, and significant financial costs for implementing and maintaining modern technologies. Promising directions for the development of digital technologies to improve land resource management in Ukraine are substantiated. Emphasis is placed on the importance of integrating various digital platforms into a unified Open Data system, developing artificial intelligence methods for automated spatial data analysis and detection of land law violations, and enhancing international cooperation to share best practices and attract investment in digital land management technologies.

***Keywords**: land management automation, digital technologies, Geographic Information Systems, remote sensing, land resource management, digitalization, land relations, cadastre, land monitoring.*

Вступ. Сучасні тенденції розвитку земельних відносин засвідчують стрімке впровадження цифрових технологій у практику управління земельними ресурсами. Автоматизація процесів землеустрою стає одним із основних факторів підвищення ефективності земельного адміністрування. Особливу роль у цьому процесі відіграють геоінформаційні системи (ГІС), що забезпечують інтеграцію просторових даних у єдині аналітичні платформи. Використання технологій дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) для моніторингу змін земельного покриву дає змогу оперативно виявляти порушення у сфері землекористування та оцінювати стан земельних ресурсів [1]. Крім того, останніми роками активно впроваджують блокчейн-технологію в системи реєстрації прав власності на землю. Водночас процес цифровізації землеустрою супроводжений низкою викликів, зокрема проблемами стандартизації даних, інтеграції різних інформаційних платформ, захисту персональних даних і забезпечення цифрової інклюзії населення [2]. В Україні цифровізація процесів землеустрою пов'язана з реформами ринку землі та розвитком національної інфраструктури геопросторових даних (НІГД) відповідно до Закону України «Про національну інфраструктуру геопросторових даних» [3]. Проте повноцінне застосування цифрових технологій потребує не лише технічної модернізації, але й інституційних змін, зокрема гармонізації національного законодавства з європейськими стандартами INSPIRE.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасна наукова спільнота активно досліджує питання автоматизації процесів землеустрою та управління земельними ресурсами. Так, розглянуто [4, 5] принципи цифрової трансформації в галузі геодезії та землеустрою, зазначено про необхідність інтеграції сучасних інформаційних технологій у геодезичну та земельно-кадастрову діяльність із визначенням основних етапів впровадження цифрових рішень у цій сфері [4]. Дослідження науковців Західноукраїнського національного університету присвячені застосуванню новітніх інформаційно-цифрових технологій в управлінні

земельними ресурсами сільськогосподарських підприємств. У своїй роботі автори аналізують можливості використання ГІС-систем, електронних кадастрів і дистанційного зондування для оптимізації землекористування та підвищення економічної ефективності аграрного виробництва [6].

У контексті реформ місцевого самоврядування важливою є наукова праця Б. Пушкара та І. Рудакевича [7], де вивчено інноваційні підходи щодо управління земельними ресурсами в умовах децентралізації. Учені наголошують на важливості розроблення місцевих геоінформаційних платформ для ефективного адміністрування земель на територіях об'єднаних громад [7]. Оптимізовані підходи щодо державного регулювання земельних ресурсів із використанням ГІС-технологій розглядають І. Кравчук і П. Топольницький [8]. Вони стверджують, що інтеграція просторових даних у державне управління дає змогу підвищити прозорість, зменшити корупційні ризики та покращити якість планування територій.

Питання впровадження електронних послуг у сфері агропродовольчого комплексу України в контексті електронної реєстрації земельних ділянок, видачі дозвільних документів і можливостей цифровізації державних сервісів вивчала Н. Панасенко [9]. Дослідження [10] зосереджене на можливостях відображення природних і антропогенних процесів через картографічні зображення і топографо-геодезичні вимірювання. У роботі підкреслено значення високоточної просторової інформації для підтримки процесів землеустрою та просторового планування. Окрему увагу приділено питанням кадастрових систем і землеустрою в містобудівному проєктуванні в наукових доробках В. Чувпила та інших. Науковці аналізують сучасні підходи для оптимізації землекористування та інтеграції земельно-кадастрової інформації в міське планування [11].

Отже, аналіз сучасної літератури свідчить про різноплановий і комплексний підхід щодо проблем цифровізації землеустрою, у якому поєднано технічні, організаційні та правові аспекти. Це створює базу для подальших досліджень щодо вдосконалення цифрових інструментів управління земельними ресурсами.

Визначення мети та завдання дослідження. Метою дослідження є аналіз сучасних підходів для автоматизації процесів землеустрою через впровадження цифрових технологій, оцінювання основних тенденцій у використанні геоінформаційних систем, дистанційного зондування Землі та інших інноваційних інструментів для підвищення ефективності управління земельними ресурсами, а також визначення викликів і перспектив цифрової трансформації у цій сфері.

Для досягнення поставленої мети у статті передбачено виконати такі завдання: охарактеризувати основні цифрові технології, що використовують у сфері землеустрою та управління земельними ресурсами (ГІС, ДЗЗ, блокчейн тощо); визначити переваги впровадження цифрових технологій у практику землевпорядної діяльності; дослідити основні проблеми та виклики, що виникають у процесі цифровізації землеустрою; сформулювати перспективні напрями розвитку цифрових технологій для удосконалення управління земельними ресурсами в Україні.

Виклад основного матеріалу дослідження. У сфері управління земельними ресурсами України головну роль відіграє державне регулювання земельних відносин. Цей процес реалізують через низку механізмів, включаючи нормативно-правове забезпечення, контроль за дотриманням вимог земельного законодавства, систематичний моніторинг використання та охорони земель, а також застосування інструментів юридичної відповідальності до суб'єктів, які порушують встановлений правопорядок.

Ефективне здійснення державного управління та регулювання у земельній сфері потребує детального аналізу характеристик земельного фонду та динаміки його використання. Управлінські процеси ґрунтовані на постійному інформаційному потоці, джерелами якого є землеустрій, земельний кадастр і моніторинг земель. Перехід на цифрові методи управління земельними ресурсами відбувається під впливом багатьох важливих факторів (табл. 1) [12].

Таблиця 1

Узагальнення факторів впливу на розвиток цифровізації системи управління земельними ресурсами

Фактор	Опис	Застосування	Приклад
Техноло-гічний	Сучасні геодезичні технології: глобальна система позиціонування (GPS), геоінформаційні системи (ГІС) тощо	Забезпечення якісного та продуктивного обліку земельних ресурсів	Уникнути помилок, зменшити витрати і підвищити продуктивність управлінських процесів
Інституційна якість	Наявність точних і доступних даних про земельні ділянки	Забезпечення відкритості процесів та протидії корупції	Мінімізація корупційних можливостей і неправомірних дій у земельній сфері для справедливого розподілу ресурсів
Інтегроване управління земельними ресурсами	Сучасні технології створення детальних цифрових карт і моделей земельних ресурсів	Просторове планування та управління земельними активами міських і сільських територій	Вибирати найбільш сприятливі землі для будівництва, сільськогосподарської діяльності, заповідних територій тощо
Моніторинг та охорона довкілля	Сучасні технології моніторингу довкілля: геоінформаційні системи (ГІС), дистанційне зондування Землі (ДЗЗ)	Спостереження за станом довкілля та його збереження	Виявлення екологічних проблем і вжиття необхідних заходів для їх розв’язання
Гарантії майнових прав	Сучасні кадастрові системи, процес реєстрації земельних ділянок і власників	Правове забезпечення прав власності	Захист прав власників і запобігання конфліктам
Технічний	Сучасні геодезичні прилади та програмне забезпечення	Оптимізація процесів	Швидке виконання комплексу геодезичних і проєктних робіт для ухвалення рішень з управління й розвитку земель
Інноваційний	Інноваційні технології: штучний інтелект, блокчейн-технології тощо	Впровадження інновацій у сфері землеустрою та кадастру	Аналіз даних, гарантія безпеки та прозорості даних

Різні види адміністративних завдань вирішують державне, місцеве і внутрішньогосподарське управління земельними ресурсами. Складовими державного управління є загальне та відомче (галузеве). Загальне державне управління має територіальний (регіональний) характер, здійснюване державними органами загальної і спеціальної компетенцій. Його дія поширена на всі земельні ресурси в межах конкретної території (України, області, адміністративного району, міста), незалежно від їхньої класифікації та суб'єктів земельних прав. Відповідно впровадження цифрових технологій у практику загального управління земельними ресурсами дає змогу забезпечити відкритість, прозорість, доступність та обґрунтованість рішень, що ухвалюють органи державної влади.

Одним з основних інструментів цифровізації в цій сфері є Національна кадастрова система – електронна база даних про всі земельні ділянки, що включає інформацію про межі, форму власності, цільове призначення та правовий статус земель. Основні функції кадастрової системи [8, 10, 11]:

- облік земельних ділянок – фіксація точних меж, площі, форми власності та цільового призначення кожної земельної ділянки;

- забезпечення публічності – доступ до кадастрової інформації через Публічну кадастрову карту, яка дає змогу громадянам, органам місцевого самоврядування та інвесторам перевіряти правовий статус землі, уникаючи шахрайства або подвійної реєстрації;

- інтеграція з іншими державними реєстрами – об'єднання даних із Державним реєстром речових прав на нерухоме майно, містобудівним кадастром, реєстром водних чи лісових ресурсів сприяє ухваленню зважених управлінських рішень;

- підтримка електронних послуг – кадастрова система забезпечує базу для надання послуг онлайн: реєстрації земельної ділянки, подання заяв на зміну цільового призначення, отримання витягів тощо.

Публічна кадастрова карта України – це офіційний онлайн-ресурс, який надає інформацію про земельні ділянки на території України. Інформація на Публічній кадастровій карті, основою якої є карта масштабу 1:100000 та ортофотоплан, подана у вигляді різних шарів. На сьогодні шари об’єднані у п’ять груп – базові шари, земельний кадастр, кордони, межі, ЦНАП, аналітичні шари, інші кадастри (НІГД), як показано на рисунку.

Завдяки інформаційному наповненню електронної карти можливий всебічний аналіз використання земельних ресурсів, результати якого дають змогу ухвалювати обґрунтовані управлінські рішення для раціонального використання земель. До основних технологічних особливостей Національної кадастрової системи можна віднести [11]:

- геоінформаційну платформу (ГІС), що дає змогу візуалізувати дані на інтерактивній карті, аналізувати території, відслідковувати зміни в землекористуванні;

- електронні сервіси – це кадастрові послуги, значна частина яких із 2020 року доступна через портал Дія або електронний кабінет користувача Держгеокадастру;

- цифрова інтеграція з об’єднаними територіальними громадами (ОТГ) – це отримання доступу ОТГ до кадастрової бази даних для ефективного управління місцевими землями та проведення інвентаризаційних робіт.

Управління землями за відомчою (галузевою) ознакою здійснюють міністерства, комітети і служби на основі підпорядкування відповідних підприємств та організацій, незалежно від того, де розташовані ці землі. Створена Національна інфраструктура геопросторових даних в Україні передбачає об'єднання інформаційних баз даних міністерств, відомств і територій на основі земельного

кадастру з прив'язкою до цифрової карти і державної системи координат, що дає змогу державі впливати на інтереси різних учасників земельних відносин із метою організації раціонального використання земельних ресурсів і їх охорони [5].

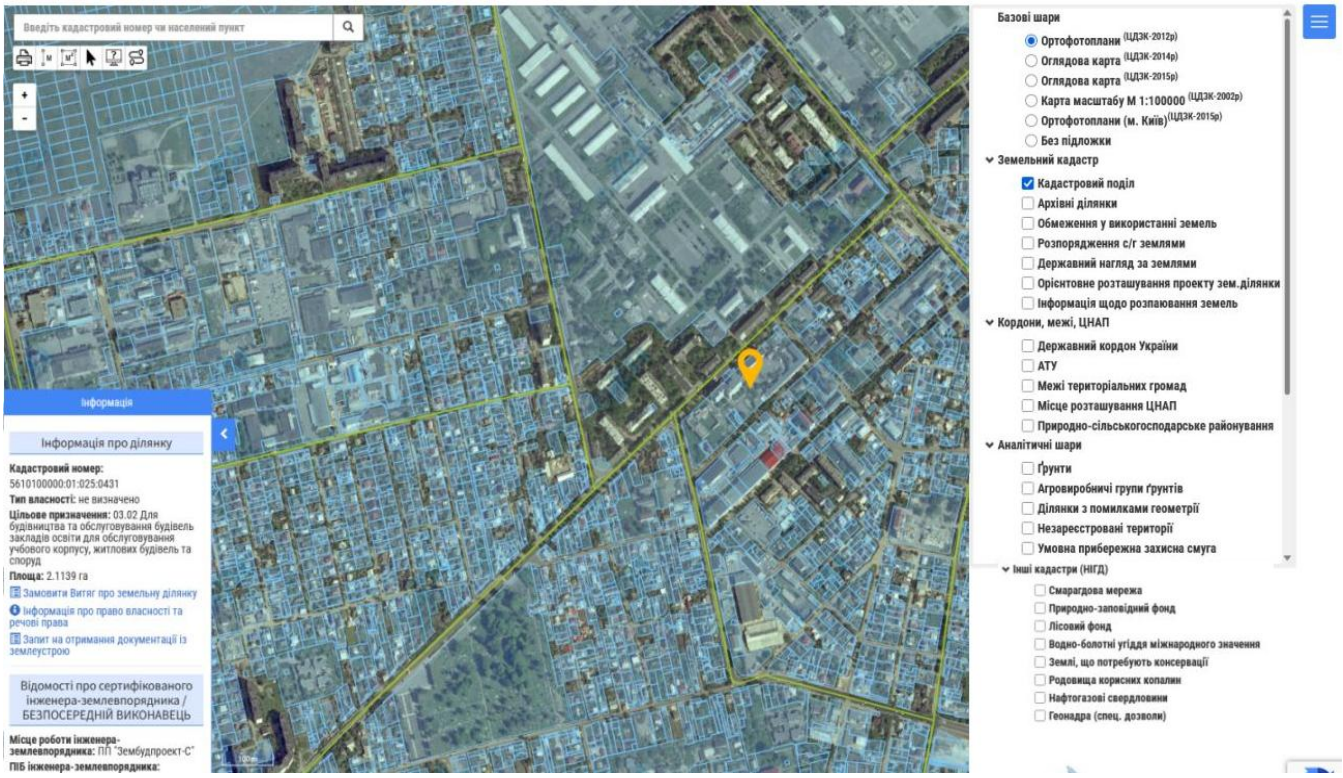


Рис. Викопіювання з Публічної кадастрової карти України

Цифровізація землеустрою та місцевого управління, що належить до компетенції органів місцевого самоврядування, переважно спирається на ГІС, який є одним з основних інструментів і може мати загальний або спеціальний характер. Земельне законодавство України запровадило нову форму регулювання земельних відносин – комплексний план просторового розвитку території об’єднаної територіальної громади, який включає планувальні рішення щодо перспективного використання всієї території територіальної громади та потребує оновлених картографічних матеріалів у нових цифрових форматах. Для цієї роботи найбільше застосування набули геоінформаційні технології, дистанційне зондування Землі, GPS-технології та WEB-технології [7].

Загалом геоінформаційні системи являють собою інструментарій для аналізу та опрацювання просторових даних, що мають чітку прив'язку до конкретних ділянок земної поверхні, із метою ефективного управління ними. ГІС – це багатокомпонентна система, яка об’єднує апаратне, програмне забезпечення, просторові дані та персонал (табл. 2).

Таблиця 2

Архітектурні компоненти геоінформаційних систем (ГІС)

Складові компоненти	Опис	Технічне забезпечення
Апаратне забезпечення (Hardware)	Фізичні засоби, необхідні для функціонування ГІС	Персональні комп'ютери, сервери, планшети; геодезичні прилади (GPS-приймачі, тахеометри); сканери та плотери для оцифрування паперових карт
Програмне забезпечення (Software)	Інструменти для роботи з просторовими даними – створення, редагування, аналіз, візуалізація	ArcGIS, QGIS (безкоштовне), MapInfo – програми для роботи з картами та просторовими базами; AutoCAD Civil 3D – використовують у проєктуванні; ERDAS Imagine, ENVI – для аналізу супутникових зображень
Дані (Data)	Основа будь-якої ГІС – це просторові та атрибутивні (описові) дані	Типи даних: - векторні: точки (водозабори), лінії (дороги), полігони (межі земельних ділянок); - растрові: супутникові знімки, скановані карти; - атрибутивні: інформація про ділянку – власник, площа, цільове призначення. Джерела даних: Державний земельний кадастр, супутникові платформи (Sentinel, Landsat), топографічні карти, результати польових вимірювань
Методи (процедури і технології)	Набір процедур, алгоритмів і моделей, що забезпечують обробку та аналіз просторової інформації	Просторовий аналіз (наприклад визначення ерозійно небезпечних зон); геостатистика; буферне зонування; побудова цифрових моделей рельєфу (ЦМР)
Людські ресурси (People)	Кваліфіковані фахівці, які створюють, обслуговують і застосовують ГІС на практиці	Геоінформатики, землевпорядники, кадастрові інженери; програмісти, аналітики, картографи
Методи управління (організаційне забезпечення)	Норми, стандарти, політики, що регулюють використання ГІС у межах проєкту, установи чи державної системи	Стандарти INSPIRE (ЄС), ISO 19115 (метадані); Закон України «Про національну інфраструктуру геопросторових даних»; внутрішні регламенти установ Держгеокадастру

Завдяки можливостям обробки великих обсягів просторових даних ГІС дає змогу створювати точні цифрові кадастрові карти; моделювати сценарії використання земель; проводити моніторинг змін земельних ділянок у реальному часі. Відповідно геоінформаційна система управління земельними ресурсами

територіальної громади функціонує як інноваційна картографічна платформа. Ця система інтегрує дані з державних реєстрів, відкритих інформаційних ресурсів і локальних картографічних матеріалів із метою візуалізації та формування аналітичних звітів про земельний фонд громади в контексті окремих земельних ділянок, їхніх правовласників і користувачів. Геоінформаційна система акумулює відомості про власників та орендарів земельних ділянок, їхній правовий статус, нормативну грошову оцінку, часові рамки орендних угод і широкий спектр супутньої інформації [5].

Функціонування сучасних геоінформаційних систем значною мірою залежить від інтеграції даних, отриманих за допомогою супутникових методів дистанційного зондування Землі. Дистанційне зондування Землі (ДЗЗ) – це процес отримання інформації про об'єкти і явища на земній поверхні без безпосереднього контакту з ними, зазвичай за допомогою супутників, літаків, безпілотників або висотних аеростатів. Дані ДЗЗ формують на основі реєстрації електромагнітного випромінювання (відбитого чи власного), що дає змогу виявити фізичні та хімічні характеристики поверхні: вологість, температуру, біомасу, рослинність, структуру ґрунтів тощо. Дистанційне зондування Землі відіграє фундаментальну роль у сучасних системах управління земельними ресурсами, забезпечуючи [10]:

- моніторинг землекористування і покриття земель: відстежувати зміни в покритті територій – розорювання, урбанізацію, вирубку лісів, зрошення. Це важливо для контролю за дотриманням цільового призначення земель, виявлення самозахоплень або несанкціонованого використання;

- оцінювання родючості ґрунтів і продуктивності угідь: аналізувати стан сільськогосподарських культур, прогнозувати врожайність, виявляти зони зниженого потенціалу. Це допомагає в ухваленні рішень про удобрення, полив, сівозміни;

- виявлення та моніторинг деградованих земель: за допомогою супутникових індексів (NDVI, SAVI, NBR) можна визначати ерозійні процеси, засолення, заболочування, опустелювання;

- оцінювання природних ризиків і зон впливу стихійних явищ: радіолокаційні дані дають змогу аналізувати зсуви ґрунту, повені, просідання ґрунтів у регіонах із розвиненою гірничодобувною промисловістю;

- підтримку ухвалення управлінських рішень: дані ДЗЗ інтегровані в ГІС, де їх можна аналізувати разом із кадастровою, економічною та демографічною інформацією. Це забезпечує обґрунтоване планування землекористування на державному, регіональному та місцевому рівнях;

- виконання міжнародних зобов'язань: ДЗЗ є основним джерелом для звітності щодо виконання цілей сталого розвитку (ЦСР), зокрема ЦСР № 15 «Життя на землі», а також систем моніторингу в рамках європейської ініціативи INSPIRE.

Прикладами успішного використання ДЗЗ є проєкти з оцінювання стану ґрунтів за даними Sentinel-2 і виявлення самовільного використання земель на основі супутникових знімків.

GPS (Global Positioning System) – це глобальна система супутникового позиціонування, яка забезпечує визначення координат об'єкта на земній поверхні з високою точністю в реальному часі. Система функціонує на основі мережі супутників, які передають сигнали на приймачі, розташовані на землі. Сьогодні активно використовують альтернативи – GLONASS (РФ), Galileo (ЄС), BeiDou (Китай), часто у форматі GNSS (Global Navigation Satellite System) – об'єднаної супутникової навігації. GPS-технології стали важливим інструментом у точному землеробстві, кадастрових роботах, агровиробництві та плануванні територій. Їх

застосування дає змогу значно підвищити точність, швидкість і достовірність геодезичних вимірювань, що є основою ефективного управління земельними ресурсами [13]. Зазначимо основні напрями застосування GPS, які забезпечують ефективне територіальне адміністрування:

- визначення меж земельних ділянок: GPS-приймачі використовують для високоточних геодезичних зйомок меж ділянок для складання технічної документації щодо встановлення меж, інвентаризації земель, приватизації тощо. Приклад: RTK-режим (Real-Time Kinematic) дає змогу отримати координати з точністю до 2–3 см у режимі реального часу;

- оновлення кадастрових карт і баз даних: дані GPS застосовують для актуалізації цифрових карт у державному земельному кадастрі, особливо під час виявлення розбіжностей між фактичним і юридичним розміщенням ділянок;

- підтримка аграрного управління (точне землеробство): в агросекторі GPS забезпечує автоматичне водіння тракторів і комбайнів; точний висів і внесення добрив; зонування полів і контроль продуктивності. Приклад: у точному землеробстві застосовують GPS-платформи типу Trimble, John Deere GreenStar, Ag Leader;

- моніторинг змін у землекористуванні: GPS-дані дають змогу фіксувати зміни землекористування, незаконне будівництво, самозахоплення земель або природні зміщення меж;

- польові обстеження та інспекції: працівники землевпорядних служб та інспекцій використовують мобільні GPS-приймачі та смартфони для геолокації об’єктів у польових умовах, спрощуючи збирання просторової інформації.

WEB-технології – це комплекс інструментів, платформ і стандартів, які підтримують функціонування інформаційних сервісів через інтернет. У контексті управління земельними ресурсами вони дають дистанційний доступ до геоінформації, електронних кадастрових сервісів, документів і адміністративних процедур, що значно спрощує та прискорює взаємодію між громадянами, органами влади та бізнесом.

Застосування WEB-технологій у земельному управлінні:

- публічні кадастрові портали (Публічна кадастрова карта, Геопортал України тощо), за якими користувач може переглянути межі ділянок, їхнє цільове призначення, шукати за кадастровим номером, отримати координати, площу, обмеження у використанні тощо;

- електронні кабінети для громадян і землевпорядників: через вебпортали користувачі можуть подавати заяви на отримання витягів із кадастру, реєстрацію земельної ділянки, поділ чи об’єднання, а також відстежувати статус розгляду. Приклад: електронні сервіси на порталі Дія, держгеокадастр.gov.ua, електронні сервіси земельного кадастру https://e.land.gov.ua/services;

- WEB-ГІС-платформи – це інтерактивні вебсистеми, які дають змогу в режимі онлайн переглядати, редагувати і аналізувати геопросторову інформацію. Приклади: GeoServer, ArcGIS Online, Mapbox, Leaflet; місцеві геопортали громад (наприклад Тростянецька, Бучанська, Мереф’янська громади), що відображують межі земель, зелені зони, об’єкти інфраструктури;

- відкрите API та інтеграція даних: вебсервіси забезпечують машинний доступ до даних для розробників через API, що дає змогу створювати інноваційні додатки і аналітичні панелі (dashboard) для моніторингу землекористування;

- моніторинг і громадський контроль: вебплатформи підтримують краудсорсинг – залучення громадян до подання інформації про самозахоплення земель, незаконну забудову, порушення меж. Це зміцнює прозорість і підзвітність.

Переваги WEB-технологій у земельному управлінні:

- доступність 24/7 – користувачі можуть працювати із земельними даними без візиту до установ;

- прозорість – відкритість кадастрової та геопросторової інформації зменшує корупційні ризики;

- оперативність – швидкий обмін даними між установами, виконавцями та замовниками;

- ефективне управління громадами – локальні веб-ГІС допомагають планувати території, проводити аудит землекористування, генерувати надходження до бюджету;

- платформа для аналітики – вебінструменти, які інтегровані з Big Data і AI, для моделювання використання територій. Прикладом є міжнародні платформи:

а) Land Matrix (https://landmatrix.org) – дає змогу моніторити глобальні тенденції земельної концентрації та фіксувати великомасштабні угоди щодо використання земель в агросекторі;

б) FAO GeoNetwork (https://www.fao.org/geonetwork) – вебплатформа Продовольчої та сільськогосподарської організації ООН, яка містить просторові дані про землекористування, ґрунти, клімат тощо з відкритим доступом;

в) USGS Earth Explorer (США) (https://earthexplorer.usgs.gov) – система для безкоштовного завантаження супутникових знімків (Landsat, Sentinel) для їх використання під час моніторингу земельних змін засобами ДЗЗ та ГІС;

г) INSPIRE Geoportal (ЄС) (https://inspire-geoportal.ec.europa.eu) – Загальноєвропейська система, яка підтримує гармонізований доступ до геопросторових даних про землю, довкілля, інфраструктуру відповідно до директиви INSPIRE.

Облік земельних ресурсів і ділянок являє собою критично важливу складову земельного управління, що функціонує як комплексна інформаційна система, призначена для опрацювання різнопланових даних. Процеси обробки даних охоплюють широкий спектр операцій, включаючи введення, експорт, імпорт, обмін, попередню обробку, аналіз, візуалізацію, кодування та криптографічне перетворення. Незважаючи на значний функціонал геоінформаційних систем (ГІС), їхні можливості є недостатніми для повного спектра зазначених операцій, що зумовлює необхідність розроблення кастомних елементів системи для забезпечення інтегрованого управління земельними даними. Застосування технології блокчейн у геодезії та землеустрої здатне забезпечити необхідний рівень інтегрованості та надійності процесів обробки інформації, гарантуючи захист даних від неавторизованого доступу та оптимізуючи процедури їхньої верифікації. Архітектура блокчейн-мережі має бути сумісною з існуючою адміністративною ієрархією системи контролю та обліку земельних ділянок і ресурсів. У контексті інформаційних систем на основі блокчейн найчастіше використовують консенсусні алгоритми Proof-of-Work (PoW) і Proof-of-Stake (PoS).

У розподілених базах даних блокчейн, унікальний цифровий ідентифікатор разом із пов'язаною з ним хронологічною послідовністю записів визначено як «токен». Токени, що створені та розподілені вузлами блокчейн-мережі з високою обчислювальною здатністю, мають встановлену цінність і афілійовані або сертифіковані адміністративними структурами. Транзакційний обмін токенами між учасниками ініціює додавання нових блоків до ланцюга даних, причому кожен наступний блок криптографічно пов'язаний із попереднім. Інформація про токени та блоки в ланцюзі є публічно верифікованою, що забезпечує прозорість і можливість підтвердження їхньої цілісності та легітимності в контексті геодезії та землеустрою. Криптографічне зв'язування записів у блокчейні базовано на

застосуванні методів відкритої криптографії. Застосування криптографічних хеш-функцій значно підвищує рівень захищеності інформаційних ресурсів, що сприяє зміцненню довіри до використовуваних технологій. Ефективність алгоритмів хешування в поєднанні з відповідними технічними рішеннями забезпечує оперативну обробку запитів. Хеш-функції, що являють собою математичні алгоритми для компресії даних до бітової послідовності фіксованої довжини, виконують важливу функцію в криптографії для верифікації цілісності даних, аутентифікації користувачів та ідентифікації джерела інформації. Слід зазначити, що хеш-функція не залежить від секретного ключа та є публічно доступною для всіх учасників системи. У процесах аутентифікації джерела даних між сторонами з низьким рівнем взаємної довіри застосовано механізм електронного підпису [14].

Впровадження технології блокчейн у системи реєстрації та обліку земельних ділянок сприяє оптимізації інфраструктурних витрат, одночасно забезпечуючи підвищену надійність і безпеку процесів обробки інформації. Крім того, застосування блокчейну усуває потребу в ряді тривалих і фінансово обтяжливих юридичних процедур, таких як нотаріальне засвідчення та банківські транзакції, а також виключає участь деяких посередників у процесі оформлення земельних угод через їхню функціональну надмірність.

Власники та користувачі земельних ділянок здійснюють внутрішньогосподарське управління землями. Управління земельним банком аграрних формувань реалізовано за допомогою спеціалізованих програмних продуктів: FieldBI – блокова онлайн-система для обліку земельних масивів та орендних договорів; Hromada.feodal.online – комплексна хмарна платформа з функцією візуалізації земельних даних на картах і можливістю формування звітів за заданими критеріями; ProZemli – інтегроване програмне рішення, що враховує специфіку аграрного підприємства та сумісне з іншими програмними продуктами; VkursiZemli та Vkursi Zemli Hromady – сервіси земельної аналітики для управління і контролю земельного банку підприємств, громад або регіонів; Vkursi Zemli Scoring – сервіс банківського скорингу земельних ділянок, що автоматично оцінює відповідність ділянок критеріям купівлі або застави. Цифрові платформи для купівлі-продажу та оренди сільськогосподарської землі пропонують юридичний і спеціальний консалтинг, включаючи оформлення угод, шаблони, пошук, оголошення, рієлторські послуги, бази даних, контроль цільового використання, аналіз ринку та представництво в суді. Серед відомих платформ Агро-Інвест, Доброзем, Купи Пай, ЗемФонд, Є Пай, Земельний Ринок, Land Invest, Volodar, Uland, Land Club та інші. Інтегроване використання комп'ютерних таких програм, як PreAgri, ГІС 6 Агро, ГІС 6 ВЕБ, значно підвищує ефективність роботи і економічні результати підприємств. Завдяки цьому стає доступним електронний облік історії полів, контроль за переміщенням техніки, дистанційне управління агрозаходами, отримання метеоданих, створення ортофотопланів, агрохімічний аналіз ґрунту і рослин, а також супутниковий моніторинг посівів. Якісне інформаційне забезпечення в управлінні земельними ресурсами є основним фактором для підвищення ефективності роботи менеджерів, відкриваючи нові можливості для підвищення ефективності, прозорості та сталого розвитку [5].

Висновки. Під цифровими технологіями управління земельними ресурсами розуміють сукупність сучасних інформаційних і телекомунікаційних рішень, які використовують для збору, обробки, аналізу, збереження і поширення

просторової та правової інформації про земельні ресурси з метою ефективного їх використання, планування та охорони. Ці технології відкривають нові можливості для оптимізації управління земельними ресурсами, зменшення бюрократичних перешкод і підвищення прозорості угод.

Однак разом із цими можливостями виникають і певні виклики, зокрема недостатній рівень інфраструктури для обробки великих даних, необхідність змін у нормативно-правовій базі, потреба в підготовці фахівців нового покоління, які володіють цифровими компетенціями, високі витрати на впровадження сучасних технологій. Це потребує не лише технологічних інновацій, а і правових та освітніх зусиль для створення стабільної й ефективної системи, щоб використовувати переваги сучасних технологій для вирішення проблем у землекористуванні. Слід зазначити, що подальша автоматизація землеустрою має бути базована на інтеграції різних цифрових платформ, розширенні відкритого доступу до земельних даних, розвитку штучного інтелекту для аналізу просторової інформації. При цьому важливу роль відіграватиме міжнародне співробітництво у впровадженні найкращих практик та інноваційних рішень.

Відповідно цифрові технології є основним фактором підвищення ефективності управління земельними ресурсами, але водночас потребують комплексного підходу для реалізації свого повного потенціалу та подолання технічних, організаційних і кадрових бар'єрів.

Список використаних джерел

1. Mahmoud R., Hassanin M., Al Feel H., Badry R. M. Machine Learning-Based Land Use and Land Cover Mapping Using Multi-Spectral Satellite Imagery: A Case Study in Egypt. *Sustainability.* 2023. 15. 9467. https://doi.org/10.3390/su15129467.

2. Enemark S. Fit-for-Purpose Land Administration—Providing Secure Land Rights at Scale. *Land*. 2021. № 10 (9). P. 972. https://doi.org/10.3390/land10090972.

3. Про національну інфраструктуру геопросторових даних : Закон України від 13.04.2020 р. № 554-IX : станом на 31 груд. 2023 р. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/554-20#Text (дата звернення: 01.05.2025).

4. Артемов В., Мовчан Т., Бахчеван Е., Данько Т. Принципи цифрової трансформації і впровадження її в геодезії та землеустрої. *Аграрний вісник Причорномор'я*. 2020. С. 129-138. DOI: 10.37000/abbsl.2020.96.16.

5. Пуцентейло П., Хома Н., Бабій С. Застосування новітніх інформаційно-цифрових технологій в управлінні земельними ресурсами сільськогосподарських підприємств. *Економічний дискурс*. 2023. Вип. 1-2. С. 96-110. DOI: https://doi.org/10.36742/2410-0919-2023-1-10.

6. Русіна Н. Г., Люльчик В. О. Програмне забезпечення геодезичних розрахунків у землеустрої. *Вчені записки Таврійського національного університету ім. В. І. Вернадського*. 2019. Т. 30 (69). Ч. 2. № 1. С. 156-160.

7. Пушкар Б., Рудакевич І. Інноваційні підходи до управління земельними ресурсами в умовах децентралізації. *Регіональні аспекти розвитку продуктивних сил України*. 2024. № 1(29). С. 48-54. DOI: 10.35774/rarrpsu2024.29.048.

8. Кравчук І. І., Топольницький П. П. Інноваційні підходи до державного регулювання земельних ресурсів на основі ГІС-технологій. *Актуальні проблеми економіки.* 2024. № 7 (277). С. 230-238.

9. Панасенко Н. Л. Особливості впровадження електронних послуг в агропродовольчій сфері України. *Вісник Полтавського державного аграрного університету. Серія «Публічне управління та адміністрування»*. 2024. № 1. С. 65–70. https://doi.org/10.32782 /pdau.pma.2024.1.10.

10. Дець Т., Кирилюк В., Рожі Т. Вивчення відображення і дослідження об'єктів, явищ та процесів у навколишньому середовищі шляхом картографічних зображень та топографо-геодезичних вимірювань. *Містобудування та територіальне планування*. 2024. № 85. С. 133–145. https://doi.org/10.32347/2076-815x.2024.85.133-145.

11. Кадастрові системи та землеустрій у містобудівному проектуванні: оптимізація землекористування та міського планування / В. Чувпило, С. Шевчук, С. Гапон та ін. *Містобудування та територіальне планування*. 2023. № 84. С. 407–423. https://doi.org/10.32347/2076-815x.2023.84.407-423.

12. Домбровська О. А. Інтелектуальна власність у сфері землеустрою, геодезії та кадастру. *Журнал з менеджменту, економіки та технологій*. 2024. № 2. С. 120-135. DOI: 10.69803/2312-3427-2024-2-120.

13. Герасимчук О. Л., Гой В. В., Харів В. В. Використання сучасних геодезичних технологій для проведення оцінки земельних ресурсів у віддалених районах. *Технічні науки та технології*. 2024. № 4 (38). С. 313-324. DOI: 10.25140/2411-5363-2024-4(38)-313-324.

14. Гой В., Мамонов К., Харів В. Використання технологій блокчейну для покращення аутентифікації та захисту даних у геодезії та землеустрої. *Містобудування та територіальне планування*. 2024. № 85. С. 67–81. DOI:https://doi.org/10.32347/2076-815x.2024.85.67-81.

Ступень Оксана Іванівна, кандидат економічних наук, доцент, доцент кафедри землеустрою, Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнологій імені С. З. Ґжицького.
ORCID iD: 0000-0001-6702-0987. Тел.: +38 (067) 332-77-85. E-mail: oksanashufryn@ukr.net.
Прокопенко Наталія Іванівна, кандидат економічних наук, доцент кафедри геодезії та землеустрою, Сумський національний аграрний університет. ORCID iD: 0000-0001-5046-6122. Тел.: +38 (095)149-29-49.
E-mail: bilanp79@gmail.com.
Шевчук Сергій Миколайович, доктор географічних наук, професор, завідувач кафедри геоматики, землеустрою та планування територій, Полтавський державний аграрний університет. ORCID iD: 0000-0002-8155-8326.
Тел.: +38 (097) 147-92-65. E-mail: Shevchuk1983@i.ua.

Stupen Oksana, Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Land Management, Stepan Gzhytskyi National University of Veterinary Medicine and Biotechnologies of Lviv.
ORCID iD: 0000-0001-6702-0987. Tel.: +38 (067) 332-77-85. E-mail: oksanashufryn@ukr.net.
Prokopenko Nataliia, Candidate of Economic Sciences, Associate Professor of the Department of Geodesy and Land Management, Sumy National Agrarian University. ORCID iD: 0000-0001-5046-6122. Tel.: +38 (095)149-29-49.
E-mail: bilanp79@gmail.com.
Shevchuk Serhii, Doctor of Geographic Sciences, Professor, Head of the Department of Geomatics, Land Management and Territorial Planning, Poltava State Agrarian University. ORCID iD: 0000-0002-8155-8326. Tel.: +38 (097) 147-92-65. E-mail: Shevchuk1983@i.ua.

Статтю прийнято 30.06.2025 р.

УДК 528.482.4

КОМПЛЕКСНЕ ЗАСТОСУВАННЯ ДАНИХ ГНСС-СПОСТЕРЕЖЕНЬ І СУПУТНИКОВОЇ РАДІОЛОКАЦІЇ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ДИНАМІКИ РУХІВ ПРИДНІПРОВСЬКОЇ НИЗОВИНИ

Кандидати техн. наук С. В. Нестеренко, Р. А. Міщенко

INTEGRATED APPLICATION OF GNSS AND SATELLITE RADAR DATA TO DETERMINE THE DYNAMICS OF MOVEMENTS OF THE DNIPRO LOWLAND

PhD (Tech.) S. Nesterenko, PhD (Tech.) R. Mishchenko

DOI: https://doi.org/10.18664/1994-7852.212.2025.336342

Анотація. *З комплексним застосуванням ГНСС–спостережень і диференціальної інтерферометрії DInSAR визначено динаміку вертикальних рухів земної кори Придніпровської низовини. За застосованою методологією дослідження змогли визначити масштаби та напрямки вертикальних рухів, що має важливе значення для прогнозування можливих геологічних змін та оцінювання їхнього впливу на інфраструктурні об'єкти регіону. Отримані результати можуть бути використані для розроблення рекомендацій щодо безпечного ведення видобувних робіт і планування розміщення важливих інженерних споруд.*

Ключові слова: *вертикальні зміщення, ГНСС–станції, ГНСС–спостереження, InSAR, диференціальна інтерферометрія, супутникова радіолокація, Придніпровська низовина.*

Abstract. *The study of vertical movements of the earth's crust in the Dnipro Lowland, carried out through the integrated use of GNSS observations and differential interferometry DInSAR, has provided data on the dynamics of geological processes in the region.*

The surface deformations were monitored at the permanent network points (GLSV, CNIV, PRYL, POLV, DNMU, ZPRS, SMLA). GNSS data were used for each station, each of which is part of the European EPN network. Deformation processes were additionally checked by differential interferometry DInSAR. We used 208 C-band SLC IW images acquired from the Sentinel-1 satellite in 2021. The radar images were uploaded to the Vertex (ASF) web platform. Vertical displacements were calculated using SNAP software. Differential interferograms were created sequentially on the basis of two radar images relative to the reference image taken at the beginning of the measurement epoch and the comparison image with which the interference was performed. To ensure the accuracy of the interferometric analysis, the reference and comparison images were selected with similar geometric conditions and with a time interval of multiples of 12 days. Changes were recorded for a single pixel that fell on a point of the permanent network.

The applied research methodology allowed us to determine the scale and direction of vertical movements, which is important for predicting possible geological changes and assessing their impact on the region's infrastructure facilities. It was found that the territory of the Dnipro Lowland is characterized by various indicators of vertical displacements of the earth's surface, which are associated with both natural tectonic processes and anthropogenic impact, in particular, hydrocarbon production and constant shelling. The results obtained can be used to develop recommendations for safe mining operations and planning the location of important engineering structures.

Keywords: *vertical displacements, GNSS–stations, GNSS–observations, InSAR, differential interferometry, satellite radar, Dnipro Lowland.*

Вступ. Земна кора перебуває в постійному русі, що призводить до глобальних і локальних трансформацій клімату, геологічних структур і ландшафту. Інтенсивні тектонічні процеси спричиняють деформації гірських порід, формуючи складчасті структури, розломи, а також синеклізи й антеклізи [1]. Поступові горизонтальні зміщення, зумовлені рухом літосферних плит, відповідальні за утворення гірських систем та океанічних улоговин. Разом із цим повільні вертикальні рухи викликають диференційовані зміни рельєфу: одні ділянки земної поверхні піднімаються, тоді як інші опускаються. Досліджуючи такі рухи, можна прогнозувати динаміку зміни геофізичного поля будь-якого регіону.

У контексті триваючої війни з Російською Федерацією Придніпровська низовина набуває особливого стратегічного значення для України. Фронтова лінія, що проходить уздовж цієї геоморфологічної структури, має високу динамічність і потенціал значного техногенного впливу на екосистему басейну Дніпра. Придніпровська низовина відзначається інтенсивною експлуатацією покладів вуглеводневої сировини. На цій території здійснюється масштабний промисловий видобуток нафти, газу та інших вуглеводневих ресурсів, що становить важливу складову енергетичного сектору регіону. Зважаючи на ці обставини, дослідження динамічних процесів Придніпровської низовини стає надзвичайно актуальним завданням у рамках цієї наукової роботи.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Наукові дослідження, спрямовані на вивчення динаміки руху земної кори, провадять такі видатні вчені, як К. Р. Третяк [2, 3], І. Р. Савчин [4], K. Kowalczyk [5], Ab. G. Rzayev, S. R. Rasulov [6], C. J. Hawkesworth, M. Brown [7] та інші. Визначаючи горизонтальні рухи земної кори Європи, К. Р. Третяк, А. І. Вовк використали результати опрацювання часових серій для ГНСС-станцій території Європи близько 170 станцій [8]. Для підвищення точності E. Brockmann, D. Ineichen, U. Marti, S. Schaer, A. Schlatter, A. Villiger порівняли результати двох методів GNSS-вимірювань і нівелювання для визначення вертикальних переміщень тектонічно-активних територій Швейцарії [9]. У статті [10] проаналізовано часові ряди руху і оцінено річні швидкості ГНСС–станцій. Вивченням локальних геодинамічних явищ методами наземної і космічної геодезії тривалий час займаються спеціалісти Полтавської гравіметричної обсерваторії Інституту геофізики НАН України імені С. І. Субботіна В. Г. Павлик, А. М. Кутний, Т. М. Бабич [11, 12], Л. Я. Халявіна [13]. Науковці з різних держав працюють над створенням методологій встановлення переміщень опорних пунктів і проведення геодезичного спостереження за визначеними територіями, структурами та інженерними об'єктами. У своїх дослідженнях вони комбінують різні наземні та дистанційні геодезичні технології, розробляють прогностичні та моделюючі підходи для відстеження зміщень і деформацій, а також ідентифікують основні фактори, що зумовлюють динамічні процеси в досліджуваних об'єктах.

Визначення мети та завдання дослідження. Метою цієї роботи є визначення вертикальних рухів земної кори Придніпровської низовини за даними ГНСС–спостережень і диференціальної інтерферометрії DInSAR.

Дослідження спрямоване на аналіз та кількісне оцінювання вертикальних зміщень земної кори в межах Придніпровської низовини. Для досягнення цієї мети застосовано два основні методи: обробка даних ГНСС–спостережень і використання технології диференціальної інтерферометрії DInSAR. Комбінація цих підходів дає змогу отримати комплексну картину вертикальних рухів досліджуваної території.

Методика. Моніторинг деформацій поверхні Придніпровської низовини

здійснено за пунктами перманентної мережі (GLSV, CNIV, PRYL, POLV, DNMU, ZPRS, SMLA). Усі станції входять до складу європейської мережі EPN (EUREF Permanent GNSS Network). Дані ГНСС-спостережень за кожною станцією отримано на сайті EPN [14] на період 2021 року (епоха 2139 – 2190) і 2023 року (епоха 2243 – 2294).

Деформаційні процеси додатково перевіряли методом диференціальної інтерферометрії DInSAR. Використано 208 висхідних знімків на частоті С–діапазону в режимі SLC IW, отримані із супутника Sentinel–1 за 2021 рік. Радарні знімки завантажено на вебплатформі Vertex (ASF) [15]. Розраховували вертикальні зміщення у програмному забезпеченні SNAP [16]. Диференціальні інтерферограми створювали послідовно на основі двох радарних знімків відносно опорного (master) зображення, виконаного на початок епохи вимірів, і порівняльного (slave), із яким проводили інтерференцію. Для точності інтерферометричного аналізу опорне і порівняльне зображення вибрані зі схожими геометричними умовами і часовим інтервалом, кратним 12 дням. Фіксували зміни за окремим пікселем, який припадав на пункт перманентної мережі.

Основна частина дослідження. Придніпровська низовина розміщена на лівобережжі Дніпра, у межах Чернігівської, Сумської, Полтавської та частково Київської, Черкаської, Дніпропетровської і Харківської областей. Висота над рівнем моря – 50–160 м, найбільша – 236 м, ширина – до 120 км [17]. На цій території станом на 2025 рік у південній частині Придніпровської низовини проходить лінія розмежування між тимчасово окупованими та контрольованими територіями (рис. 1). Уся територія низовини зазнає обстрілів, що може провокувати активні геодинамічні процеси в земному тілі.

Рис. 1. Місце розташування Придніпровської низовини на карті України (блакитним), пунктів ГНСС–станцій, які вибрані для досліджень; напівпрозорим червоним – окупована територія, штриховою – територія, яка зазнає інтенсивних обстрілів

Територія Придніпровської низовини багата на мінеральні ресурси. Серед наявних покладів корисних копалин тут зосереджені вуглеводневі сполуки (нафта, природний газ і конденсат), мінеральна сировина (граніт, залізна руда), а також будівельні матеріали (глина, пісок). Крім того, у регіоні присутні родовища бішофіту і ряд інших цінних мінеральних ресурсів (рис. 2). Основні поклади вуглеводнів України сконцентровані в трьох адміністративних регіонах – Полтавській, Харківській і Сумській областях, які забезпечують 90 % загальнодержавного видобутку нафти і природного газу. Ці території формують головний нафтогазоносний район країни, де зосереджена переважна більшість видобувних потужностей держави.

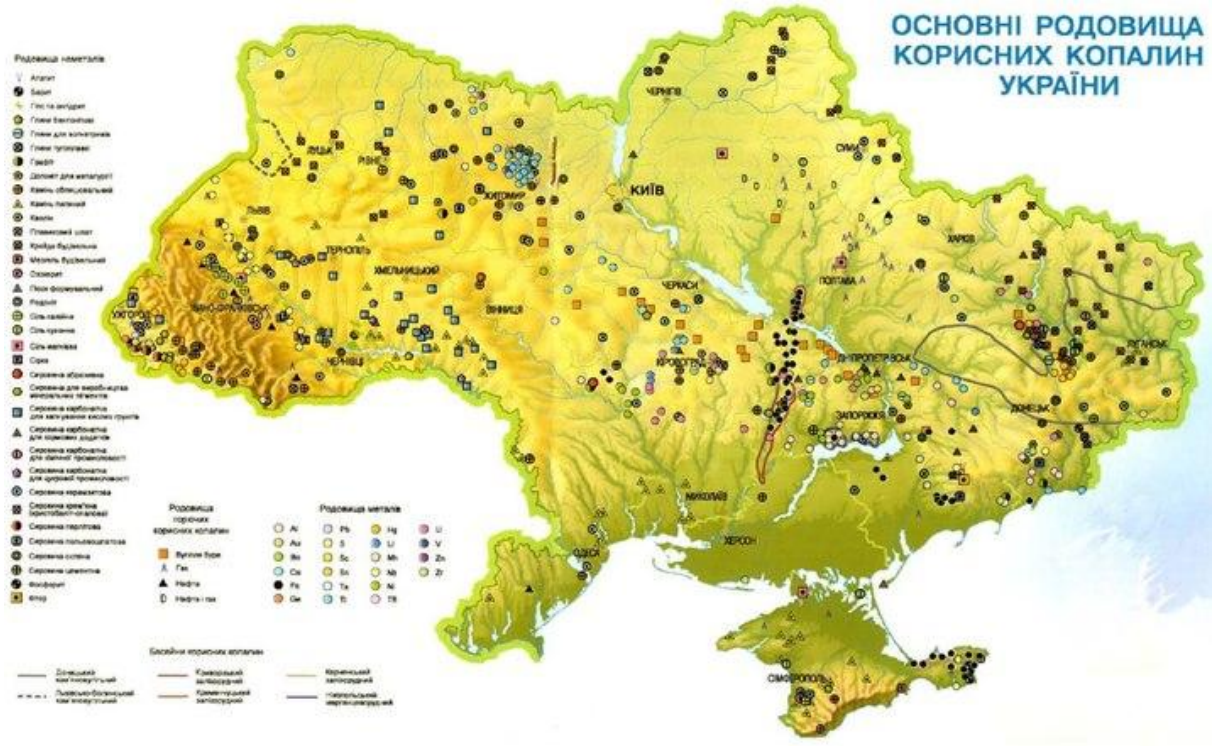


Рис. 2. Оглядова геологічна карта України [18]

Спостереження за геодинамічними процесами в Придніпровській низовині здійснено за супутниковими даними ГНСС–станцій, які відстежують операційні центри в режимі реального часу. Для оцінювання вертикальних рухів було вибрано сім пунктів перманентної мережі, що розташовані на ній: GLSV «Київ/Голосіїв», CNIV «Чернігів», PRYL «Прилуки», POLV «Полтава», DNMU «Дніпро», ZPRS «Запоріжжя», SMLA «Сміла» (рис. 1). Геодезичні пункти належать різним операторам: ГАО НАН України, ПрАТ «Систем Солюшнс» (мережа System.NET), Науково-дослідному інституту геодезії і картографії (УПМ ГНСС), Національному центру управління та випробувань космічних засобів (Система Координатно-часового і Навігаційного Забезпечення України) (табл. 1).

Антени ГНСС–станцій розміщені на дахах будівель (рис. 3). Стабільність планово-висотного положення антен забезпечена надійним кріпленням до стабільних, нерухомих у процесі експлуатації основ [19].

Усі перелічені вище ГНСС–станції входять до Європейської мережі EPN

(EUREF Permanent GNSS Network). Станції EPN (IGS) є джерелом високоточних координат у загальноземних системах координат WGS-84/ITRF-XXXX/IGb. Точність реалізації цих координат становить 3–5 мм і менше 1 мм/р. для швидкості їх зміни [20]. Дані зміщень станцій у вертикальному напрямі на період 2021 (епоха 2139 – 2190) і 2023 років (епоха 2243 – 2294) взяті на сайті EPN [14].

Таблиця 1

Коротка характеристика ГНСС–станцій, що розташовані на Придніпровській низовині

ГНСС-станції	Місце знаходження	Координати H, м	Включено до мережі		Оператор
			IGS	EPN	
1	2	3	4	5	6
GLSV	Головна астрономічна обсерваторія НАН України, м. Київ	226,316	з 06.05.1998	з 10.05.1998	ГАО НАНУ
CNIV	Чернігівський державний інститут економіки та управління, м. Чернігів	175,976	–	з 29.10.2006	System.NET
PRYL	Прилуцька державна районна адміністрація, м. Прилуки	172,482	–	з 20.02.2017	УПМ ГНСС
POLV	Полтавська гравіметрична обсерваторія Інституту геофізики ім. С. І. Субботіна НАН України, м. Полтава	178,367	з 27.06.2001	з 09.09.2001	УПМ ГНСС
DNMU	м. Дніпро	174,624	–	з 20.02.2017	УПМ ГНСС
ZPRS	м. Запоріжжя	93,613	–	з 29.04.2018	СКНЗУ
SMLA	ДП «Оризон-Навігація», м. Сміла	183,054	–	з 01.11.2009	УПМ ГНСС

Вертикальні зміщення Придніпровської низовини, зокрема точок ГНСС–станцій, контрольно визначали за допомогою радіолокаційних спостережень за допомогою технології дистанційного зондування InSAR. Технологія базована на використанні двох або більше радіолокаційних знімків, зроблених з однакових або близьких положень, у різні моменти часу. InSAR використовують для створення високоточних тривимірних моделей поверхні землі та моніторингу змін висоти земної поверхні з часом. У результаті диференціальної інтерферометрії (DInSAR) – аналізу інтерференції між двома знімками – можна виявити найменші вертикальні зміни поверхні. Ця технологія включає кілька етапів. Спочатку формують інтерферограми, які показують різницю фаз між двома радіолокаційними знімками. Інтерферометрична фаза залежить лише від різниці в траєкторіях руху від супутника до кожного пікселя. Потім відбувається перетворення інтерферограми в безперервну карту зміщень. Ортотрансформоване зображення отримують перетворенням радіанів в абсолютні зміщення в метрах із корекцією рельєфу за координатами [21]. На етапі обробки знімків застосовано інструменти і фільтри для зменшення шумів із метою покращення інтерферометричних результатів.

Рис. 3. Загальний вигляд приймальних антен ГНСС–станцій Придніпровської низовини

Опрацьовували космічні знімки, що покривали задану територію, отримані супутником Sentinel–1 через кожні 12 днів протягом 2021 року. Побудована карта вертикальних зміщень показала наявність аномальних значень для деяких супутникових знімків. Виявлено складні метеорологічні умови на зазначені дати в цій місцевості [22]. На картах зміщень наявність атмосферних шумів спотворює зображення, спостерігається вплив атмосферних процесів і умов погоди на зниження якості результатів вимірювання. Моніторинг деформацій у несприятливих умовах дає похибки отриманих результатів, проблеми посилені наявністю опадів протягом тривалих періодів часу. Тому такі виміри оцінені як грубі помилки і видалені із загального ряду вимірювань.

У диференціальній інтерферометрії DInSAR вертикальні зміщення оцінюють як усереднені значення за пікселем розміром 10×10 м. Тому неможливо визначити локальні коливання ГНСС–станції, але можна порівняти загальну тенденцію руху точки перманентної мережі з даними супутникової радіолокації (рис. 4). Результати визначення вертикальних швидкостей руху контрольних пунктів ГНСС–станцій за 2021 рік за даними GNSS і радіоінтерферометричних вимірів наведено в табл. 2.

Середнє значення різниць Δ за 2021 рік складає $\Delta_{avg} = +0{,}2$ мм/р. Із табл. 2 видно, що істинна похибка вимірювань Δ найбільша на пунктах DNMU (м. Дніпро), ZPRS (м. Запоріжжя). Відхилення можуть бути проявом впливу факторів на інтерферометричні виміри, таких як затримка сигналу через тропосферні затримки, орбітальні або топографічні помилки, трансформаційний зсув вертикальних швидкостей точок (пікселів) із системи координат LOS до WGS-84, просторова та часова декореляція. Необхідно враховувати і те, що наведені вертикальні швидкості за

інтерферометричними даними відповідають найближчому пікселю, розташованому відносно контрольного пункту. Зростання значень вертикальних швидкостей можуть свідчити про нестабільність у південній частині Придніпровської низовини.

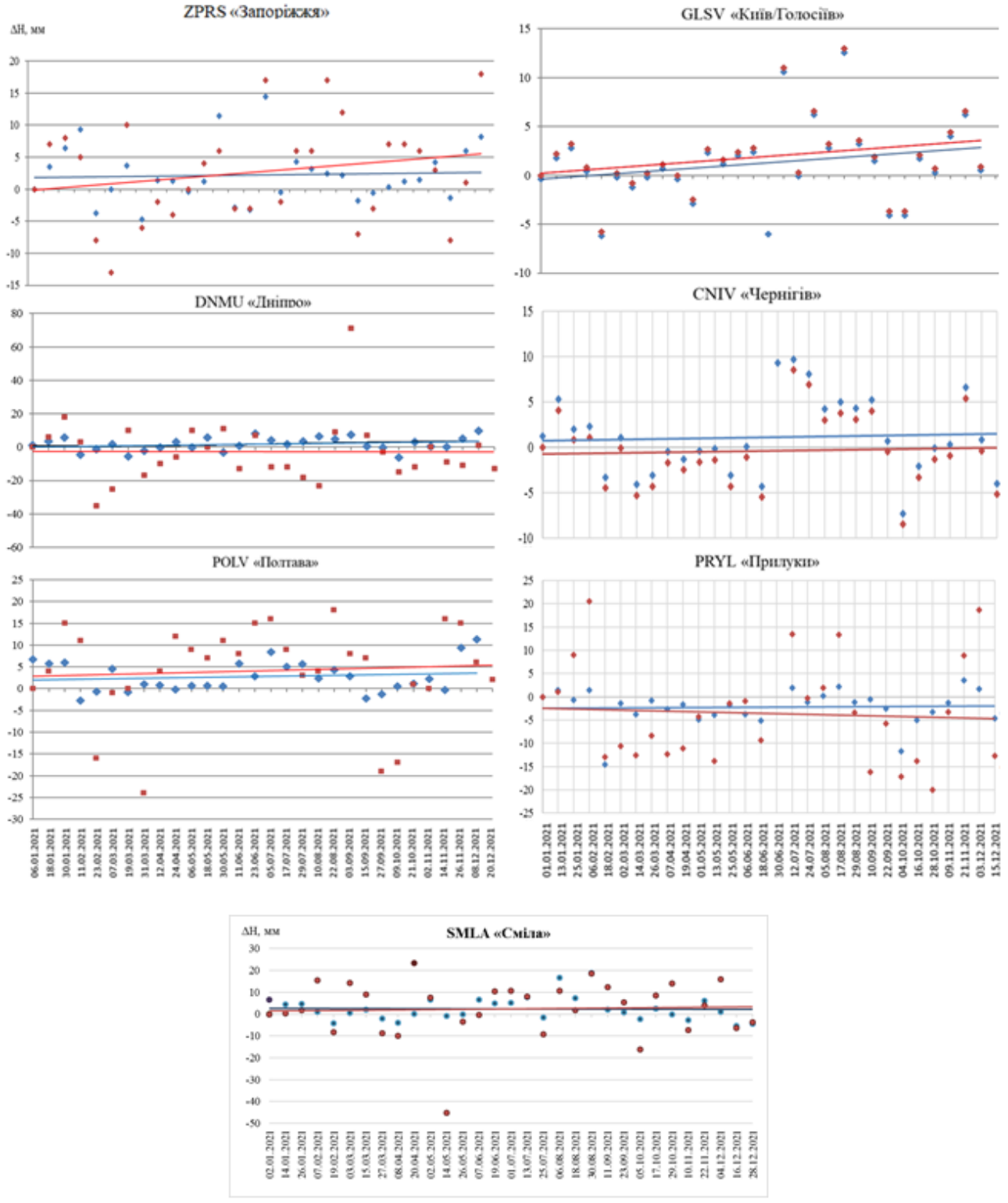


Рис. 4. Вертикальні рухи ГНСС–станцій Придніпровської низовини за 2021 рік: синім кольором – за супутниковими спостереженнями, червоним – за результатами DInSAR (мм)

Таблиця 2

Характеристика вертикальних рухів ГНСС–станцій,
що розташовані на Придніпровській низовині

Назва ГНСС-станції	Вертикальні швидкості руху, мм/р.		Істинна похибка вимірювань, мм/р.	Редуковані вертикальні швидкості, мм/р.	Редуковані різниці, мм/р.
	V_{GNSS}	V_{DInSAR}	$\Delta = V_{DInSAR} - V_{GNSS}$	$V_R = V_{DInSAR} - \Delta_{AVG}$	$\Delta_R = \Delta - \Delta_{AVG}$
1	2	3	4	5	6
GLSV	+3,4	+3,4	0,0	3,2	-0,2
CNIV	+0,8	+0,8	0,0	+0,6	-0,2
PRYL	+0,5	-2,3	-2,8	-2,5	-3,0
POLV	+1,7	+2,7	+1,0	+2,5	+0,8
DNMU	+3,7	-0,07	-4,4	-0,27	-4,6
ZPRS	+0,8	+6,0	+5,2	+5,8	+5,0
SMLA	-0,5	+1,9	+2,4	+1,7	+2,2

За рис. 4, поліноміальні лінії тренду, отримані за розрахунками диференціальної інтерферометрії DInSAR, повторюють траєкторії ліній тренду за даними супутникових спостережень. Такі результати комбінованих спостережень дають змогу в майбутньому використовувати методи радарної інтерферометрії для досліджень тих ділянок, де немає можливості виконувати наземні геодезичні вимірювання. Дослідження за вертикальними рухами Придніпровської низовини з 2023 року стали можливими лише за даними дистанційного зондування Землі. Саме з кінця 2022 року почалися обстріли енергетичної інфраструктури України, під загрозою опинилися всі гідроелектростанції по річці Дніпро. У 2023 році здійснено більше 30 масованих атак по Україні, зруйнована Каховська ГЕС [23]. Воєнні дії спричиняють шкоду інфраструктурі та населенню України, чинять екоцид на всій території і можуть впливати на загальні геодинамічні процеси в тілі Землі. На рис. 5 зображена карта вертикальних деформацій – ортотрансформоване зображення з інформацією про абсолютні зміщення в метрах кожного пікселя, корекцією рельєфу за географічною системою координат – за період 29 квітня – 11 травня 2023 року. 10 травня була зафіксована масована ракетна атака, попередній напад був 28 квітня того ж року. Отже, на карті чітко простежують осередкові зрушення, які проявляються яскраво-червоним (просідання) і темно-синім (підняття) кольорами.

Висновки. У результаті проведеного дослідження вертикальних рухів земної кори Придніпровської низовини, здійсненого шляхом комплексного застосування ГНСС–спостережень і диференціальної інтерферометрії DInSAR, вдалося отримати дані про динаміку геологічних процесів у регіоні.

Виявлено, що територія Придніпровської низовини має різні показники вертикальних зміщень земної поверхні, які пов’язані як із природними тектонічними процесами, так і антропогенним впливом, зокрема видобутком вуглеводнів і постійних обстрілів.

Застосована методологія дослідження дала змогу визначити масштаби та напрямки вертикальних рухів, що має важливе значення для прогнозування можливих геологічних змін і оцінювання їхнього

впливу на інфраструктурні об’єкти регіону. Отримані результати можуть бути використані для розроблення рекомендацій щодо безпечного ведення видобувних робіт і планування розміщення важливих інженерних споруд.

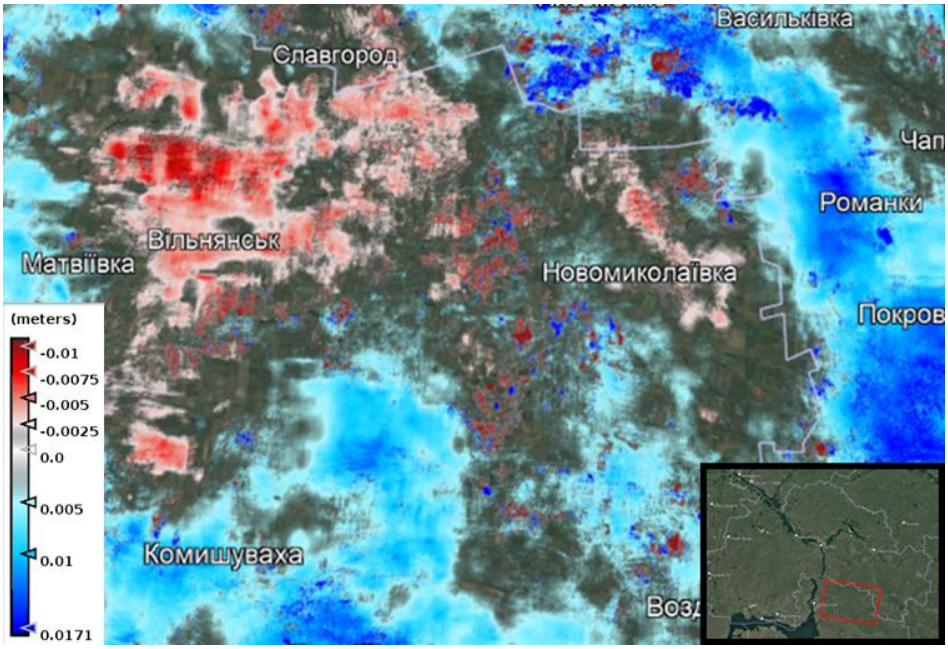


Рис. 5. Карта вертикальних деформацій на частину Придніпровської низовини за період 29.04–11.05.2023 року біля м. Запоріжжя, яка напередодні зазнала ракетних обстрілів

Подальші дослідження в цьому напрямі доцільно спрямувати на розроблення вдосконалених методів моніторингу геодинамічних процесів із використанням сучасних супутникових технологій.

Сучасні геодезичні дослідження, які проводить наукова спільнота, мають важливе значення для моніторингу стану території в умовах бойових дій і промислового видобутку корисних копалин. Застосування різних методів наземного та дистанційного спостереження дає змогу відстежувати переміщення і деформації земної поверхні, прогнозувати можливі зміни та виявляти фактори, що впливають на динаміку процесів.

Подальший розвиток методик геодезичного моніторингу та їх практичне застосування сприятиме раціональному використанню природних ресурсів Придніпровської низовини та забезпеченню екологічної безпеки регіону в умовах інтенсивної господарської діяльності.

Список використаних джерел

1. Ягольник А. М., Лазєбна Ю. В. Основи історичної геології: навч. посіб. Полтава: НУ «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», 2023. 143 с.

2. Tretyak K., Nesterenko S., Bisovetskyi Yu. Complex InSAR radar image processing, GNSS and TPS measurements to determine the Kaniv HPP dam deformations. 2023. URL: https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3426456/v1.

3. Третяк К., Брусак І. Сучасні деформації земної кори території заходу України за даними ГНСС мережі «Geoterrace». *Геодинаміка*. 2022. 1(32). С. 16-25. URL: https://doi.org/10.23939/jgd2022.02.016.

4. Савчин І., Данилів Н., Зигар А., Романовський А. Дослідження динаміки вертикальних рухів земної поверхні в районі Дністровської ГАЕС впродовж 1999–2018 років. *GeoTerrace*. 2018. С. 5–6.

5. Kowalczyk K., Kowalczyk A. M. & Chojka A. Modeling of the Vertical Movements of the Earth's Crust in Poland with the Co-Kriging Method Based on Various Sources of Data. *Applied Sciences.* 2020. 10 (9). 3004. URL: https://doi.org/10.3390/app10093004.

6. Rzayev A. G. & Rasulov S. R. Identification of the mechanism of tectonic movements of the Earth's crust. *News of the Ural State Mining University*. 2019. 103–114. URL: https://doi.org/10.21440/2307-2091-2019-1-103-114.

7. Hawkesworth C. J. & Brown M. Earth dynamics and the development of plate tectonics. *Philosophical transactions. Series A, Mathematical, physical, and engineering sciences.* 2018. 376 (2132). 20180228. URL: https://doi.org/10.1098/rsta.2018.0228.

8. Третяк К., Вовк А. Дослідження динаміки горизонтальних рухів земної кори Європи за даними GNSS спостережень (2000–2010). *Геодинаміка*. 2012. № 2 (13). С. 5–17.

9. Extraction of a kinematic model for Switzerland based on GNSS and levelling data / A. Villiger et al. *10575.*

10. Gerhatova L., Hefty J., Spanik P. Short-Term and Long-Term Variability of Antenna Position Due to Thermal Bending of Pillar Monument at Permanent GNSS Station. *Reports on Geodesy and Geoinformatics*. 2016. Vol. 100, No. 1. P. 67–77. URL: https://doi.org/10.1515/rgg-2016-0007.

11. Pavlyk V. G., Kutnyi A. M., Babych T. M., Borysyuk O. V. The results of monitoring the vertical land motion at the geodynamic polygons of Poltava Gravimetric Observatory. *16th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment, Monitoring*. 2022. URL: https://doi.org/10.3997/2214-4609.2022580100.

12. Павлик В. Г., Кутний А. М., Нестеренко С. В. Визначення локальних вертикальних рухів перманентної GPS-станції у Полтаві. *XIII Міжнар. наук.-практ. конф. «Академічна й університетська наука: результати та перспективи».* Полтава: НУПП, 2020. С. 141–145.

13. Khalyavina L. Ya. Geodynamic studies at the Poltava Gravimetric Observatory based on astrometric and GPS observations. *Geofizychnyi Zhurnal*. 2025. 47(2). 339–343. URL: https://doi.org/10.24028/gj.v47i2.322574.

14. EUREF Permanent GNSS Network. URL: https://epncb.oma.be/.

15. ASF Home. *Alaska Satellite Facility*. URL: https://asf.alaska.edu/.

16. SNAP. http://step.esa.int/downloads/6.0/installers/esa-snap_all_unix_6_0.sh.

17. Стецюк В. Екологічна геоморфологія України: навч. посіб. Київ: Вид. дім «Слово», 2010. 367 с.

18. Державна служба геології та надр України. URL: http://www.geo.gov.ua/overview-geological-card/.

19. ГНСС-група ГАО НАН України. URL: https://gnss.mao.kiev.ua/?q.

20. Nesterenko S. V., Pavlyk V. G., Mishchenko R. A. Analysis of vertical movements of the permanent GNSS–station POLV on the base of satellite data and leveling. *Geodesy, cartography and aerial photography. Interdepartmental scientific and technical collection.* 2023. Vol. 97. 46–55. URL: https://doi.org/10.23939/istcgcap2023.97.046.

21. Braun A., Veci L. Sentinel-1 Toolbox. Intereferometry Tutorial. 2021. 25 p.
22. Метеопост – Архів погоди. URL: https://meteopost.com/weather/archive/.
23. Масовані ракетні атаки рф: як змінювалася динаміка та інтенсивність. *Слово і Діло*. URL: https://www.slovoidilo.ua/2023/10/30/ infografika/bezpeka/masovani-raketni-ataky-rf-yak-zminyuvalasya-dynamika-ta-intensyvnist.

Нестеренко Світлана Вікторівна, кандидат технічних наук, доцент кафедри автомобільних доріг, геодезії, землеустрою та сільських будівель, Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка». Тел.: +38 (050) 268-17-92. E-mail: ab.Nesterenko_SV@nupp.edu.ua. ORCID iD: 0000-0002-2288-3524.
Міщенко Роман Анатолійович, кандидат технічних наук, доцент кафедри автомобільних доріг, геодезії, землеустрою та сільських будівель, Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка». Тел.: +38 (050) 180-00-87. E-mail: rom2014rom2014@gmail.com. ORCID iD: 0000-0003-1027-0541.

Nesterenko Svitlana, PhD (Tech), Associate Professor, department of Highways, Geodesy, Land Management and Rural Buildings, National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic». Tel.: +38 (050) 268-17-92. E-mail: ab.Nesterenko_SV@nupp.edu.ua. ORCID iD: 0000-0002-2288-3524.
Mishchenko Roman, PhD (Tech), Associate Professor, department of Highways, Geodesy, Land Management and Rural Buildings, National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic». Tel.: +38 (050) 180-00-87. E-mail: rom2014rom2014@gmail.com. ORCID iD: 0000-0003-1027-0541.

Статтю прийнято 30.06.2025 р.

УДК 528.4:332.3

ІНТЕГРАЦІЯ АНАЛОГОВОГО ТА ЦИФРОВОГО ЗНІМАННЯ В СИСТЕМАХ ЗЕМЛЕУСТРОЮ: НОВІ МОЖЛИВОСТІ ДЛЯ ГЕОДЕЗИЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Д-р техн. наук В. О. Боровий, д-р пед. наук О. В. Браславська, викл. Т. А. Рожі

INTEGRATION OF ANALOG AND DIGITAL SURVEYING IN LAND MANAGEMENT SYSTEMS: NEW OPPORTUNITIES FOR GEODETIC RESEARCH

Dr. Sc. (Tech.) V. Borovyi, Dr. Sc. (Ped.) O. Braslavska, Lecturer T. Rozhi

DOI: https://doi.org/10.18664/1994-7852.212.2025.336377

Анотація. *У статті досліджено можливості поєднання традиційних геодезичних методів із сучасними технологіями. Інтеграція аналогових і цифрових методів дала змогу досягти сантиметрової точності геопозиціонування знімків із БПЛА, що підтверджено порівняльним аналізом за контрольними точками. Рівномірне розміщення опорних точок забезпечило зниження похибок до 10 см для ділянок до 20 м і до 1 м для протяжних ліній, що відповідає державним стандартам. Застосування БПЛА стало економічно вигідним, зменшивши витрати на 100 га порівняно з традиційними методами. Подальші дослідження передбачають удосконалення алгоритмів автоматизованої обробки даних БПЛА, урахування складних рельєфів і погодних умов, а також інтеграцію результатів у багаторівневі геоінформаційні системи для підтримки рішень у землеустрої.*

Ключові слова: *геодезичні дослідження, землеустрій, аналогове знімання, цифрове знімання, БПЛА, цифрова модель місцевості, електронні геодезичні прилади.*

Abstract. *In the context of Ukraine's transition to a digital model of land management, there is a growing need to integrate analog and digital methods to ensure high accuracy and efficiency of geodetic data. The problem of the fragmentation of tools and methods of data collection, as well as dependence on the human factor, emphasize the need to develop automated approaches to cadastral surveying. The aim is to analyze the effectiveness of integrating analog geodetic measurements (total stations, GNSS receivers) and digital technologies (UAVs, photogrammetric processing) to increase the accuracy of geopositioning images and create digital terrain models in the process of land management. The study was conducted in the Berdychiv district of Zhytomyr region (40.5 ha) using a DJI Phantom 4 Pro UAV, a Trimble M3 digital total station and Trimble R4 dual-frequency RTK-GNSS receivers. Aerial photography was performed using a three-route scheme from a height of 30 m, 50 images with a resolution of 1 cm/pixel were obtained. For georeferencing, 11 ground reference points were used, placed in groups of three with a distance of 50-100 m between groups. The data were processed in the GeoTerminal FREE software environment with subsequent photogrammetric processing to create orthophotomaps and point clouds. The integration of analog and digital methods made it possible to achieve centimeter accuracy of geopositioning of UAV images, which was confirmed by a comparative analysis of control points. Uniform placement of reference points ensured a reduction in errors to 10 cm for sections up to 20 m and to 1 m for extended lines, which meets state standards. The use of UAVs turned out to be economically beneficial, reducing costs per 100 hectares compared to traditional methods. Further research involves improving algorithms for automated UAV data processing, taking into account complex terrain and weather conditions, as well as integrating the results into multi-level geographic information systems to support management decisions in land management. Special attention will be paid to the vectorization of analog maps and the development of multi-scale cartographic models.*

Keywords: *geodetic surveys, land management, analog surveying, digital surveying, UAV, digital terrain model, electronic geodetic instruments.*

Вступ. Трансформація у сфері землевпорядкування України зумовлена необхідністю підвищення точності геопросторових даних, забезпечення ефективного управління земельними ресурсами та впровадження інноваційних технологій в аграрному, містобудівному та екологічному секторах. Особливої актуальності набуває питання інтеграції аналогового та цифрового знімання для проведенні геодезичних досліджень і землеустрою. Землеустрій як багатокомпонентна система охоплює комплекс технічних, економічних і правових заходів, спрямованих на дослідження стану земель, оптимізацію їх використання, просторову організацію території та забезпечення правової визначеності в земельних відносинах. У межах цього процесу реалізують роботи, пов'язані зі створенням нових земельних ділянок, упорядкуванням уже наявних меж, уточненням межової конфігурації та формуванням бази для раціонального землекористування фізичними і юридичними особами.

Значну увагу в системі землеустрою приділено виконанню топографо-геодезичних досліджень, які слугують базисом для точного визначення площі, конфігурації та координатного положення земельних ділянок. В умовах української реальності, де земельна реформа супроводжена активним упровадженням цифрових кадастрових технологій та оновленням правової бази, важливою передумовою успішного здійснення землевпорядних дій є синергія традиційних аналогових методів із сучасними цифровими інструментами, зокрема використання глобальних навігаційних супутникових систем (GNSS), безпілотних літальних апаратів (БПЛА), геоінформаційних систем (ГІС) і 3D-

моделювання. У процесі створення геодезичних і знімальних мереж, що використовують для побудови топографічних планів і цифрових моделей місцевості, реалізують знімання не лише меж земельних ділянок, а й підземних і наземних інженерних мереж, об'єктів забудови, зелених насаджень і транспортної інфраструктури. У міських, приміських, сільських і рекреаційних ландшафтах України такі дослідження здійснюють з урахуванням рельєфу, типу забудови, ступеня заліснення території, що потребує застосування як класичних інструментів (теодолітів, тахеометрів, нівелірів), так і сучасного обладнання для цифрового знімання та автоматизованої обробки даних.

Підсумком виконаних землевпорядних робіт стає створення ґрунтовної технічної документації – технічного звіту, який містить схеми планово-висотної основи, результати польових вимірювань, каталоги координат і висот, цифрову модель місцевості, детальні інженерно-топографічні плани та графічні матеріали в електронному вигляді. Ось такого виду інтегрована методика, що базована на поєднанні аналогового досвіду і цифрових інновацій, дає змогу досягти високого рівня достовірності просторових даних, оптимізувати витрати часу і ресурсів, а також забезпечити відповідність результатів геодезичних досліджень вимогам законодавства та сучасним викликам у сфері землеустрою.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Як зазначають у своєму дослідженні Кочеригін Л., Кімейчук І. [3], проблема невідповідності фактичного стану земельних об’єктів у межах населених пунктів України даним, що містяться в державних кадастрових базах, є надзвичайно актуальною, адже в окремих випадках розбіжності сягають від 5 до 20 % загальної кількості об’єктів. Автори звертають увагу на те, що ці системні похибки мають прямий зв’язок із недостатнім рівнем впровадження сучасних інформаційно-геодезичних технологій у сферу землеустрою, особливо в малих і сільських громадах, де обмеженість фінансових ресурсів і дефіцит кваліфікованих кадрів не дають змогу здійснювати належне оновлення просторових даних.

На думку Ситника О., Безлатньої Л. [7], Фостер А., Рахімзаде-Баджіран П., Дейньо А., Вайскіттель А. [13], однією з першопричин критичної ситуації у сфері актуалізації даних про земельні ділянки є фрагментарне застосування цифрових методів знімання та нехтування можливостями інтеграції цих технологій із традиційними аналоговими підходами. Дослідники переконливо доводять, що лише поєднання польового аналогового знімання (із застосуванням класичних тахеометричних або нівелірних інструментів) із цифровими засобами позиціонування, фотограмметрією та геоінформаційними системами і формує достовірну, узгоджену та придатну для багатоцільового використання кадастрову інформацію, яка відповідає реальній ситуації для певної місцевості.

Автори роботи [8] зазначають, що землевпорядна практика в Україні потребує системного оновлення картографічної основи, адже значна частина об'єктів нерухомості зазнала змін у результаті реконструкції, перебудови або ліквідації, однак відповідні оновлення не були внесені до баз даних. У зв’язку з цим виникає потреба в реалізації комплексних топографо-геодезичних робіт, під час яких важливо не лише виконати знімання, а й забезпечити його точну геоприв’язку, інтеграцію з існуючими шарами геоінформації, а також розмежування цифрових і аналогових джерел просторових даних [23].

У дослідженні [16] запропоновано концептуальну модель оновлення системи землевпорядного забезпечення, в основі якої лежить синергетичне застосування аналогового та цифрового знімання, де перше виконує роль базового способу перевірки фактичного стану об’єкта на

місцевості, тоді як друге дає змогу автоматизувати обробку, зберігання, передавання й візуалізацію даних у межах єдиної геопортальної платформи. Автори наголошують, що інтеграція цих двох підходів у процесі землеустрою є не лише технічно доцільною, а й економічно виправданою в умовах децентралізації, коли територіальні громади отримали більше повноважень, але не завжди мають ресурс для повноцінного переходу на виключно цифрові технології. Отже, аналіз наукових праць свідчить про неповний консенсус серед фахівців у тому, що розв'язання проблеми достовірності кадастрових даних в Україні можливе лише за умов поєднання переваг аналогового знімання, що забезпечує перевірену точність, з функціональністю та оперативністю цифрового інструментарію у сфері землевпорядкування.

Визначення мети та завдання дослідження. Метою дослідження є обґрунтування та експериментальна перевірка ефективності інтеграції аналогових і цифрових методів знімання для сучасних геодезичних досліджень і землеустрою.

Завдання дослідження:

– проаналізувати технічні особливості та переваги застосування БПЛА і цифрових тахеометрів порівняно з традиційними інструментами;

– розробити схему оптимального поєднання аналогових і цифрових технологій для створення ортофотопланів, цифрових моделей рельєфу і тривимірних реконструкцій територій;

– обґрунтувати перспективи впровадження інтегрованих знімальних підходів у систему державного земельного кадастру та просторового планування.

Основна частина дослідження. Кадастрове знімання, що є основним етапом фіксації просторових характеристик земельних ділянок, традиційно виконують із застосуванням широкого спектра вимірювального обладнання, результати роботи якого фіксують у вигляді абрисів і графічних матеріалів на паперових носіях. При цьому всі геодезичні вимірювання здійснюють із прив'язкою до конкретних реперів або фіксованих точок на об'єктах нерухомості, з дотриманням встановлених меж допустимих похибок, зокрема не більше 10 см для вимірювань до 20 м і в межах 1/200 довжини для більш протяжних ліній, але не більше 1 м (рис. 1).

У практиці землеустрою України, залежно від цілей знімання, застосовують різні способи фіксації контурів ділянок: з'єднувальні лінії, перпендикуляри, тріангуляцію, обходи тощо, що дає змогу адаптувати процедури під конкретну місцевість і конфігурацію об'єктів. Однак, попри технологічну різноманітність приладів, від класичних тахеометрів і геодезичних рейок до високоточних компараторів, автоматизованих робочих станцій і лазерних сканерів, загальною проблемою залишається те, що ці інструменти часто не забезпечують єдиної логіки збору й обробки даних. Багато аналогових пристроїв не мають цифрових модулів або внутрішньої пам'яті, що ускладнює подальшу інтеграцію результатів у єдину базу геоданих [4].

За спостереженнями українських фахівців, така розрізненість у засобах збору та фіксації даних потребує від геодезиста багатоетапного узгодження позицій приладів і подальшого зведення результатів із різних джерел у спільну таблицю для обробки. Це у свою чергу не лише може уповільнити весь процес знімання, а й підвищити ймовірність похибок, що виникають через людський фактор, складність позиціонування приладів на одній і тій самій висоті або координаті, а також технічні обмеження самих пристроїв [5]. У зв'язку з цим усе більше уваги приділяють впровадженню автоматизованих геодезичних комплексів, що поєднують функції точного знімання, цифрової обробки та візуалізації результатів у режимі реального часу (рис. 2).

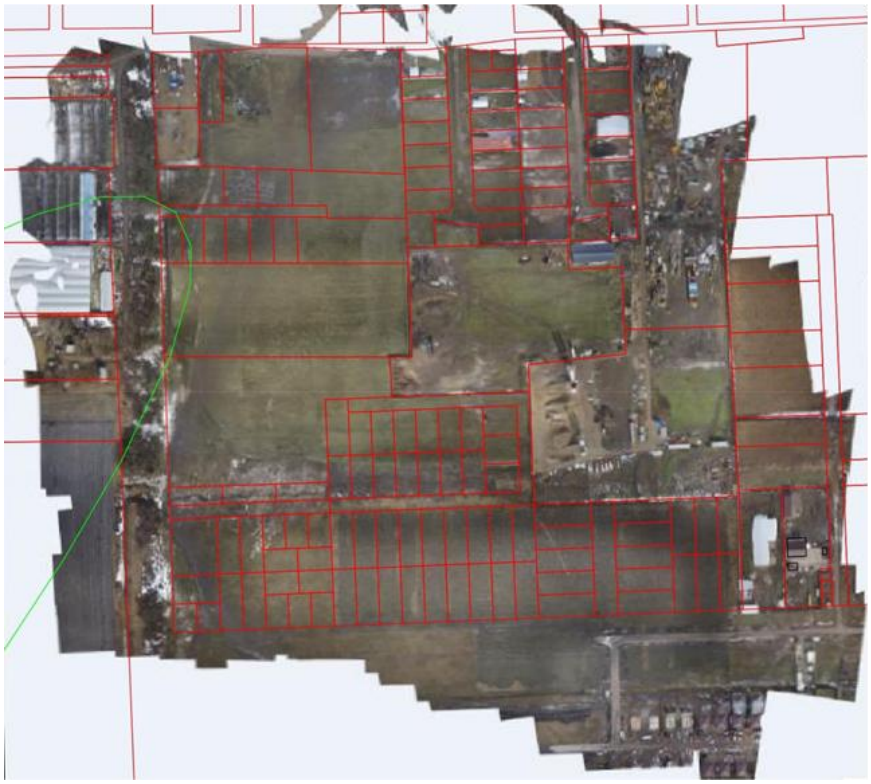
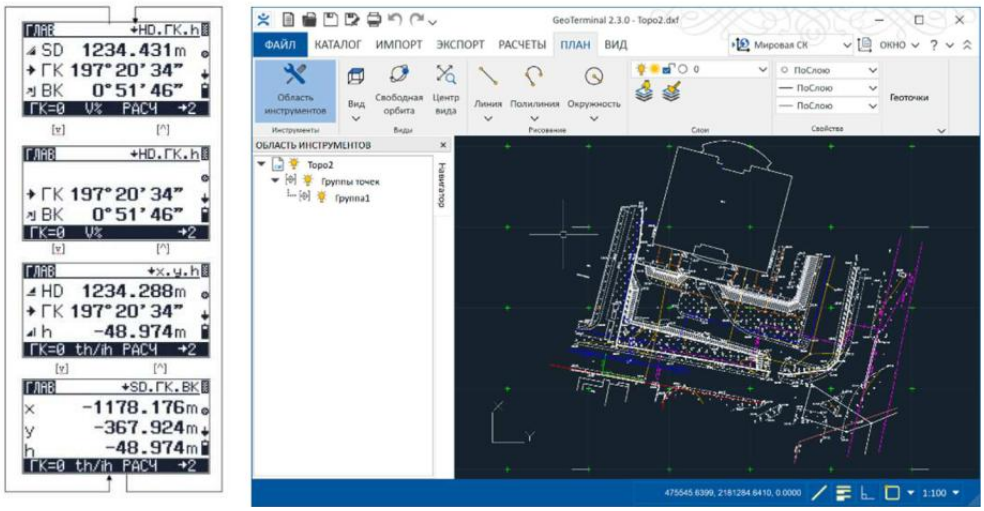


Рис. 1. План території площею 40,5 га (територія Бердичівського району Житомирської області), створений на основі інтеграції цифрового знімання з інформацією державного кадастру. Червоним позначено межі земельних ділянок, зеленим – зони з особливими умовами використання території, чорним – контури будівель і споруд [2]



а) б)

Рис. 2. Інтеграція даних цифрового тахеометра Trimble M3 у процесі геодезичних знімальних робіт: а – виведення інформації на дисплеї приладу; б – обробка результатів знімання у програмному середовищі GeoTerminal FREE [17]

Зокрема, сучасні цифрові тахеометри з вбудованими блоками обробки та дисплеями дають змогу не лише підвищити оперативність вимірювань, а й зменшити потребу в наступній обробці даних. Остаточні результати: кадастрові плани, технічна документація, карти і схеми, уже формують автоматично на основі звітних таблиць у спеціалізованому програмному забезпеченні, що сприяє високій точності, відповідності державним стандартам і значно знижує ризик помилок. У контексті активного розвитку геодезичних і землевпорядних технологій в Україні, особливо в умовах переходу до цифрової моделі управління земельними ресурсами, дедалі більшого значення набуває впровадження легких безпілотних літальних апаратів (БПЛА) як інструменту, що забезпечує ефективну інтеграцію аналогового та цифрового знімання в єдиний процес збору геопросторових даних.

Як свідчить сучасна практика, застосування БПЛА з максимальною злітною масою до 30 кг є економічно доцільним варіантом для проведення широкомасштабних кадастрових і топографо-геодезичних робіт, оскільки поєднує в собі прийнятну вартість, мобільність і високу продуктивність [20].

При цьому вибирають конкретну модель БПЛА і методику знімання виходячи з технічного завдання, типу об’єкта дослідження, особливостей рельєфу, погодних умов і необхідної точності кінцевого результату. Запуск безпілотника неможливий без попереднього розроблення польотного завдання, що включає етапи планування маршруту, підготовки до польоту, контролю під час виконання завдання (із можливістю вносити оперативні корективи), а також обробки отриманих результатів уже після завершення польоту. Зокрема, саме на цьому етапі відбувається зчитування та обробка аерофотознімків, фіксація координат знімальних центрів і верифікація за опорними точками.

Ефективність використання БПЛА значною мірою залежить від масштабу запланованих робіт: для масштабу 1:500 безпілотник здатний охопити територію до 5 км² за один виліт, тоді як для масштабу 1:2000 ця площа може досягати 15 км². Слід зазначити, що загальна вартість робіт із застосуванням БПЛА, включаючи знімання, створення ортофотопланів і цифрових моделей місцевості, у перерахунку на 100 га є значно нижчою, ніж у разі використання традиційних геодезичних методів, які залишаються витратнішими за обсягом необхідної робочої сили, часу та ресурсів (рис. 3).

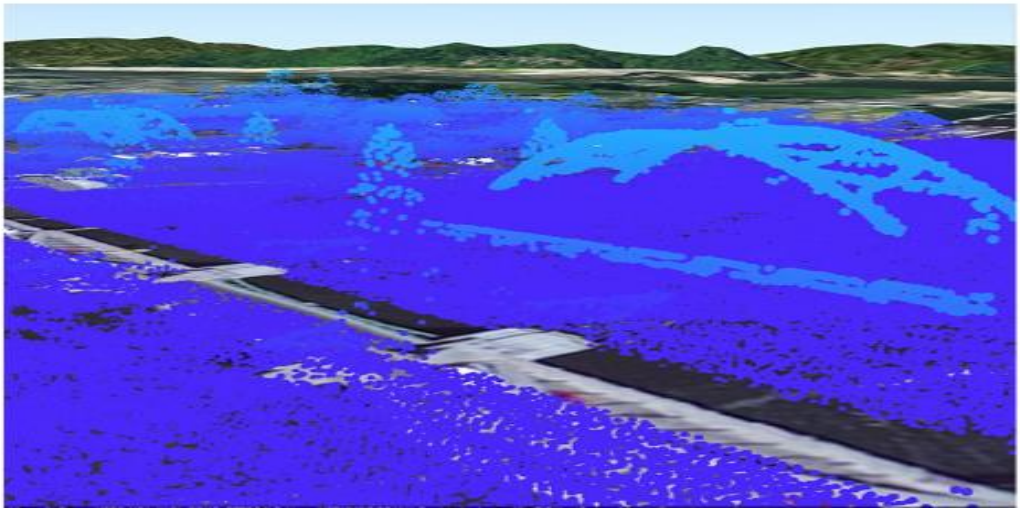


Рис. 3. Хмара точок, отримана в результаті інтегрованого аналогового та цифрового знімання земельної ділянки [15]

У межах дослідження було виконано комплексне аерофотознімання з застосуванням безпілотного літального апарата DJI Phantom 4 Pro (рис. 1), який забезпечує високу точність цифрового знімання завдяки вбудованій камері з високим розрізненням і стабілізованою платформою. Польоти здійснювали за тримаршрутною схемою, кожен із маршрутів мав довжину приблизно 900 м, а висота, на якій здійснювали фотографування, становила близько 30 м, що дало змогу досягти просторового розрізнення зображень на рівні близько 1 см на піксель [14]. Знімання проводили на території і навколо селища Іванопіль, Бердичівського району Житомирської області.

Під час знімання було отримано 50 високоякісних цифрових зображень, які охоплювали всю досліджувану ділянку. Для забезпечення точності геоприв'язки та подальшої фотограмметричної обробки використовували 11 наземних опорних точок, які були рівномірно розташовані групами по всій площі обстеження. Кожна група складалася з трьох точок, і такі групи були розміщені на відстані 50–100 м одна від одної вздовж маршрутів польоту. При цьому всередині кожної групи відстань між точками сягала приблизно 20 м у поперечному напрямку маршруту, ширина якого становила 90 м (дані наведено в таблиці) [17].

Таблиця

Вихідні дані для оцінювання точності геопозиціонування знімків з інтеграцією аналогового та цифрового знімання з БПЛА [6, 21]

Секція	Група тестування	Кількість опорних точок	Кількість контроль-них точок	Кількість маршрутів	Особливості розміщення точок / Примітки
A	A1	–	–	1	Пряме геопозиціонування (без опорних точок)
	A2	0	34	2	Аналіз точності без використання опорних точок
	A3	–	–	3	–
B	B1	–	–	1	Локалізоване розміщення опор-них точок на початку маршруту
	B2	3	31	2	Нерівномірне покриття зони знімання
	B3	–	–	3	–
C	C1	–	–	1	Часткове рівномірне покриття
	C2	6	28	2	Опорні точки рівномірно розміщені
	C3	–	–	3	–
D	D1	–	–	1	Рівномірне розміщення по всьому зніманню
	D2	12	22	2	Підвищена щільність опорних точок
	D3	–	–	3	–
E	E1	–	–	1	Повне використання опорних точок
	E2	34	0	2	Класичне непряме геопозиціонування
	E3	–	–	3	–

Окрему увагу було приділено трьом контрольним опорним точкам (48-2, 50 і 51), які були винесені на лівий край зони дослідження, як показано на рис. 2. Ці точки були використані для порівняльного аналізу точності різних методів геопозиціонування і дали змогу якісно оцінити ефективність інтеграції аналогових вимірювань із цифровими даними, отриманими з БПЛА. Для визначення точних координат усіх опорних точок застосовано систему супутникового позиціонування RTK-GNSS із використанням двочастотних приймачів Trimble R4, що забезпечує сантиметрову точність визначення просторових координат у реальному часі (рис. 4) [22].

Рис. 4. Ортофотоплан, створений на основі інтеграції цифрового знімання з БПЛА (отримано авторами)

Разом із тим, незважаючи на переваги, слід ураховувати й певні обмеження, зокрема залежність точності польоту від погодних умов, особливо вітру, що зумовлює необхідність забезпечення високого ступеня перекриття знімків вже понад 80 % у поздовжньому і понад 40 % у поперечному напрямках. Також у випадках, коли рельєф надто складний або просторових маркерів недостатньо, виникає потреба в залученні традиційних аналогових методів для уточнення координат і геометричних характеристик ділянок. Використання супутникових навігаційних систем і високоточних сенсорів на борту БПЛА дає змогу отримувати цифрові знімки з надвисоким просторовим розрізненням, які в подальшому обробляють в автоматизованих фотограмметричних програмних комплексах (рис. 5).

У переважній більшості випадків цю обробку здійснюють автоматично, хоча низку основних операцій усе ще необхідно проводити вручну. Вихідними даними для фотограмметричної обробки є не лише самі зображення, але й координати центрів фотографування та наземні опорні точки. У результаті комплексної обробки отримують такі цифрові продукти, як хмари точок, тривимірні моделі рельєфу, ортофотоплани та цифрові моделі місцевості, які можуть бути інтегровані в загальнодержавні геоінформаційні системи [19].

Рис. 5. Тривимірна модель місцевості, сформована в результаті обробки даних цифрового знімання з БПЛА (отримано авторами)

У межах підходу для інтеграції аналогового та цифрового знімання з проведенням геодезичних досліджень і землеустрою створення цифрової моделі території розглядають як багатоступеневий процес, що охоплює низку взаємопов'язаних етапів, спрямованих на формування єдиного інформаційного середовища з високою точністю і актуальністю просторових даних [1]. Першим і надзвичайно важливим етапом цього процесу є векторизація аналогових картографічних джерел, тобто перетворення наявних друкованих матеріалів у цифрову форму шляхом отримання растрових зображень і їх подальшого перекодування у векторні структури. Відмінною особливістю цього етапу є той факт, що вихідна інформація, отримана з архівних топографічних або тематичних карт, часто містить застарілі відомості, які потребують уточнення та актуалізації [18]. Водночас використання таких джерел дає змогу суттєво зменшити витрати часу та ресурсів, особливо з масштабним картографуванням великих за площею територій, зокрема робота з картами середнього, дрібного або оглядового масштабів (від 1:200 000 до 1:1 000 000 і дрібніших), де реальні зміни на земній поверхні не мають суттєвого впливу на загальну структуру зображення, окрім оновлень транспортної мережі, контурів лісових масивів, сільськогосподарських угідь або нових елементів інженерної інфраструктури (ліній електропередач, газопроводів, трубопроводів тощо) (рис. 6).

Другим основним етапом є побудова цифрових моделей території на основі результатів сучасного аналого-цифрового знімання, зокрема польових геодезичних робіт і аерофотознімання з використанням БПЛА. Завдяки широкому впровадженню автоматизованих геодезичних приладів (цифрових тахеометрів, GNSS-приймачів, лазерних сканерів) цей процес виконуваний у напівавтоматизованому режимі, що дає змогу в реальному часі створювати електронні абриси, передавати їх на комп'ютери й одразу генерувати цифрові моделі рельєфу або поверхні, які слугують основою для подальшого землеустрою або кадастрового картографування [22].

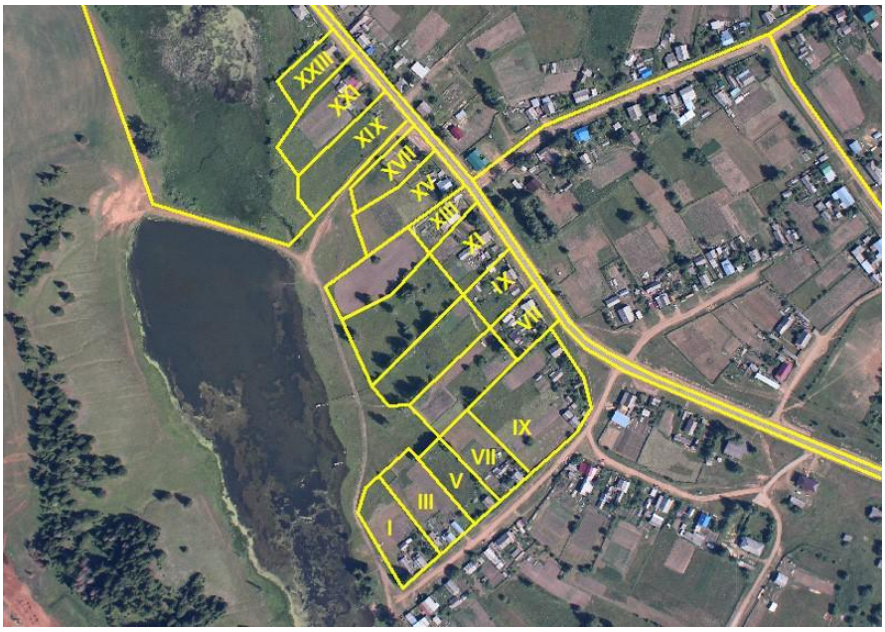


Рис. 6. Матеріали аерофотознімання з БПЛА, оброблені в рамках інтеграції аналогового та цифрового знімання для потреб кадастрової діяльності та землеустрою (отримано авторами)

Третій важливий етап передбачає тематичне картографування на основі комплексного аналізу розрізнених баз даних природничого, технічного, соціального та екологічного змісту. Зокрема, це можуть бути карти ґрунтів, які широко застосовують для кадастрового оцінювання, агровиробничого групування земель, просторового зонування або моніторингу змін у землекористуванні. Додатковими джерелами є карти щільності населення, кліматичних параметрів (температури, вологості), типів рослинності, антропогенного навантаження або екологічного стану довкілля, які підлягають інтеграції в єдину геоінформаційну основу для підтримки управлінських рішень у сфері землеустрою.

Завершальним етапом є створення багаторівневих мультимасштабних карт, які дають змогу користувачеві працювати з просторовими об'єктами в різних масштабах з урахуванням специфіки завдань. Цей процес передбачає збирання первинних картографічних матеріалів для визначеної території; приведення всіх зібраних матеріалів до єдиної системи координат, а також розроблення структури карти, оформлення легенди, формування окремих тематичних шарів. Для підвищення точності та зручності візуалізації картографічних об’єктів доцільним є поділ інформації на окремі групи залежно від змісту, призначення та рівня деталізації із подальшим налаштуванням параметрів відображення кожної групи відповідно до масштабу карти, що забезпечує точність і зрозумілість відображення навіть з великим охопленням території.

Висновки. У роботі було досліджено особливості взаємодії традиційних аналогових методів геодезичного знімання, зокрема класичного кадастрового знімання, що передбачає використання таких приладів, як теодоліти, тахеометри, а також графічні матеріали у вигляді абрисів, із сучасними цифровими технологіями, серед яких на перше місце виходять безпілотні літальні апарати (БПЛА), GNSS-приймачі та автоматизовані геодезичні системи, що забезпечують значно вищу точність, швидкодію та можливість комплексної обробки отриманих даних. Розглянуто послідовність підготовки та проведення польових знімальних робіт, у рамках якої

окремо проаналізовано алгоритм формування польотного завдання для БПЛА, з урахуванням не лише технічних параметрів апаратури, але й особливостей території, а також принципи встановлення наземних опорних точок, що є основним елементом для забезпечення високої точності геопозиціонування, а також різні методи контролю якості отриманих результатів.

Запропоновано узагальнену структурно-функціональну модель реалізації поетапної інтеграції аналогових і цифрових методів знімання, спрямовану на створення ортофотопланів, хмар точок, тривимірних моделей місцевості та інших геопросторових даних, придатних для подальшого використання в геоінформаційних системах державного рівня. Крім того, авторами розроблено науково обґрунтований методичний підхід для формування цифрових мультимасштабних карт, який передбачає послідовне виконання кількох основних етапів: векторизацію сучасних аналогових джерел даних, автоматизовану побудову моделей рельєфу на основі результатів БПЛА-знімання, тематичне картографування з використанням різноманітних шарів екологічних, демографічних і аграрних, а також організацію гнучкої структури відображення географічних об’єктів, адаптованої до конкретного масштабу та функціонального призначення карти, що забезпечує максимальну корисність і актуальність кінцевого продукту для різних категорій користувачів.

Список використаних джерел

1. Ворох В. В., Зацерковний В. Використання безпілотних літальних апаратів в задачах прецизійного землеробства. *Технічні науки та технології*. 2024. № 4(38). С. 336-349. DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2024-4(38)-336-349.
2. Дружинін Є. А., Ковалевський М. І., Погудіна О. К., Черановський В. О. Методи та інформаційні технології впровадження безпілотних літальних апаратів в повітряний простір України. *Системи озброєння і військова техніка*. 2021. № 4(68). С. 84–90. DOI: https://doi.org/10.30748/soivt.2021.68.12.
3. Кочеригін Л. Ю., Кімейчук І. В. Геоінформаційний моніторинг змін вкритих лісовою рослинністю лісових ділянок Черкаської області за радарними даними. *Вісник Малинського фахового коледжу*. 2023. Вип. 2. С. 157–174.
4. Македон В. В., Байлова О. О. Планування і організація впровадження цифрових технологій в діяльність промислових підприємств. *Науковий вісник Херсонського державного університету. Серія «Економічні науки»*. 2023. Вип. 47. С. 16-26. DOI: 10.32999/ksu2307-8030/2023-47-3.
5. Могильний С. Г., Хайнус Д. Д., Виноградeнко С. О. Аналіз точності кадастрових зйомок із застосуванням БПЛА. *Український журнал прикладної економіки та техніки.* 2024. Т. 9. № 1. С. 146-151. DOI: https://doi.org/10.36887/2415-8453-2024-1-24.
6. Папуша Д. Я., Оболонков Д. Ф. Автоматизація процесів обробки геодезичних даних за допомогою штучного інтелекту та машинного навчання. *Збірник наукових праць ДонНАБА*. 2024. № 1(32). С. 36-41.
7. Ситник О., Безлатня Л. Аналіз сучасних методів і засобів для обстеження та виконання великомасштабного геодезичного знімання меліорованих земель. *Природничі науки та природокористування*. 2024. Вип. 1. С. 112–113.
8. Шевчук С. М., Прокопенко Н. І., Рожі Т. А. Аналіз використання геодезичних даних при плануванні та моніторингу агроландшафтів: оптимізація землекористування та охорони природи. *Кадастр, землеустрій та управління земельними ресурсами*. 2024. № 7. С. 445–458. DOI: https://doi.org/10.32347/2786-7269.2024.7.445-458.

9. Кирилюк В., Рожі Т., Харів В. Геодезичне планування в агроландшафті: створення цифрових карт та моделей для оптимізації землекористування. *Просторовий розвиток*. 2023. (6). С. 293–308. DOI: https://doi.org/10.32347/2786-7269.2023.6.293-308.

10. Боровий В., Браславська О., Рожі Т. Супутникове та БПЛА-знімання як інструменти моніторингу земельних ресурсів: сучасні технології та їх застосування в Україні. *Технічні науки та технології*. 2025. (1 (39), С. 315–327. DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-1(39)-315-327.

11. Браславська О., Дець Т., Рожі Т. Роль геодезії у розвитку дрон-технологій для вимірювання, картографування та моніторингу територій. *Просторовий розвиток*. 2023. (5), С. 268–285. DOI: https://doi.org/10.32347/2786-7269.2023.5.268-285.

12. Рожі І., Рожі Т., Федій О. Геодезичні аспекти створення цифрових моделей рельєфу для потреб геоінформаційних систем. *Просторовий розвиток*. 2024. (8). С. 477–491. DOI: https://doi.org/10.32347/2786-7269.2024.8.477-491.

13. Foster A., Rahimzadeh-Bajgiran P., Daigneault A., Weiskittel A. Cost-effectiveness of remote sensing technology for spruce budworm monitoring in Maine, USA. *Forests Monitor*. 2024. 1(1):66–98. DOI: https://doi.org/10.62320/fm.v1.i1.14.

14. Kudaibergenov O. Analysis of the Use of Satellite Data and Drones for Land Monitoring in Kazakhstan. Preprints. 2024. DOI: 10.20944/preprints202410.1229.v1.

15. Landsat 8. URL: https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-8.

16. Liu C., Li X., Xue Y., Lu W., & Zhang C. Development and applications of an integrated space-air-ground observation network in natural resource monitoring and supervision. *E3S Web of Conferences*. 2024. No 520. 04018. DOI: https://doi.org/10.1051/e3sconf/202452004018.

17. Makam S., Komatineni B. K., Meena S. S., et al. Unmanned Aerial Vehicles (UAVs): An Adoptable Technology for Precise and Smart Farming. *Discover Internet of Things.* 2024. № 4. С. 12. DOI: https://doi.org/10.1007/s43926-024-00066-5.

18. Makedon V., Myachin V., Plakhotnik O., Fisunenko N., Mykhailenko O. Construction of a model for evaluating the efficiency of technology transfer process based on a fuzzy logic approach. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2024. No 2(13(128)). P. 47-57. DOI: https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.300796.

19. Omer A. A., Akbari D. Smart Farming Platform Using IoT and UAVs. *Iraqi Journal for Computers and Informatics*. 2024. No 50(1). P. 151-171. DOI: https://doi.org/10.25195/ijci.v50i1.464.

20. Sun J., Yuan G., Song L., Zhang H. Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) in Landslide Investigation and Monitoring: A Review. *Drones*. 2024. No 8(1). P. 30. DOI: https://doi.org/10.3390/drones8010030.

21. Tomczyk A. M., Ewertowski M. W., Creany N., Ancin-Murguzur F. J., Monz C. The application of unmanned aerial vehicle (UAV) surveys and GIS to the analysis and monitoring of recreational trail conditions. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2023. No 118. P. 103474. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jag.2023.103474.

22. Van Alphen R., Rains K. C., Rodgers M., Malservisi R., & Dixon T. H. UAV-based wetland monitoring: Multispectral and Lidar fusion with random forest classification. *Drones*. 2024. No 8(3). P. 113. DOI: https://doi.org/10.3390/drones8030113.

23. Xing J., Sun S., Huang Q., Chen Z., Zhou Z. Application of Geoinformatics in Forest Planning and Management. *Forests*. 2024. 15(3). P. 439. DOI: https://doi.org/10.3390/f15030439.

Боровий Валентин Олександрович, доктор технічних наук, професор кафедри географії, геодезії та землеустрою, Уманський державний педагогічний університет імені Павла Тичини (Умань, Україна).
E-mail: v.o.borovyi@udpu.edu.ua. ORCID: https://orcid.org/0009-0003-0965-63132.

Браславська Оксана Володимирівна, доктор педагогічних наук, професор кафедри географії, геодезії та землеустрою, Уманський державний педагогічний університет імені Павла Тичини (Умань, Україна).
E-mail: oksana.braslavska@udpu.edu.ua. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0852-686X3.
Рожі Томас Адальбертович, викладач кафедри географії, геодезії та землеустрою, Уманський державний педагогічний університет імені Павла Тичини (Умань, Україна). E-mail: tomas.rozhi.94@gmail.com.
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6794-9662. Tel.: +38 (096) 7529675.

Borovyi Valentyn Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Geography, Geodesy and Land Management Pavlo Tychyna Uman State Pedagogical University (Uman, Ukraine). E-mail: v.o.borovyi@udpu.edu.ua
ORCID: https://orcid.org/0009-0003-0965-63132.
Oksana Braslavska Doctor of Pedagogical Sciences, Professor of the Department of Geography, Geodesy and Land Management, Pavlo Tychyna Uman State Pedagogical University (Uman, Ukraine).
E-mail: oksana.braslavska@udpu.edu.ua. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0852-686X3.
Tomas Rozhi Lecturer at the Department of Geography, Geodesy and Land Management, Pavlo Tychyna Uman State Pedagogical University (Uman, Ukraine). E-mail: tomas.rozhi.94@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6794-9662 Tel.: +38 (096) 7529675.

Статтю прийнято 30.06.2025 р.

ЗАЛІЗНИЧНИЙ ТРАНСПОРТ (273)

УДК 629.463.65:621.863

**Присвячено світлій пам'яті автора винаходу,
доктора технічних наук, завідувача кафедри вагонів, УкрДАЗТ (УкрДУЗТ),
професора Головка Владислава Федоровича
(1997-2007)**

ВИВАНТАЖЕННЯ З ЗАЛІЗНИЧНИХ НАПІВВАГОНІВ НАСИПНИХ ВАНТАЖІВ УДОСКОНАЛЕНИМ СПОСОБОМ ПЕРЕКИДАННЯ

Кандидати техн. наук Р. І. Візняк, В. В. Бондаренко

UNLOADING BULK CARGOES FROM RAILWAY GONDELLA CARS USING AN IMPROVED TIPPING METHOD

**PhD (Tech.), Associate Professor R. Viznyak,
PhD (Tech.), Associate Professor V. Bondarenko**

DOI: https://doi.org/10.18664/1994-7852.212.2025.336410

Анотація. *Як відомо, для найбільш ефективного вивантаження насипних і навалювальних вантажів із залізничного рухомого складу, а саме напіввагонів (НПВ), у морських і річкових портах, на електростанціях і промислових підприємствах України ще з середини 60-х років минулого століття широко застосований найбільш сучасний і продуктивний спосіб розвантаження НПВ за допомогою вагоноперекидачів (ВП) через використання, як здобутку важкого машинобудування, стаціонарних роторних вагоноперекидачів. Принцип розвантаження найзатребуванішого нетягового рухомого складу залізниць – НПВ – способом перекидання було введено на промислових підприємствах ще під час інтенсивної індустріалізації за німецьким досвідом і постачання цієї техніки і тепер успішно здійснюється за допомогою спеціальних технічних пристосувань – стаціонарних вагоноперекидачів роторного типу (СРВП). Збереження вагонного парку завжди мало важливе значення, і в сучасній площині використання державної власності це не є виключенням, а залишається злободенним, у тому числі для сучасних власників та операторів вантажного рухомого складу. Головною причиною пошкоджень несучої конструкції НПВ є недотримання чіткості змісту керівних нормативних документів під час виконання вантажно-розвантажувальних робіт із вантажним рухомим складом. Але на сьогодні за принципом перекидання на ВП і виробничими здобутками СРВП уже розроблені мобільні підвісні системи, а сам принцип дії покладений в основу конструкцій вагоноперекидачів підвісного типу (ВПТ). Дослідженню і застосуванню альтернативного та удосконаленого ВПТ3 присвячено матеріал цієї статті.*

Ключові слова: *напіввагон, кузов, вивантаження, насипний вантаж, пошкодження, збереження, міцність, альтернативне удосконалення, вагоноперекидач підвісного типу.*

Abstract. *As you know, for the most efficient unloading of bulk and bulk cargo from railway rolling stock, namely semi-wagons, in sea and river ports, power plants and industrial enterprises in Ukraine. Since the middle of the 60s of the last century, the most modern and productive method of*

unloading liquid waste with the help of transfer wagons (WT) has been widely used, by using stationary rotary car transfer machines as a byproduct of heavy engineering. The principle of unloading the most in-demand, non-traction rolling stock of railways, namely the NPV, by means of tipping - was introduced at industrial enterprises in the last century, during intensive industrialization based on the German experience, and the supply of this equipment, and nowadays it is successfully carried out with the help of special technical devices - stationary rotary-type wagon tippers (SRVP). The preservation of the wagon fleet has always been important, and in the modern sphere of use of state property, this is not an exception, but remains a topical issue, including for modern owners and operators of freight rolling stock. The main cause of damage to the supporting structure of the LV is non-compliance with the strictness of the content of the governing normative documents during loading and unloading operations with rolling stock. But nowadays, on the basis of the principle of tipping on VP, and using the production achievements of SRVP, mobile suspension systems have already been developed, and their principle of operation is the basis of the designs of suspension-type wagon tippers (VPT). The material of this article is devoted to the study and application of alternative and improved VPT3.

Keywords: *gondola car, body, unloading, bulk cargo, damages, preservation, strength, alternative improvement, suspension type wagon transfer.*

Вступ. Для вивантаження з залізничного рухомого складу, частіше напіввагонів (НПВ), насипних і навалювальних вантажів у морських портах України, на електростанціях та інших промислових підприємствах перекиданням, чинними нормативними документами [1, 2] встановлено види пошкоджень несучої конструкції за завищених величин навантажень, що діють на НПВ, для розрахунків і проєктування нових вагонів і забезпечення рівня збереження з виконанням навантажувально-розвантажувальних робіт (НРР), і вже отримано розрахункові результати після проведених досліджень [3–5].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Відомо, що всі типи стаціонарних роторних вагоноперекидачів (СРВП) працюють за принципом обертання залізничного рухомого складу, найчастіше за експлуатації НПВ, навколо свого геометричного центра тяжіння, тому навантаження, що діють на несучу конструкцію кузова НПВ, можна враховувати за деякими наближеннями ідентичними. Усі види робочих навантажень уже підтверджені динамікою розвантажувального процесу і в результаті часто спричиняють різного роду наслідки – пошкодження несучої конструкції кузовів [6, 7].

Визначення мети та завдання дослідження. Головною метою досліджень є отримання даних для розвантаження НПВ на вагоноперекидачі (ВП) і врахування їх для доопрацювання, а саме вагоноперекидача підвісного типу третього варіанта (ВПТ3), конструкція якого опрацьована під час виїздів у морські порти Чорноморськ і Південний Одеської залізниці і удосконалена на кафедрі інженерії вагонів та якості продукції УкрДУЗТ [9, 10]. При цьому були поставлені такі основні завдання дослідження:

- ретельне практичне вивчення особливостей процесу взаємодії НПВ із робочими органами стаціонарних роторних вагоноперекидачів (СРВП), наприклад, останньої моделі, що перебуває в експлуатації, а саме ВРС-134, або його сучасної модернізованої модифікації ВРСМ-134;
- визначення показників напружено-деформованого стану кузова НПВ (універсального) з можливістю розвантаження на ВП;
- розроблення удосконаленої конструкції ВПТ3 за фактором мобільності, маневреності та можливості розвантаження кузовів НПВ за «прямим варіантом» у торгові судна водного транспорту;

Для проведення досліджень напружено-деформованого стану (НДС) кузова НПВ і виконання етапів математичного моделювання фізичного процесу ударного контакту кузова НПВ з привалочною плитою СРВП побудовано скінчено-елементну модель (СЕМ) кузова НПВ, наприклад, моделі 12-7023, який має універсальну конструкцію з розвантажувальними кришками люків у підлозі і експлуатований із можливістю розвантаження на ВП і за прямим варіантом – за допомогою ВПТ, на відміну від відомих попередніх конструкцій НПВ, які теж обладнані кришками розвантажувальних люків у підлозі і можуть бути розвантажені у класичний гравітаційний спосіб, але ніяк не використовуючи для цього грейферний спосіб, а тільки за дією кінематики розвантажувального руху, власної ваги сипких і навалювальних вантажів, тобто самовитікання.

Основна частина дослідження. На рис. 1, 2 наведені сучасна модернізована модифікація СРВП, ВРС-134 – ВРСМ-134 і розрахункова схема кузова НПВ за повертання платформи СРВП у початковий етап зміни кута повороту з розподіленням експлуатаційних навантажень поміж елементами кузова НПВ.

Рис. 1. Модернізована сучасна модифікація СРВП, ВРС-134 – ВРСМ-134

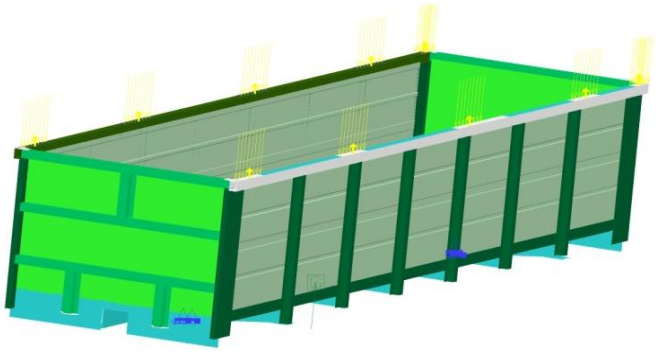


Рис. 2. Розрахункова схема кузова НПВ з поворотом платформи СРВП на початковому етапі зміни повного кута повороту

Вирішуючи завдання забезпечення рівня збереження міцності і надійності НПВ для завантажувально-розвантажувальних робіт (ЗРР), а також підвищення продуктивності розвантаження на кафедрі вагонів (нині інженерії вагонів та якості продукції) розроблено і запатентовано новий технічний засіб розвантаження НПВ – *вагоноперекидач підвісного типу другої модифікації (ВПТ2)*.

Аналізуючи отримані результати, опрацьовано графічні залежності конструкційних зон кузова НПВ, одну з яких подано на рис. 3, тобто залежності величини напружень і переміщень від положення відносно кута повороту системи СРВП-НПВ-НВ у середньому прогоні бокової стіни кузова НПВ.

За теоретичними положеннями і отриманими результатами [3, 4] стає можливим прогнозувати покращення параметрів напружено-деформованого стану для вибраного кузова сучасного НПВ глуходонної конструкції [8], наприклад більш ранньої моделі 12-791 побудови теж ПАТ КВБЗ.

На підставі заходів, направлених на забезпечення рівня збереження кузовів НПВ для виконання ЗРР, і проведених розрахунків міцності кузовів НПВ можна стверджувати, що паралельне застосування грейферного вивантаження у ЗРР спричиняє пошкодження елементів конструкції кузовів НПВ, зниження рівня збереження і надійності, тому в майбутньому необхідно альтернативно відмовитися від уже застарілої технології та удосконалити спосіб перекидання, що, на відміну від грейферного вивантаження, відрізняється значно меншим пошкодженням кузовів і більшою продуктивністю вивантаження.

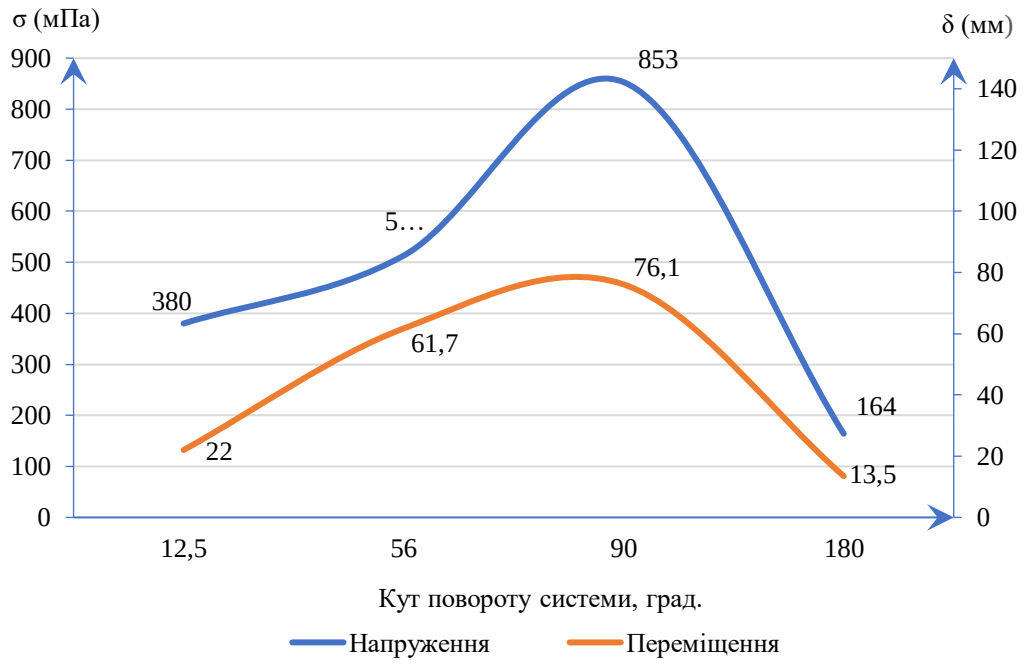


Рис. 3. Напруження і переміщення в середній секції кузова НПВ

Для вирішення завдання забезпечення збереження, міцності і надійності НПВ для ЗРР, а також підвищення продуктивності розвантаження на кафедрі вагонів УкрДУЗТ розроблено і запатентовано новий технічний засіб розвантаження НПВ – *вагоноперекидач підвісного типу (ВПТ)* – як попередньої, так уже і вдосконалених модифікацій *(ВПТ 1, 2 та 3)* [9-11].

ВПТ практично усуває всі недоліки роботи відомих машин і механізмів, призначених для розвантаження НПВ.

Спосіб перекидання за усуненням розглянутих недоліків, на відміну від грейферного і гравітаційного, супроводжується найменшою кількістю пошкоджень кузовів НПВ з вивантаженням, тому він був взятий за основу для розроблення і удосконалення ВПТ. Розробляли нові технічні і технологічні заходи за чинною Стратегією розвитку морських портів України на період до 2038 року і раніше Державною програмою і концепцією «Соціально-економічного розвитку морських портів і припортових станцій на 2002-2007 рр.», базова проєктно-конструкторська документація впроваджена у виробництво у 2005 році.

Додавання до удосконаленої конструкції ВПТ3 відмінних ознак від відомих модифікацій дає змогу отримати бажаний технічний результат, який полягає у зменшенні динамічних навантажень як на НПВ, так і конструкцію ВП, зниженні напружень в елементах конструкції кузова НПВ і ВП, зниженні кількості пошкоджень НПВ, а також підвищенні надійності і значному скороченні часу розвантаження за рахунок проходження тягових органів по кінцевих секціях кузова НПВ через спеціально встановлені колоподібні напрямні навколо торцевих стін, а також чотирьох пар тягових органів, закріплених на одному валу.

За обертального руху навколо центра ваги кузова НПВ значно зменшується перекидання вантажу, завдяки чому попереджують зростання динамічних навантажень на НПВ і несучу конструкцію ВПТ3, підвищується надійність, зменшується загальний час розвантаження.

Удосконалена конструкція ВПТ3 працює в запатентований спосіб [11]. Після подавання НПВ в зону розвантаження виконують усі допоміжні операції, під колісні пари встановлюють фіксуючі стаціонарні гальма, траверси разом із привалочною плитою і колоподібними і додатковими дугоподібними напрямними, закріпленими на спеціальній конструкції для їх з'єднання з протилежної бокової стіни НПВ, заздалегідь навішаними на гак крана вантажопідйомністю 100 т до кузова НПВ. При цьому використовують плавучий кран, наприклад високопотужний «Богатир», вантажопід'ємність якого 100 і 300 т (рис. 4). Привалочна плита на боковій стіні; комбіновані колоподібні напрямні жорстко закріплені до привалочної плити і поміж собою на торцевих стінах кузова НПВ; додаткові напрямні закріплені на привалочній плиті, спеціальна конструкція для з'єднання напрямних – на протилежній боковій стіні кузова НПВ (рис. 5). Після цього тягові органи, що закріплені зверху на барабанах механізму переміщення і підтримують, огинають кузов НПВ по кінцевих і шворневих перетинах і закріплені у відповідних вузлах з'єднання.

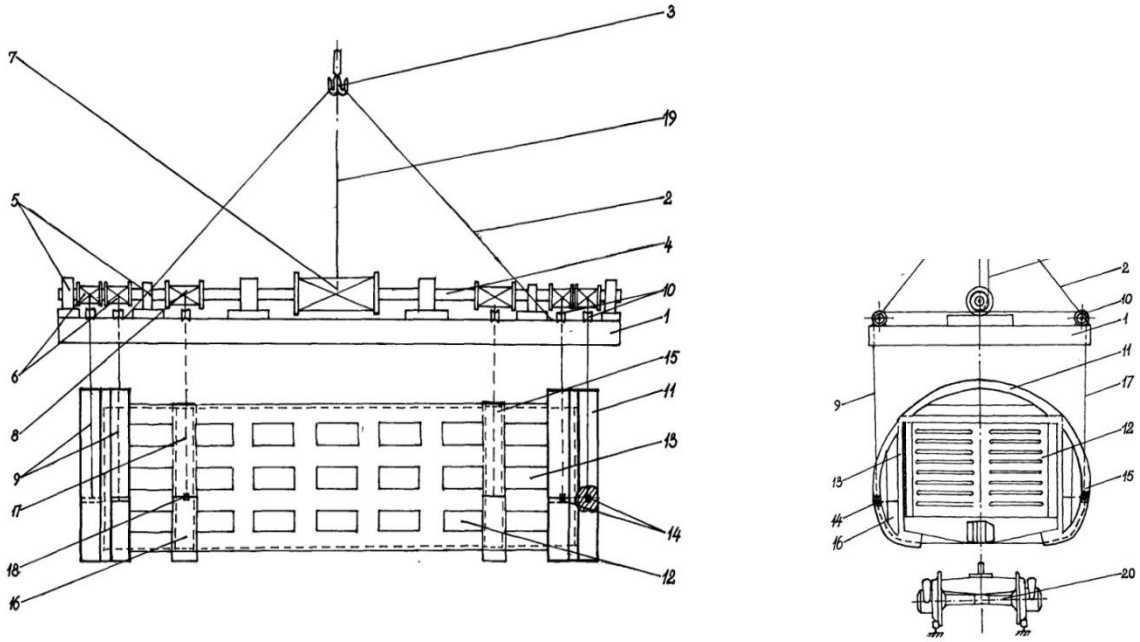
Після підготовчих робіт підтримувальні тягові органи через напрямні підводять під кінцеві і шворневі балки кузова НПВ і закріплюють у відповідних вузлах з'єднання напрямних і привалочної плити.

Механізмом піднімання крана переміщується закріплений у підвісній системі вагоноперекидача кузов НПВ, а візки залишаються на під'їзній колії.

Далі переміщують НПВ із вантажем до зони розвантаження. Вмикають привод механізму переміщення, відбувається обертальне переміщення привалочної плити разом із кузовом НПВ. Процес перекидання НПВ, саме поворот, показаний на рис. 6, відбувається навколо точок **А** і **А'**, розташованих на прямій **аа'**, яка проходить через центр ваги кузова НПВ із вантажем. З повним поворотом кузова НПВ на 180^0 закінчується процес перекидання зі звільненням від вантажу, точки закріплення основних і додаткових тягових органів – 1, 2, 3, 4, 5, 6 – переходять у точки 1', 2', 3', 4', 5', 6'. За допомогою реверсивної роботи привода відбувається зворотний обертальний рух кузова НПВ до зайняття початкового положення. Після цього кран підіймає рухому траверсу 1 із порожнім кузовом НПВ і переміщує його до під'їзної

колії з опусканням кузова на ходові частини. У зворотній послідовності роз'єднуються підтримувальні тягові органи від вузлів з'єднання з секціями – напрямними і привалочною плитою, їх виводять з-під кузова НПВ 12, а потім за допомогою привода крана знімають із його бокової стіни повністю всю підвісну систему ВПТ3, привалочну плиту з колоподібними і додатковими напрямними, закріпленими на спеціальній з'єднувальній конструкції. На цьому закінчується цикл вивантаження з НПВ сипкого вантажу, а сам НПВ, звільнений від підвісної системи ВПТ3, маневровим локомотивом переміщують з зони розвантаження.

Рис. 4. Плавучий кран «Богатир» вантажопідйомністю 100-300 т



а б

Рис. 5. ВПТ3, удосконаленої конструкції: а – вигляд спереду; б – вигляд зліва

ВПТЗ зменшує кількість пошкоджень кузовів НПВ і підвищує продуктивність вивантаження насипних і навалювальних вантажів, що негативно характеризує грейферне розвантаження і дасть змогу розвантажувати за прямим варіантом – у трюмний простір вантажних комерційних суден без проміжного перевантаження. ВПТЗ може бути використаний для вивантаження насипних, навалювальних і деяких штучних вантажів у залізнично-водному сполученні в морських і деяких річкових портах України. Процес розвантаження НПВ на ВПТЗ удосконаленої конструкції наведено на рис. 6.

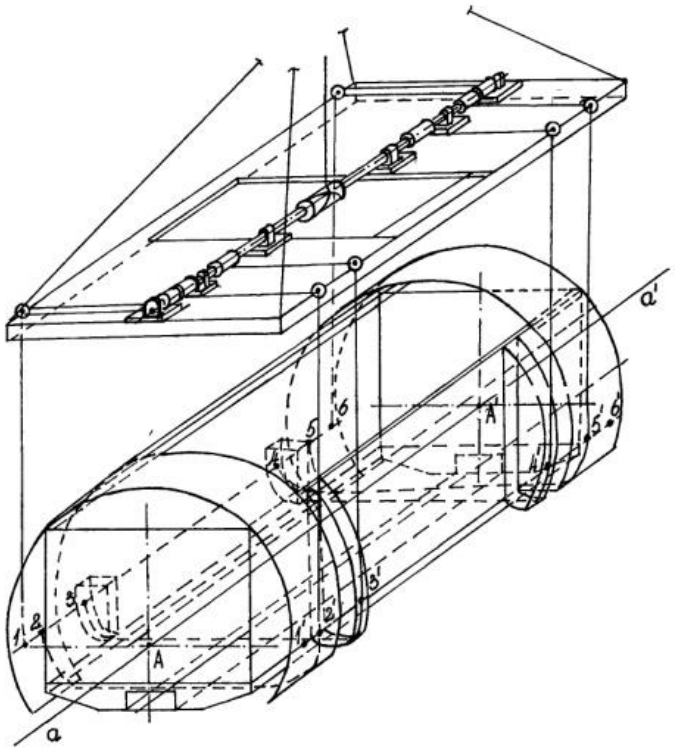


Рис. 6. Процес розвантаження НПВ на ВПТЗ удосконаленої конструкції

Практичне значення роботи. За проведеними дослідженнями і наведеним техніко-економічним обґрунтуванням практичної значущості ВПТЗ у залізнично-водному сполученні отримано державні патенти на винаходи [11, 12] з метою обов'язкового і своєчасного впровадження у вітчизняне виробництво України.

Висновки. За отриманими результатами можна зробити такі висновки:

- виконуючи науково-дослідні роботи зі створення ВПТЗ, вивчено особливості процесу взаємодії НПВ з робочими органами СРВП;

- проведено розрахунки міцності і визначено основні показники напружено-деформованого стану кузова універсального НПВ, з’ясовано, що він може бути задіяний для розвантаження на ВП різних типів;

- під час робочого перебування в українських морських портах Чорноморськ і Південний розроблено і запатентовано удосконалену модифікацію ВПТЗ.

Список використаних джерел

1. ДСТУ 7598:2014. Вагони вантажні. Загальні вимоги до розрахунків та проектування нових і модернізованих вагонів колії 1520 мм (несамохідних). Чинний від 2014-12-02. URL: http://uas.org.ua (дата звернення: 21.05.2021).

2. ДСТУ ГОСТ 22235:76:2010:2015. Вагони вантажні магістральних залізничних доріг колії 1520 мм. Загальні вимоги щодо забезпечення збереження під час завантажувально-розвантажувальних та маневрових робіт (ГОСТ 22235-2010, IDT). Чинний від 2010-11-12. Вид. офіц. Київ, 2015. 24 с. URL: https://docs.cntd.ru/document/1200082560 (дата звернення: 10.12.2023).

3. Розробка і дослідження технічних засобів для підвищення надійності вантажних вагонів і продуктивності вивантаження сипучих вантажів: звіт з НДР № 0104U003237 / В. Ф. Головко, Р. І. Візняк, В. В. Бондаренко та ін. Харків: УкрДАЗТ, 2006. 230 с.

4. Візняк Р. І. Визначення параметрів напружено-деформованого стану піввагона при розвантаженні роторним вагоноперекидачем. *Збірник наукових праць Укр. держ. ун-ту залізнич. трансп.* Харків: УкрДУЗТ, 2023. Вип. 204. С. 54-61. URL: https://kart.edu.ua/wp-content/uploads/2023/07/tht_zbirn_204.pdf.

5. Візняк Р. І. Визначення динамічних сил, що діють на піввагон при розвантаженні роторним вагоноперекидачем. *Збірник наукових праць Укр. держ. ун-ту залізнич. трансп*. Харків: УкрДУЗТ, 2023. Вип. 203. С. 35-44. URL: https://kart.edu.ua/wp-content/uploads/2023/04/tht_zbirn_203_2023.pdf.

6. Herzog M., Severin F., Wirtz R. Developing the high performance car dumper: Wagon dumper technology and its associated infrastructure; Part 1 [Article@Der Weg zum Hochleistungskipper: Die Technik der Waggonkipper und die notwendige Infrastruktur; Teil 1]. *Cement International*. 2021. 19 (2). P. 26-35. URL: https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85108105078&partnerID=40&md5=d2122b166bc0ec462ed18937643a5ab4 (last access: 10.12.2023).

7. Візняк Р. І. Дослідження особливостей взаємодії рухомого складу з технічними засобами вантажно-розвантажувальних робіт у залізнично-водному сполученні: грант Президента України для підтримки наукових досліджень молодих учених. Дог. № JP/F11/0070 від 21.01.2006 р. № 0106U004123. Харків: УкрДАЗТ, 2006. 144 с.

8. Піввагон з глухим кузовом: пат. 72360 Україна, № 72360 МПК[7] B61F 1/00, B61D 3/00 / Чепурченко І. В., Візняк Р. І. (Україна); УкрДАЗТ. № 201203065; заявл. 16.03.2012; опубл. 10.08.2012, Бюл. № 6. 9 с.

9. Вагоноперекидач: пат. 38112 Україна, МПК[7] B65G67 / 48 / Головко В. Ф., Венцель Є. С., Деркач І. А., Візняк Р. І. (Україна); УкрДАЗТ. № 1771-ІІІ; заявл. 30.05.2000; опубл. 16.12.2002, Бюл. № 12. 8 с. URL: https://uapatents.com/patents/viznyak-ruslan-ivanovich (last access: 10.12.2023).

10. Вагоноперекидач: пат. 74937(74938) Україна, МПК7 B65G67 / 48 / Головко В. Ф., Візняк Р. І., Головко Т. В. (Україна); заявл. 21.04.2004; опубл.15.02.2006, Бюл. № 2. 6 (9) с. URL: https://uapatents.com/patents/viznyak-ruslan-ivanovich (last access: 10.12.2023).

11. Вагоноперекидач: пат. 86988 Україна, МПК7 B65G67 / 48 / Головко В. Ф., Візняк Р. І., Бондаренко В. В., Хоменко В. С., Головко Т. В. (Україна); заявл. 21.04.2004; опубл. 16.06.2009, Бюл. № 11. 5 с. URL: https://uapatents.com/patents/viznyak-ruslan-ivanovich (last access: 10.12.2023).

12. Поромне судно для перевезення одиниць залізничного рухомого складу або контейнерів: пат. 85438 Україна, МПК7 B63B35/27/25/ Головко В. Ф., Візняк Р. І.,

Головко Т. В. (Україна); заявл. 26.03.2007; опубл.12.03.2009, Бюл. № 2. 4 с. URL: https://uapatents.com/patents/golovko-vladislav-fedorovich (last access: 05.11.2024).

Візняк Руслан Іванович, кандидат технічних наук, доцент кафедри інженерії вагонів та якості продукції, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0001-6179-4981. Тел.: (057)7301035, +380502308245. E-mail: viznyakruslan@kart.edu.ua.
Бондаренко В'ячеслав Володимирович, кандидат технічних наук, доцент кафедри інженерії вагонів та якості продукції, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0003-4019-4017. Тел.: (057)7301035, +380662508766. E-mail: bondarenko@kart.edu.ua.

Viznyak Ruslan, PhD (Tech), Associate Professor, Department of wagon engineering and product quality, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0001-6179-4981. Тел.: (057)7301035, +380502308245. E-mail: viznyakruslan@kart.edu.ua.
Bondarenko Viacheslav, PhD (Tech), Associate Professor, Department of wagon engineering and product quality, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0003-4019-4017. Тел.: (057)7301035, +380662508766. E-mail: bondarenko@kart.edu.ua.

Статтю прийнято 25.02.2025 р.

УДК 004.415.532

ВПРОВАДЖЕННЯ ІННОВАЦІЙ ДЛЯ ПОКРАЩЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОЇ ІДЕНТИФІКАЦІЇ РУХОМОГО СКЛАДУ

**Д-р техн. наук О. М. Ананьєва, старш. викл. О. В. Лазарєв,
бакалаври О. О. Слєпченко, Р. О. Парфьонов**

INTRODUCING INNOVATIONS TO IMPROVE THE AUTOMATIC ROLLING STOCK IDENTIFICATION SYSTEM

**Dr. Sc. (Tech.) O. Ananieva, Senior Lecturer O. Lazariev,
bachelors O. Slepchenko, R. Parfenov**

DOI: https://doi.org/10.18664/1994-7852.212.2025.336419

Анотація. *Стаття присвячена розробленню систем автоматичної ідентифікації рухомого складу із застосуванням сучасних технологій. У роботі проаналізовано сучасні методи ідентифікації, розглянуто різновиди автоматизованих систем і їхні основні завдання. Особливу увагу приділено технологіям відеоспостереження та радіочастотній ідентифікації (RFID), специфіці застосування технологій Amtech, Dynicom і системи «Пальма», проєктуванню мікропроцесорної системи автоматичної ідентифікації рухомого складу. Розглянуто принципи роботи, організацію системи, логіку та етапи виконання алгоритму ідентифікації. Запропоновано алгоритм підрахунку кількості вагонів та аналіз функціонування датчиків проходження колісних пар ДПД-01. Розглянуто підсистему оптичної ідентифікації на основі нейронних мереж. Досліджено структуру та механізм функціонування, алгоритми розпізнавання номерів рухомих одиниць, а також використання штучного інтелекту. Вивчено особливості навчання нейронних мереж, їхню топологію та оптимізацію.*

Технічно змодельовано систему оптичної ідентифікації. Отримані результати можуть бути використані для підвищення ефективності автоматизації ідентифікації рухомого складу на залізничному транспорті.

***Ключові слова**: автоматична ідентифікація, рухомий склад, відеоспостереження, радіочастотна ідентифікація (rfid), amtech, dynicom, нейронні мережі, штучний інтелект, датчики проходження колісних пар (дпд – 01), оптична ідентифікація.*

***Abstract.** The article is devoted to the analysis and development of automatic rolling stock identification systems using modern technologies. The paper analyzes the existing identification methods, considers the types of automated systems and their main tasks. Particular attention is paid to video surveillance and radio frequency identification (RFID) technologies, as well as the specifics of using Amtech, Dynicom, and the Palm system. The design of a microprocessor-based system for automatic identification of rolling stock is also discussed in detail. The principles of operation, system organization, logic, and stages of the identification algorithm are considered. An algorithm for counting the number of cars and analyzing the functioning of the DPD-01, wheel set passage sensors is proposed. The development of an optical identification subsystem based on neural networks is also considered. The structure and mechanism of functioning, algorithms for recognizing the numbers of rolling stock, as well as the use of artificial intelligence are investigated. The features of neural network training, their topology and optimization are studied. Technical modeling of the optical identification system was performed. The research emphasizes the importance of integrating advanced technologies to enhance the reliability and accuracy of identification systems. It highlights the challenges faced in real-time identification and suggests solutions based on sensor fusion and AI-driven decision-making. Practical implementation issues and potential improvements in data processing speed and recognition accuracy are discussed. The study concludes that the proposed system can significantly improve operational safety and logistical efficiency in railway transport. The obtained results can be used to improve the efficiency of automation of rolling stock identification in railway transport.*

***Keywords**: automatic identification; rolling stock; video surveillance; radio frequency identification (rfid); amtech; dynicom; neural networks; artificial intelligence; wheel pair passage sensors (dpd – 01); optical identification.*

Вступ. За допомогою технологій розпізнавання рухомого складу можна автоматично зчитувати і обробляти дані про номери вагонів. Завдяки їх впровадженню значно покращується точність і швидкість збору інформації про стан локомотивного та вагонного парку. Це сприяє оптимізації робочих процесів, скороченню потреби в персоналі та переходу на цифрові методи обміну даними без використання паперових носіїв. У цій роботі описано розроблення комплексної системи автоматизованої ідентифікації та технічного моніторингу рухомого складу [6].

Структура системи має багаторівневу організацію. На початковому рівні функціонують кодові датчики, встановлені на кожному вагоні. Наступний рівень включає пункти зчитування інформації, оснащені додатковими засобами контролю – камерами для визначення температури буксових вузлів і п'єзоелектричними сенсорами, що фіксують можливі дефекти коліс. Дані, отримані від зчитувальних пунктів, передають до інформаційних вузлів лінійного та магістрального рівнів, а потім спрямовують у центральний аналітичний центр ГІОЦ УЗ – вищу ланку системи управління.

Розглянуто кілька можливих конфігурацій системи. На початковому етапі доцільно застосовувати технологію оптичного розпізнавання, яка не потребує додаткового обладнання на вагонах. У

подальшому, з інтеграцією кодових бортових датчиків, стане можливою більш надійна ідентифікація за допомогою радіочастотних технологій. Однак повне оснащення всього парку рухомого складу такими датчиками – це тривалий процес, що потребує значних ресурсів і часу.

У цей перехідний період є можливість використання комбінованої системи, яка поєднує оптичну та радіочастотну ідентифікацію. У межах цієї роботи розроблено нейронну мережу, здатну розпізнавати номери вагонів за фотографіями. Дослідження показали, що ця мережа ефективно визначає номери навіть за умов обмеженої видимості та забруднення поверхні вагона [6].

Впровадження інновацій для покращення системи автоматичної ідентифікації рухомого складу є актуальним в контексті сучасних викликів транспортної галузі. Через зростання обсягів вантажних і пасажирських перевезень, потребу в оптимізації логістики та підвищенні безпеки потрібні ефективні технології ідентифікації.

Системи автоматичної ідентифікації, такі як RFID, комп'ютерний зір чи IoT-пристрої, точно відстежують рухомий склад у реальному часі, мінімізуючи людський фактор і помилки.

Інновації в цій сфері сприяють підвищенню ефективності управління транспортними потоками, скороченню простоїв і витрат на обслуговування. Наприклад, використання штучного інтелекту для аналізу даних із камер чи датчиків забезпечує швидке розпізнавання номерів вагонів і локомотивів, що покращує координацію на залізничних вузлах. Крім того, впровадження таких систем сприяє екологічній стійкості завдяки оптимізації маршрутів і зменшенню енергоспоживання.

Актуальність теми також підкріплена глобальними трендами цифровізації та автоматизації. У країнах із розвиненою транспортною інфраструктурою, як-от ЄС чи США, подібні технології вже активно застосовують, що створює потребу в адаптації таких рішень у країнах, що розвиваються. Отже, інновації в системах ідентифікації рухомого складу є основними для модернізації транспортної галузі, підвищення її конкурентоспроможності та безпеки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. ***Аналіз сучасних систем автоматичної ідентифікації рухомого складу.*** Система «Інтелект» включає модуль для автоматичного визначення номерів вагонів і цистерн. В умовах сучасних залізничних перевезень великі промислові підприємства, транспортні компанії та інфраструктурні об'єкти стикаються з такими завданнями: автоматизоване відстеження руху поїздів і вагонів; візуальний контроль за вантажами; перевірка відповідності габаритів і ваги рухомого складу.

Досягнення успіху в цих сферах суттєво позначається як на загальній безпеці залізничних перевезень, так і ефективності діяльності окремих компаній і організацій. Модуль для ідентифікації номерів вагонів і цистерн, зображений на рис. 1, – важливий і ефективний інструмент для вирішення завдань за допомогою системи відеоспостереження в залізничному транспорті. У галузі відеоідентифікації існують кілька основних напрямів: автоматичне розпізнавання номерів автомобілів, ідентифікація номерів вагонів, визначення осіб, виявлення об'єктів, а також їх порівняння та верифікація з еталонними даними [11].

Для автоматичного розпізнавання номерів транспортних засобів у системах відеоспостереження використано спеціалізовані модулі, такі як «Ураган» Slow-1 у системі «Інтелект» і AutoTRASSIR LPR-1-30 у Trassir, наведені на рис. 2 [17].

Автоматизоване виявлення та ідентифікація номерних знаків залізничного рухомого складу. Програмний комплекс «ЗД-Інтелект-1» призначений для автоматичного зчитування та розпізнавання номерів вагонів. Ліцензія на один

відеоканал дає змогу інтегрувати цю технологію в систему відеоспостереження (рис. 3). Сучасні методи автоматичної ідентифікації невпинно вдосконалюють, впроваджуючи інноваційні рішення. Поєднання різних технологічних підходів сприяє підвищенню точності, швидкості та надійності процесу розпізнавання [17].

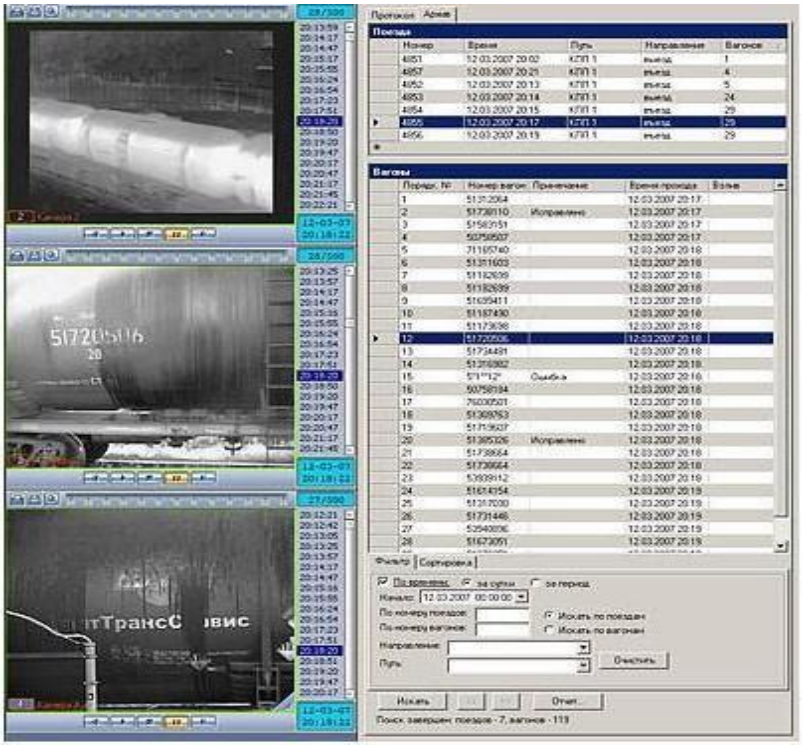


Рис. 1. Процедура розпізнавання номерів вагонів і цистерн у рамках системи «Інтелект»

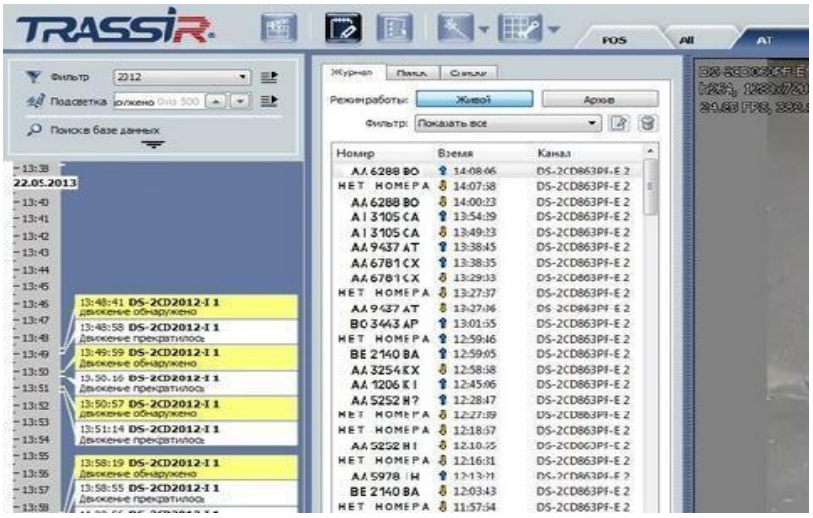


Рис. 2. Інтелектуальний модуль AutoTRASSIR LPR-1-30 у складі системи Trassir, призначений для автоматичного розпізнавання номерних знаків транспортних засобів

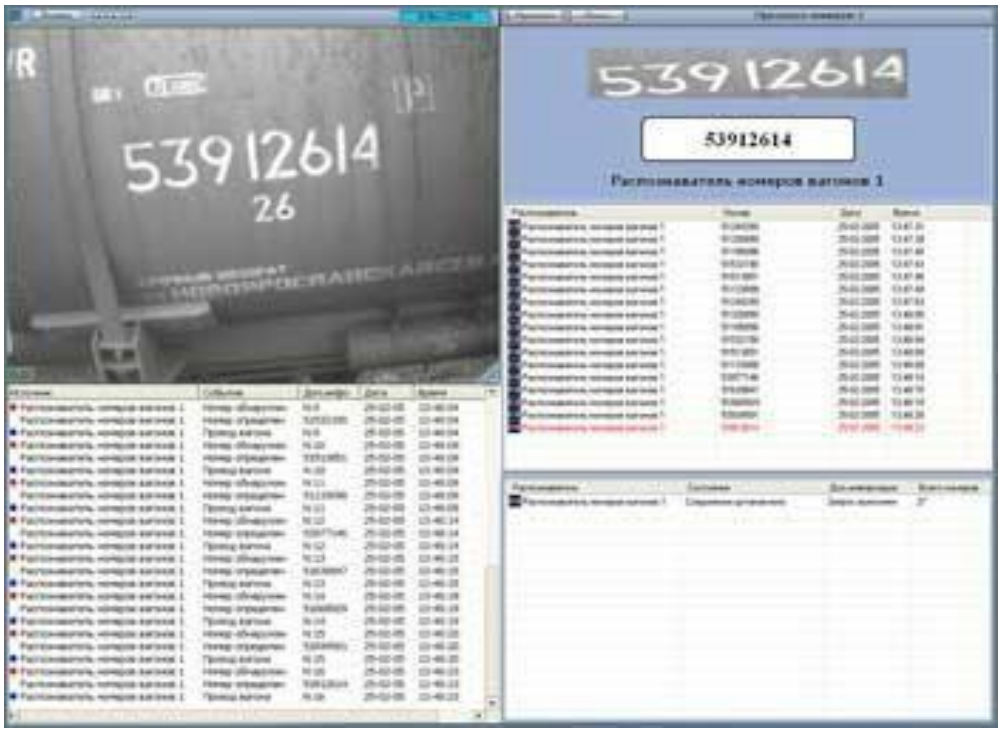


Рис. 3. Система автоматичного зчитування та аналізу ідентифікаційних номерів залізничних вагонів

ARSCIS – це система, яка поєднує апаратні й програмні рішення для оптоелектронного розпізнавання рухомого складу залізниць. Компанія «Малленом» і її підрозділ «Малленом Системс» накопичили великий досвід із розроблення та впровадження технологій для ідентифікації транспортних засобів на землі. У 2004 році компанія «Малленом» розробила перший пілотний зразок апаратно-програмного комплексу, що автоматизує процес зчитування номерів вантажних вагонів і поїздів. Зважаючи на результати випробувань та експлуатації пілотної версії системи ARSCIS (для розпізнавання номерів вагонів), була розроблена стандартна промислова модель. Її структурне розташування наведене на рис. 4. Система включає оптоелектронні модулі для збору даних, датчики, які визначають положення колісних пар, обчислювальну платформу для обробки отриманої інформації та телекомунікаційне обладнання для передавання даних [4].

У цій конфігурації система ARSCIS може бути оснащена від однієї до чотирьох відеокамер, налаштованих для зчитування номерів, розташованих на боках і балках вагонів. Зі збільшенням кількості камер підвищується точність і надійність ідентифікації, що дає змогу збільшити ймовірність правильних результатів і знизити частоту помилок у процесі зчитування [4]. Для безперебійної роботи оптичної системи в контрольованій зоні застосовують джерела світла, зокрема кварцево-галогенні лампи або інфрачервоні прожектори. Позицію рухомого складу в зоні спостереження визначають індукційні датчики колісних пар, які підключають до комп'ютера через COM-порт. Також існують різні способи підключення відеокамер до обчислювальної системи. Вибір оптимального способу підключення залежить від специфіки об'єкта і наявних можливостей телекомунікаційної мережі.

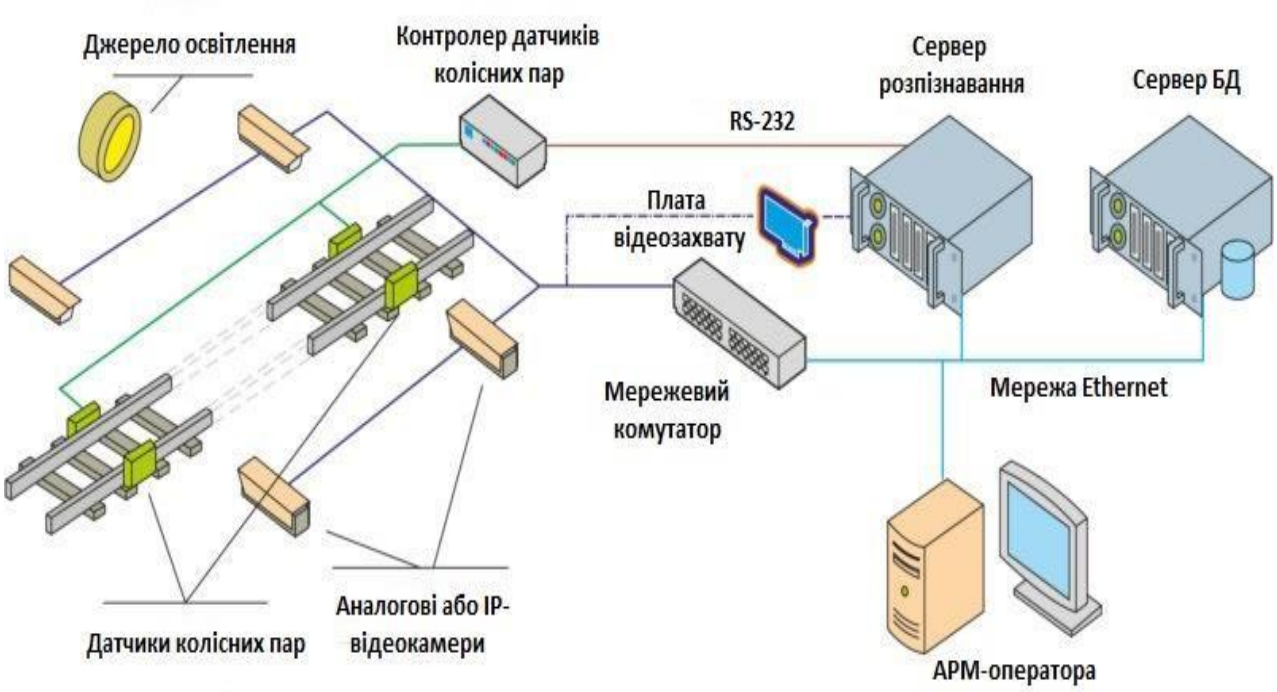


Рис. 4. Схематичне зображення типової структури системи ARSCIS для ідентифікації номерів вагонів

Відеосигнал може бути переданий через коаксіальні кабелі, скручену пару або оптоволокно. Якщо система обробляє аналоговий сигнал, потрібна спеціальна плата для захоплення відео. Для IP-камер сигнал спочатку конвертують у цифрову форму, а підключення до комп'ютера відбувається через Ethernet [4].

У системі автоматичної ідентифікації «Пальма» застосовано інноваційну НВЧ-технологію на частотах 865, 867 і 869 МГц, що дає змогу здійснювати ефективне зчитування даних на великих відстанях і за високих швидкостей руху транспорту. Її основний компонент – це опромінювальна зчитувальна установка, що складається зі зчитувача з антеною та пасивного кодового бортового датчика. Цей датчик працює без власного джерела живлення, отримуючи необхідну енергію через електромагнітні хвилі від зчитувача. Дальність зчитування залежить від потужності зчитувача.

Перевага пасивних кодових бортових датчиків – їхня майже нескінченна тривалість роботи, адже вони не потребують заміни елементів живлення, що характерно для активних систем.

Система автоматичної ідентифікації включає такі основні компоненти: кодові бортові датчики, встановлені на транспортних одиницях у спеціально визначених точках (рис. 5) [19]; концентратори інформації для різних рівнів: на лінійному рівні – КСАІ-Л, на дорожньому – КСАІ-Д; стаціонарні пункти зчитування інформації (ПСЧ), розташовані за декілька метрів від колії в контрольних зонах; пункти для кодування датчиків КБД; спеціалізоване програмне забезпечення для ефективної обробки даних.

Структурна схема і функціональна схема роботи системи автоматичної ідентифікації «Пальма» наведені відповідно на рис. 6 і 7.

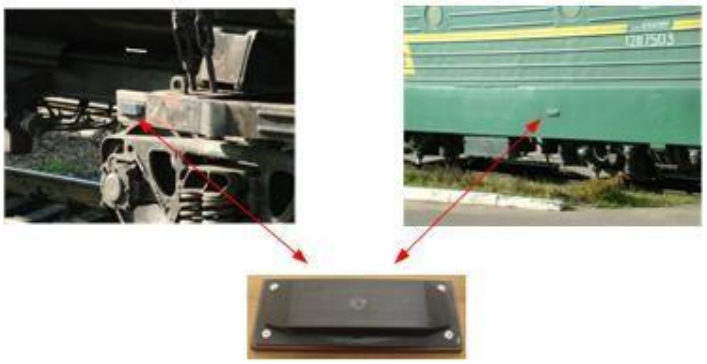


Рис. 5. Датчик для бортової ідентифікації

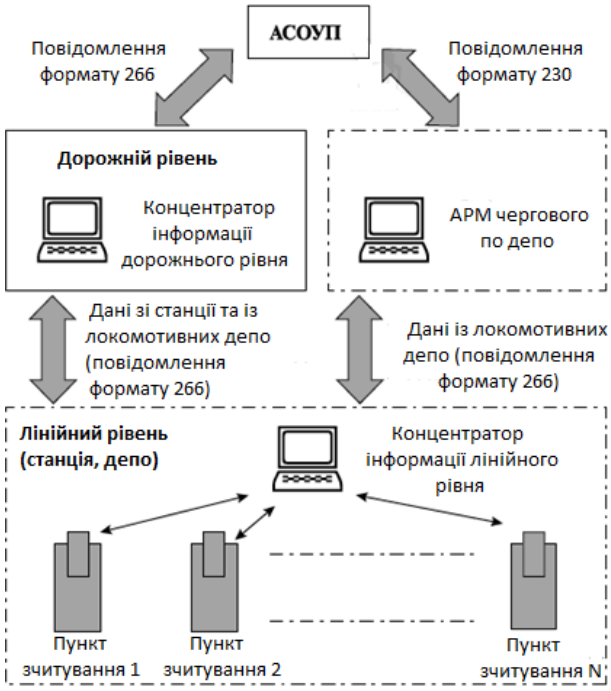


Рис. 6. Структурна схема організації системи «Пальма»

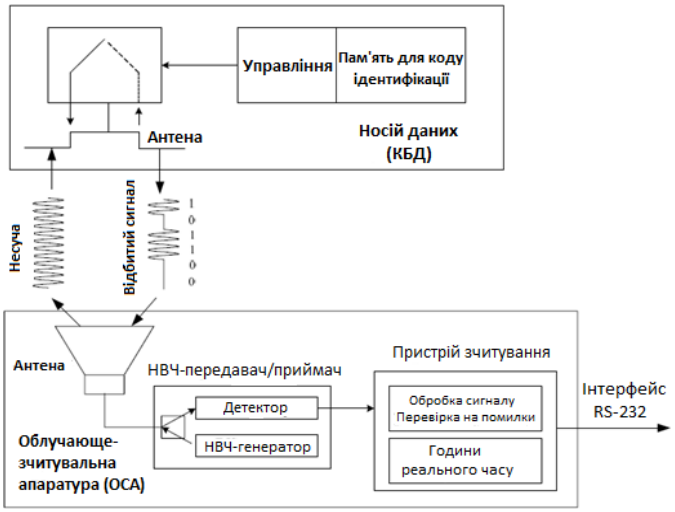


Рис. 7. Функціональна схема роботи системи автоматичної ідентифікації «Пальма»

Основна частина. ***Проєктування мікропроцесорної системи для автоматичної ідентифікації рухомого складу***.

Концепція системи автоматичної ідентифікації рухомого складу, включаючи її структурні елементи і принципи функціонування, зображена на рис. 8 [7].

Система включає три основні елементи: колійне, постове і станційне обладнання. До складу колійного обладнання входять точкові колійні датчики для виявлення позицій колісних пар (ТКД1-ТКД3); відеокамери для моніторингу (ВК1, ВК3 – для нижніх точок, ВК2, ВК4 – для верхніх); освітлювальні пристрої (ДО), активовані в темний час доби; антена RFID для обміну сигналами. Постове обладнання складається з контролера для обробки сигналів від датчиків, блока для обробки відео, системи управління та передавання даних, а також зчитувача RFID.

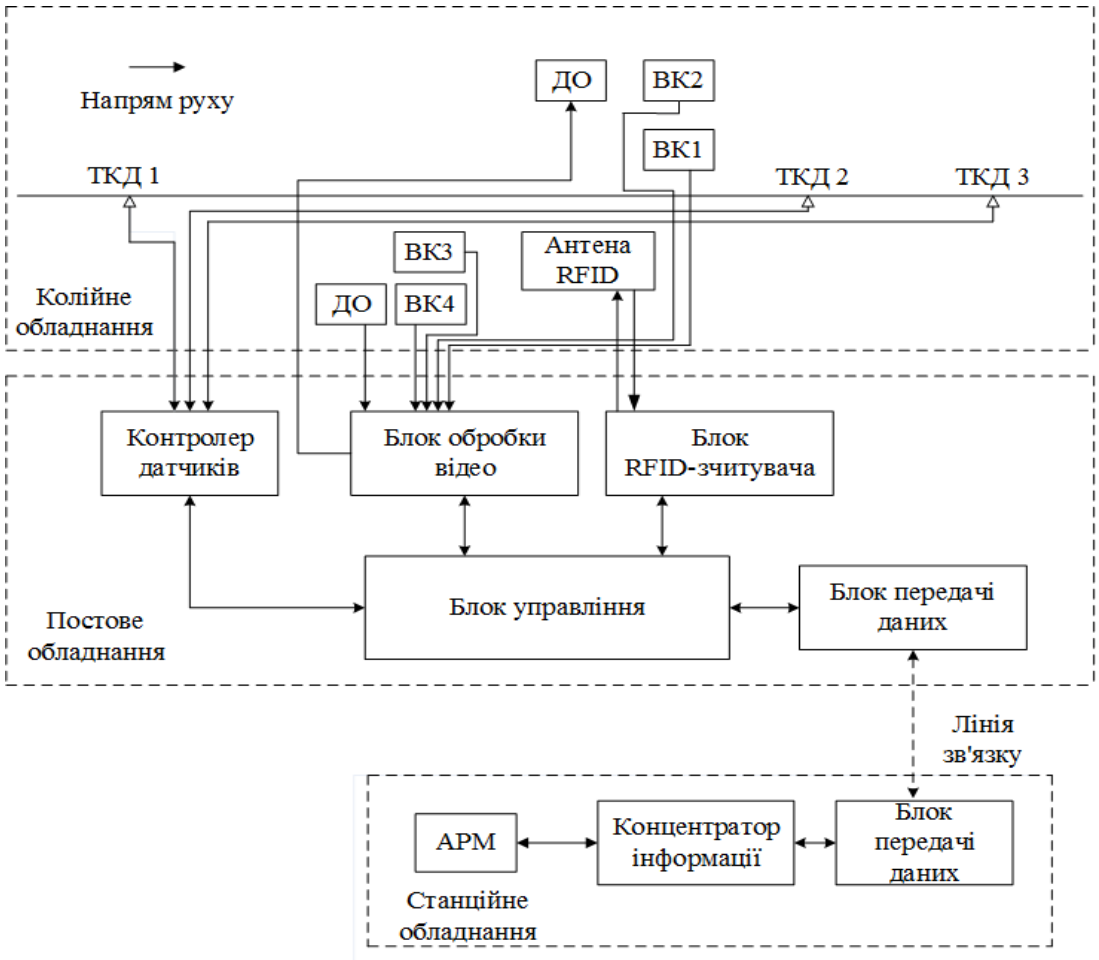


Рис. 8. Схема організації системи автоматичної ідентифікації рухомого складу

Станційне обладнання, яке з'єднане з постовим через лінію зв'язку, включає модуль передавання інформації, центральний агрегатор даних і автоматизовані робочі місця (АРМ) [7]. Процес зчитування побудований за таким принципом: уздовж залізничної колії, у ключових точках (вхід/вихід зі станцій чи депо), встановлені спеціальні датчики для виявлення наближення поїздів – точкові

колійні датчики (ТКД1-ТКД3). Вони активуються, коли поїзд входить у зону контролю. Спочатку система шукає кодові бортові датчики (КБД). У разі їх наявності на вагонах ідентифікація відбувається через радіочастотний метод. Якщо ж датчики не знайдені, використовують оптичну систему ідентифікації. У цьому випадку, коли поїзд наближається до контрольної зони, активується перший точковий колійний датчик (ТКД1).

Потім по черзі вмикаються ТКД2 і ТКД3, а одночасно запускаються відеокамери, які захоплюють зображення номерів вагонів. Отримані відеодані передаються до спеціального блока обробки відео, який виконує розпізнавання номерів. Контролер датчиків, який отримує сигнали від ТКД і обробляє дані з усіх точок зчитування залізничного вузла, передає отриману інформацію до блока управління, виконуючи такі основні функції: реєстрація вагонів, що потрапили в зону зчитування; визначення кількості осей і класифікація типів вагонів; облік кількості вагонів у складі. Блок управління через підключений блок передавання даних і лінію зв'язку передає ідентифікаційну інформацію про вагони на станційне обладнання. Концентратор інформації формує комплексне повідомлення, яке включає унікальний восьмизначний код рухомого засобу, коди країни і власника, а також дані про станцію, пункт зчитування, напрямок і час проходження разом із переліком вагонів, що складають поїзд [7]. Ці дані направляють до автоматизованого робочого місця оператора (АРМ).

Якщо під час проходження поїзда виявлені кодові бортові датчики (КБД), інформацію про рух вагонів зчитують за допомогою RFID-антени, яка передає дані на блок RFID-зчитувача. Потім отримані дані передають на блок управління, через блок передавання даних вони потрапляють до станційного обладнання, а далі на АРМ для подальшої обробки [7].

Процес функціонування системи автоматичної ідентифікації та діагностики рухомого складу відбувається згідно з алгоритмом, зображеним на рис. 9.

Система має різні режими роботи, серед яких тестування, вимірювання та передавання даних. Якщо рухомий склад відсутній, система автоматично переходить у режим самодіагностики, де перевіряють працездатність усіх вузлів і компонентів. Потім відбувається контроль щодо наявності вільної контрольної ділянки. У разі її вільності самотестування триває до моменту, поки поїзд не потрапить на цю ділянку. Як тільки поїзд потрапляє на контрольовану ділянку, відстежувану колійними датчиками, система автоматично змінює режим із самодіагностики на вимірювання. Спочатку перевіряють, чи є денне світло. Якщо його недостатньо, буде ввімкнено освітлювальне обладнання. В іншому випадку система негайно переходить до процесу опитування датчиків.

Після активації точкового колійного датчика ТКД1 система перевіряє наявність кодового бортового датчика (КБД) на вагоні. Якщо на вагоні виявлено RFID-датчик, сигнал буде прийнято через спеціалізовану антену RFID. У разі відсутності RFID-датчика система переходить до іншого етапу – активації відеокамер для візуальної фіксації номера вагона. Далі, з проходженням поїзда через точкові датчики ТКД2 і ТКД3, відбувається підрахунок осей і вагонів, що дає змогу визначити кількість одиниць рухомого складу в поїзді [7].

Паралельно з цим контролюють вільність контрольованої ділянки, що забезпечує точність виявлення і унеможливлює помилки для ідентифікації. Після виконання цієї процедури система автоматично розпізнає номери вагонів, обробляє їх і передає інформацію до станційного обладнання для подальшої роботи з даними, що забезпечує ефективне управління рухомим складом [7].

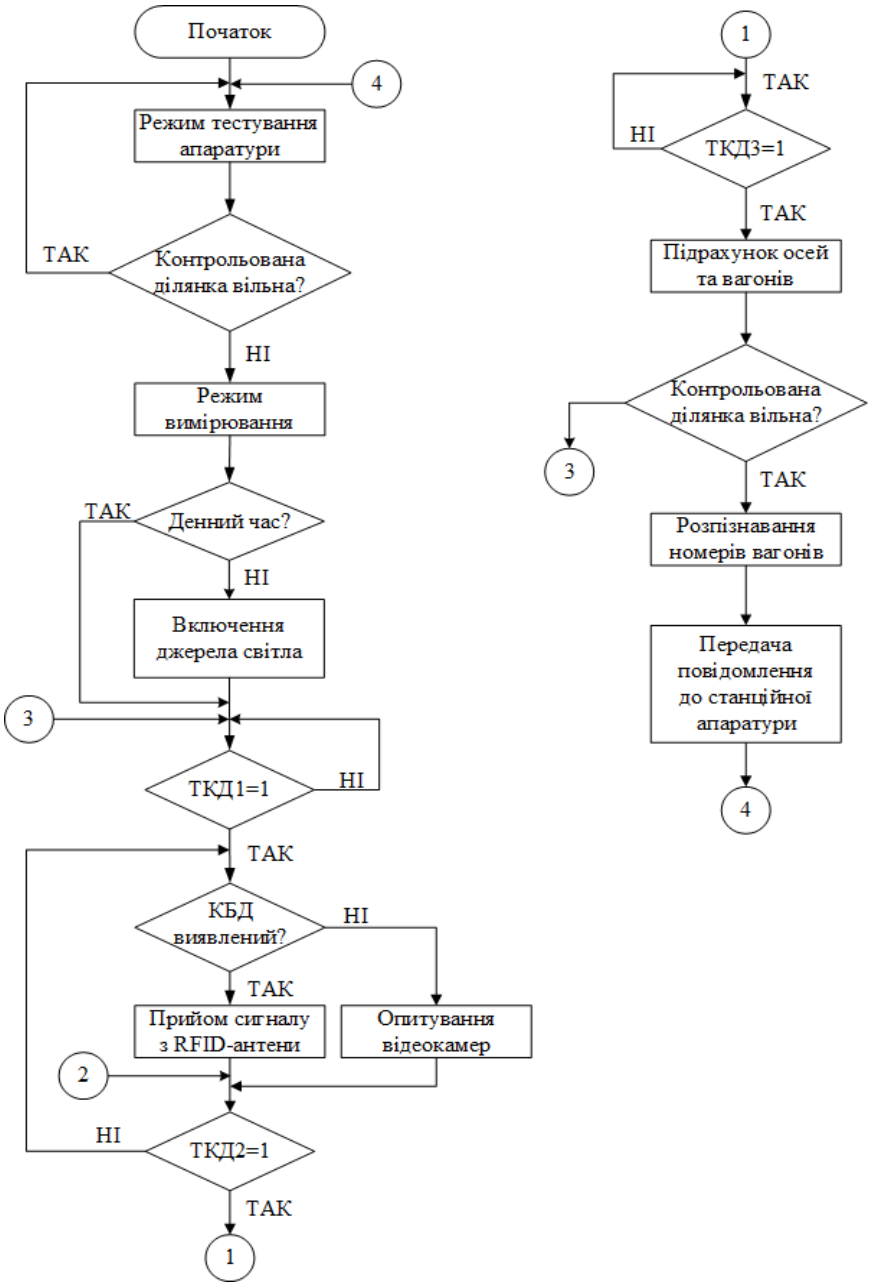


Рис. 9. Алгоритм роботи системи для автоматичної ідентифікації та моніторингу стану рухомих одиниць

Відстань між крайніми осями на середині вагона більша, що є важливим фактором для точного визначення кінця складу.

Така структура дає змогу ефективно визначати місце розташування хвоста вагона і обчислювати загальну кількість вагонів у складі. Цей процес відповідає формулі $b\ i < a < c$, де $b\ i$ – це відстань між осями візка, a та c – відповідно відстань між осями посередині і крайніми точками вагона [7].

Для вирішення цієї цього завдання було запропоновано спеціалізований алгоритм, який наведено на рис. 10.

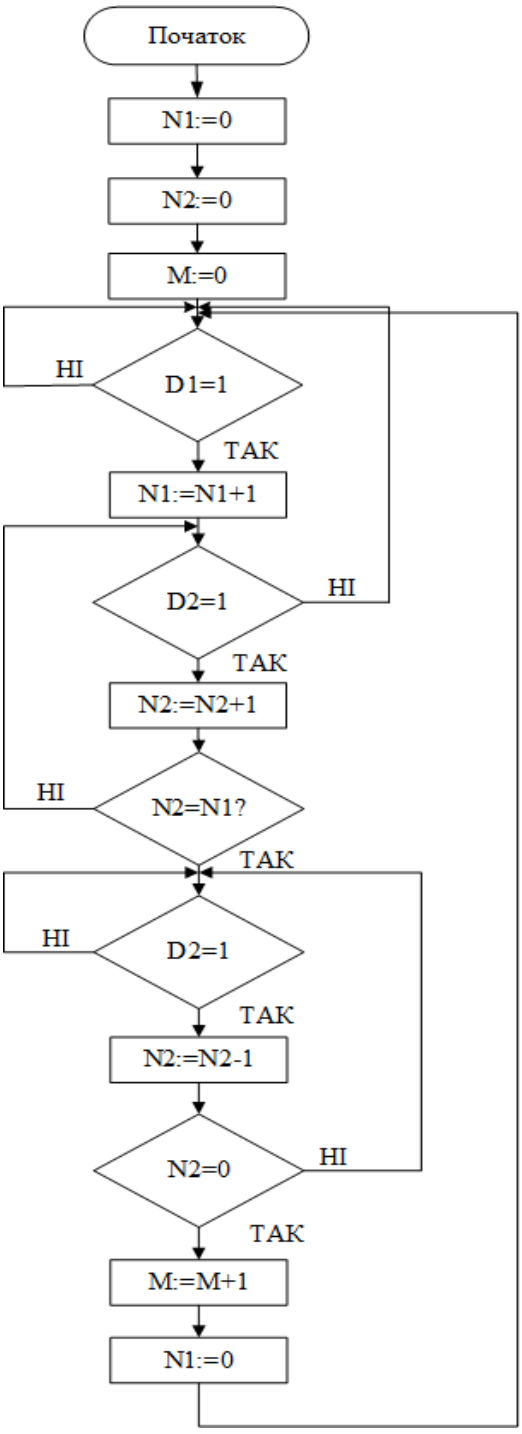


Рис. 10. Алгоритм обчислення кількості вагонів

Він здійснює точний підрахунок вагонів на основі виміряних даних. Алгоритм використовує кілька важливих лічильників: N1 і N2, які реєструють кількість осей, що проходять через датчики Д1 і Д2 відповідно. За цими параметрами обчислюють загальну кількість вагонів, позначену як M [7]. Надійність роботи систем СЗАТ, оснащених датчиками для підрахунку осей, переважно залежить від точності та достовірності отримуваної первинної інформації. Помилки в

підрахунку осей рухомого складу можуть призвести до збоїв у контролі за тепловим станом букс у таких експлуатованих системах, як ДИСК-Б, ПОНАБ і АСДКБ. На сьогодні є декілька різних конструктивних і схемних рішень датчиків за типом, принципом роботи і методами обробки первинних даних.

Датчики серії ДПД призначені для використання в системах залізничної автоматики та метрополітену, де вони точно фіксують момент проходження осі колеса рухомого складу через центр датчика. Конструкція цих датчиків включає чутливий елемент – колійний датчик ДПД, а також спеціалізований кріпильний механізм для надійного закріплення датчика на рейці [14].

Різновиди датчиків [14]. Серія включає датчики типів ДПД-01, ДПД-02, ДПД-03 і ДПД-03Т, призначені для встановлення на рейки Р65 та Р75. Для рейок Р50 використовують модифікації ДПД-01М, ДПД-02М, ДПД-03М і ДПД-03ТМ.

1. Датчики серії ДПД-01 генерують аналоговий вихід у вигляді двополюсного імпульсного сигналу з почерговою полярністю (дві напівхвилі). Перемикання полярності відбувається з проходженням осі колеса через відповідний центр датчика.

2. Датчики серії ДПД-02 пропонують два варіанти вихідних сигналів: імпульс струму, який з'являється в колі живлення під час проходження осі колеса через центр датчика, та аналоговий сигнал у вигляді двох відповідних почергових напівхвиль.

3. Датчики серії ДПД-03 мають два виходи сигналу, на кожному з яких із проходженням колеса генерується спадний імпульс напруги. Ці сигнали зсунуто за часом. Коли вісь колеса проходить через центр датчика, напруга на обох виходах зрівнюється. Якщо колеса немає, напруга на виходах залишається постійною і досягає максимального рівня.

4. Датчики серії ДПД-03Т також мають два виходи, але, на відміну від ДПД-03, кожен із цих виходів видає струм.

Монтують датчики за допомогою спеціальної кріпильної системи, що включає струбцину та кронштейн. Кронштейн є основною точкою опори для фіксації самого датчика, забезпечуючи його стійке положення. Струбцина у свою чергу гарантує надійне закріплення датчика на рейці, мінімізуючи будь-які рухи або зміщення під час роботи. Вона також дає змогу точно відрегулювати розташування датчика в обох площинах – вертикальній і горизонтальній, що забезпечує оптимальну точність вимірювань. Така система кріплення дає змогу забезпечити безперебійну роботу датчиків навіть в умовах високих механічних навантажень і різних експлуатаційних факторів [14]. Розглянемо пристрій для реєстрації проходження колісних пар типу ДПД-01 (рис. 11) [14].

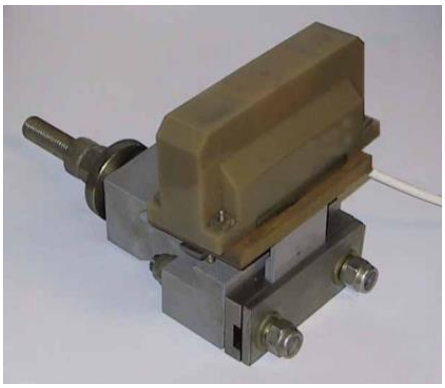


Рис. 11. Зовнішній вигляд датчика для фіксації проходження коліс по колії

Проєктування підсистеми оптичної ідентифікації рухомих одиниць на базі нейронної мережі

Процеси та інструменти оптичної ідентифікації вагонів постійно еволюціонують і набирають популярності у сфері моніторингу рухомого складу на великих промислових об'єктах, а також у системах обліку вантажів і продукції, що переміщують залізничним транспортом. Структурну схему організації підсистеми оптичної ідентифікації зображено на рис. 12 [18].

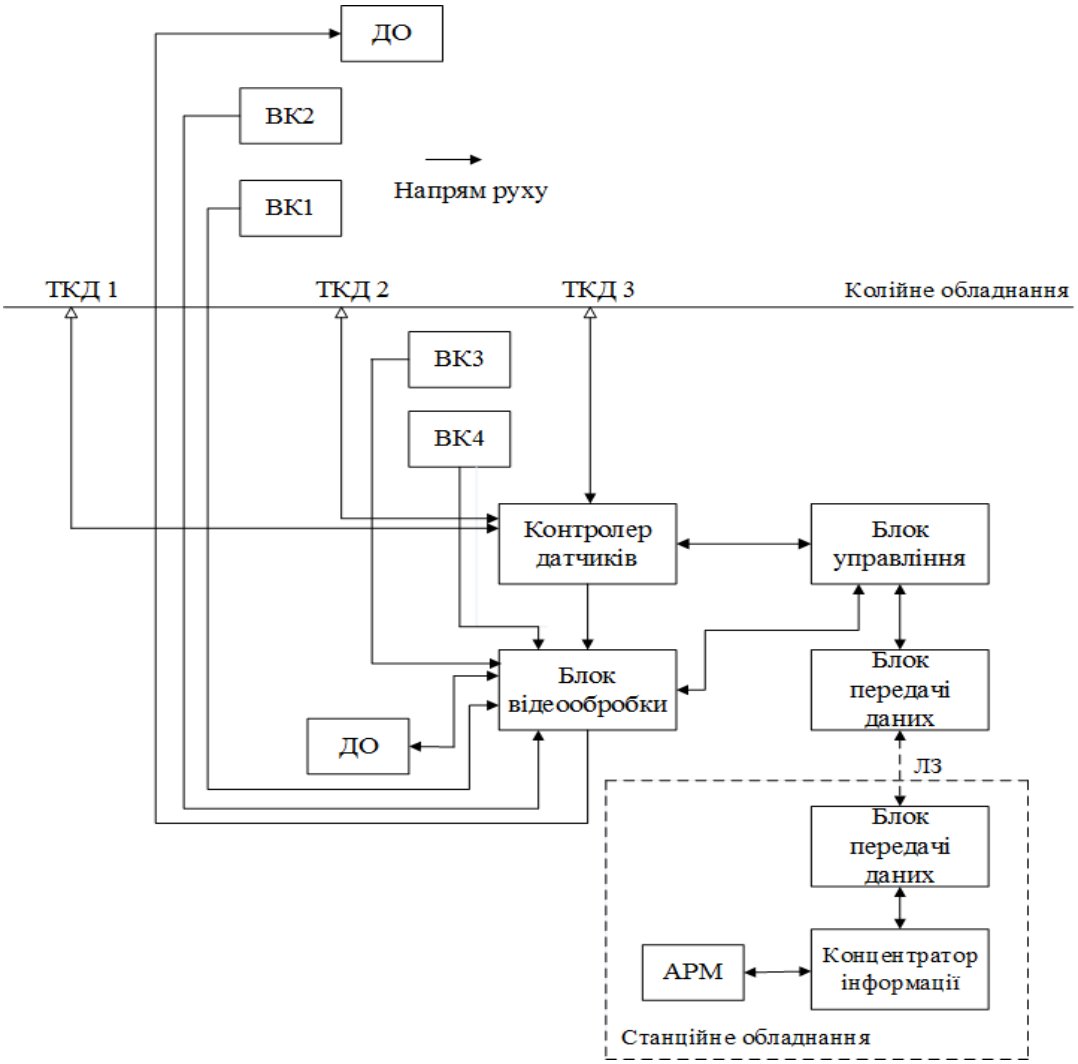


Рис. 12. Організаційна структура підсистеми оптичного розпізнавання

Процес ідентифікації символів на номерних табличках вагонів передбачає розпізнавання буквено-цифрових знаків, які містяться на зображенні.

Для цього використовують графічні дані, отримані на етапі виділення символів, що слугують вхідною інформацією для аналізу. На рис. 13 подано розроблений алгоритм автоматизованого розпізнавання вагонних номерів [18].

Під час цього етапу нейронна мережа аналізує кожен фрагмент зображення, зокрема кожну окрему цифру, визначаючи її межі та форму. Завдяки застосуванню методу поетапного поділу зображення, алгоритм забезпечує високу точність навіть у випадку, коли зображення може бути деформованим чи спотвореним через різні фактори, такі як неправильне освітлення, викривлення або завади в самому зображенні, наприклад шум. Цей підхід дає змогу забезпечити надійне і стабільне розпізнавання символів на зображенні за допомогою нейронної мережі, навіть за умов поганої якості зображення. Також слід зазначити, що на кожному етапі алгоритм застосовує ефективні методи корекції, що дає змогу адаптуватися до різних варіантів спотворень і завад.

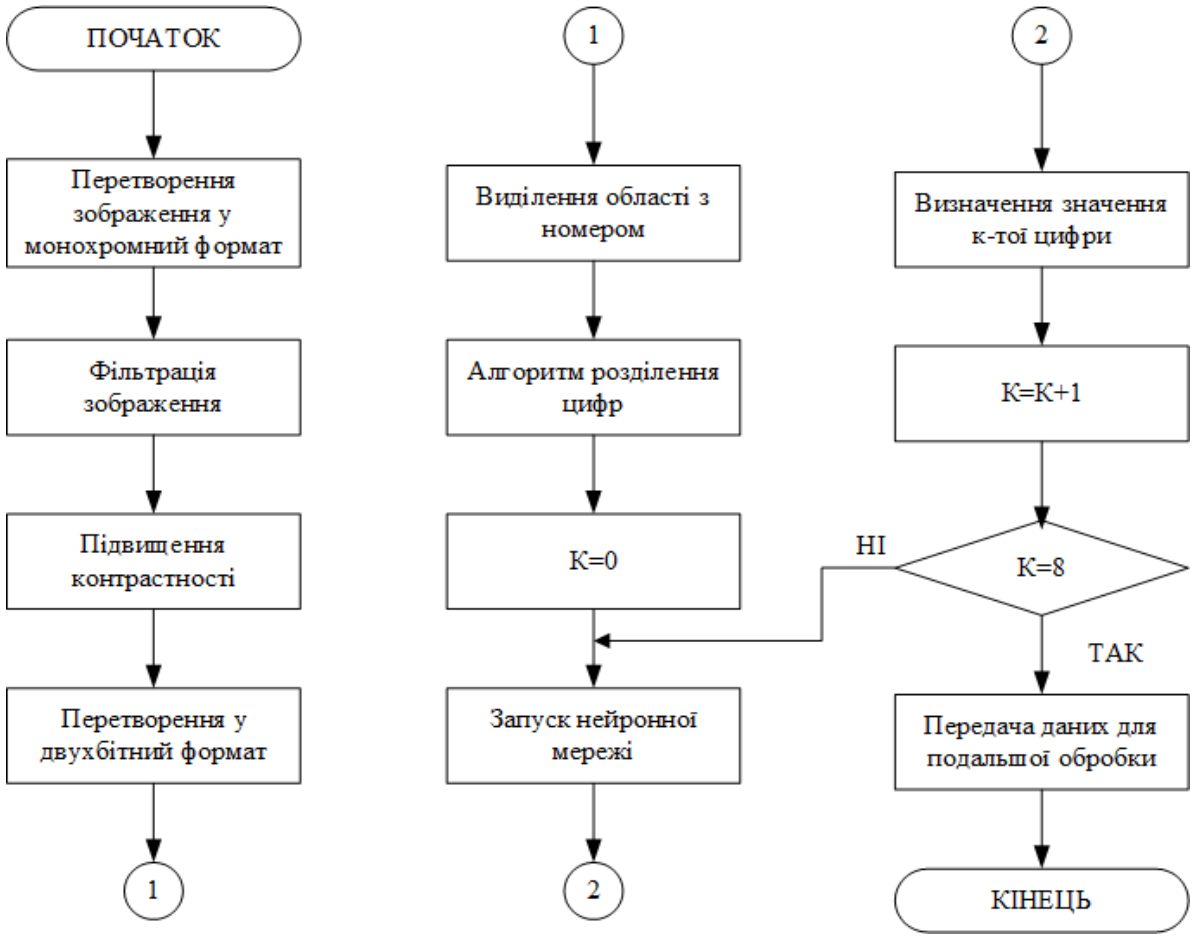


Рис. 13. Алгоритм автоматизованої ідентифікації рухомого складу

Нейронна мережа постійно оптимізує свої дії, поступово уточнюючи межі символів і їхнє розташування. Цей процес включає не тільки фіксацію пікселів, що відповідають одиничним значенням, але і детальне оцінювання зв'язків між пікселями для коректного розпізнавання складних чи нестандартних цифр. Отже, методика поділу цифр забезпечує точне визначення кожної цифри в номері вагона, незалежно від умов зображення. Алгоритм ефективно справляється з різними типами зображень, включаючи такі, що мають дефекти чи спотворення. Схему алгоритму поділу цифр подано на рис. 14 [18].

У таких мережах деякі входи нейронів позначені як зовнішні дані, а деякі виходи – як зовнішні результати. Основна функція нейронної мережі полягає в тому, щоб на основі наданих вхідних даних отримати певні вихідні результати, де зміну цих виходів контролюють за допомогою встановлених зв'язків між нейронами. Класифікацію штучних нейронних мереж подано на рис. 15, а конфігурацію на рис. 16 [16]. Проте перед тим як розглянути класифікацію, варто пояснити деякі терміни, використовувані в цій галузі, хоча й нема єдиного стандарту. Основний нейрон являє собою адаптивний або квадратичний суматор, який функціонує за допомогою активаційної функції. Цей нейрон отримує кілька входів, з яких обчислюють зважену суму, що через активаційну функцію формує вихідний сигнал [3]. Шар нейронів – це група нейронів, які мають спільні вхідні сигнали. Водночас кількість нейронів у певному шарі не залежить від інших шарів (рис. 17) [3].

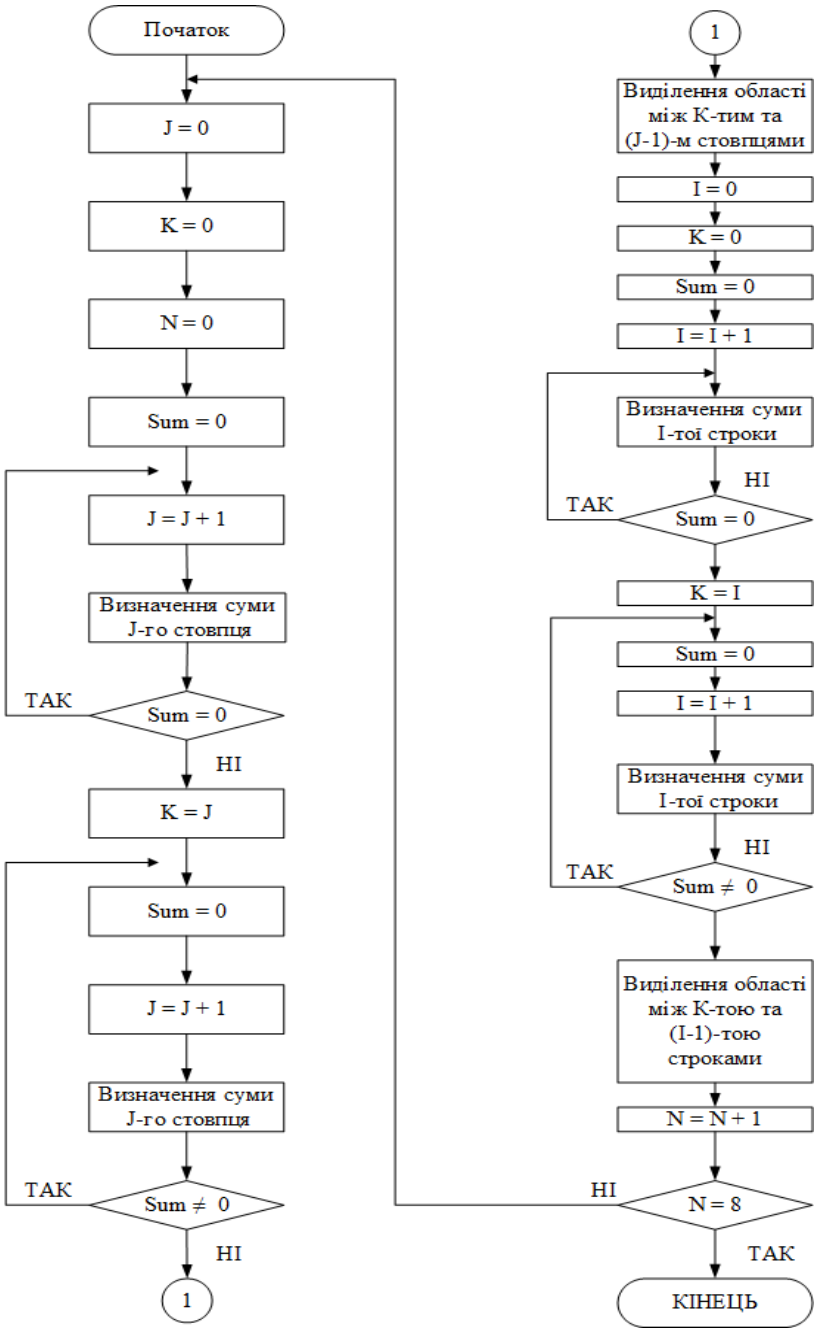


Рис. 14. Алгоритм поділу цифр

Хоч інколи точки розгалуження можна трактувати як частину вхідної структури, правильніше вважати вхідним перший шар нейронів, що мають вагові коефіцієнти і здійснюють первинне оброблення відповідних вхідних сигналів [3]. Вихідний шар – нейрони цього шару формують результати роботи мережі, визначаючи кінцевий вихід, кількість нейронів у якому відповідає кількості елементів вихідного вектора [3].

Прихований шар складається з усіх нейронних шарів, розміщених між вхідним і вихідним шарами, і відповідає за проміжну обробку даних [3].

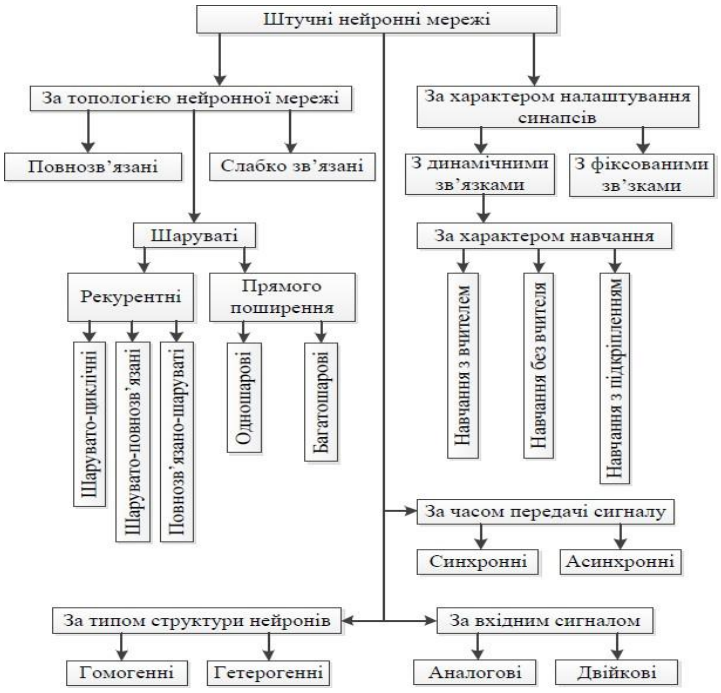


Рис. 15. Система класифікації нейронних мереж

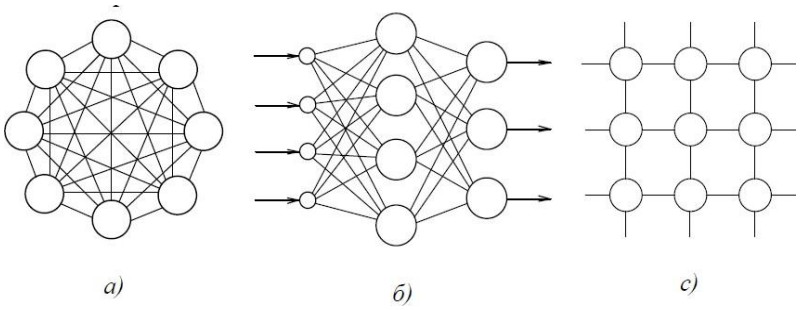


Рис. 16. Конфігурація нейронних мереж: а – мережа з повним взаємозв'язком;
б – багатоетапна мережа; с – мережа з частковими зв'язками

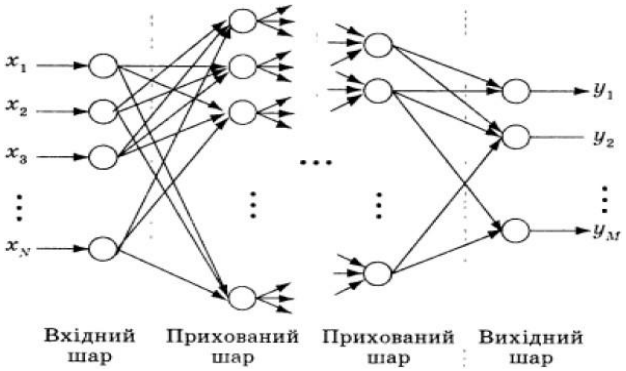


Рис. 17. Структура ШНМ

Нейронні мережі можуть бути класифіковані за кількома критеріями, що включають структуру зв'язків між нейронами, специфіку моделі нейрона, а також методи навчання мережі. Зокрема, за структурними ознаками мережі поділяють на неповнозв'язні (шаруваті), де нейрони одного шару з'єднані лише з нейронами наступного шару, і повнозв'язні, де існує зв'язок між кожним нейроном і всіма іншими нейронами. Крім того, мережі можуть мати різні типи з'єднань: випадкові, де зв'язки утворені на основі ймовірності, або регулярні, де зв'язки організовані за певною схемою (рис. 18, 19).

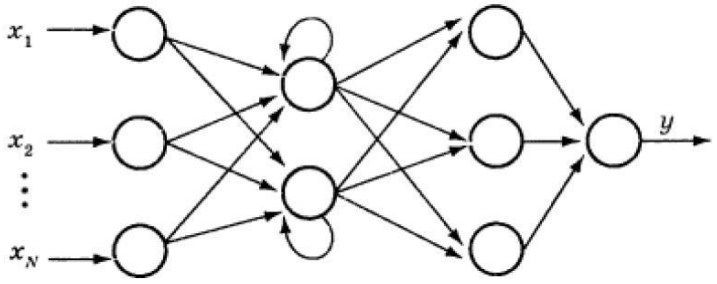


Рис. 18. Мережа з прямими зворотними зв'язками

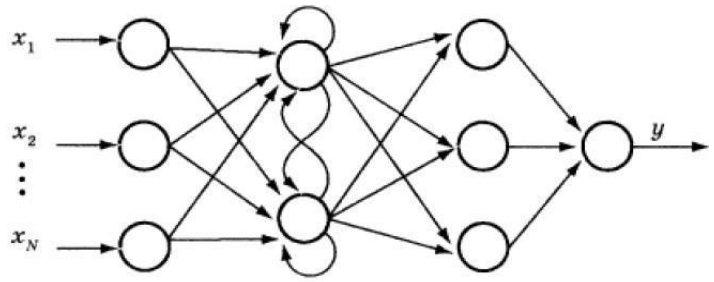


Рис. 19. Нейронна мережа з латеральними з'єднаннями

Висновки. Системи автоматичної ідентифікації рухомого складу здатні автоматично зчитувати номери вагонів та оперативно обробляти отриману інформацію. Впровадження таких інноваційних технологій забезпечує значне покращення в роботі залізничних перевезень. Однією із основних переваг є підвищення точності та швидкості збору і обробки даних про стан вагонних і локомотивних парків, що дає змогу здійснювати більш оперативну звітність. Крім того, завдяки зменшенню потреби в людському ресурсі для ручного збору даних можна значно скоротити штат працівників. Водночас система сприяє впровадженню безпаперових інформаційних технологій, що робить процеси більш зручними, зменшує витрати на документообіг і підвищує ефективність управління. Пропоновано використовувати комбіновану систему, яка поєднує дві технології ідентифікації: оптичну та радіочастотну. Радіочастотна ідентифікація має більшу точність і дає змогу ефективно працювати в умовах, де оптичне розпізнавання може бути ускладнене. Проте для вагонів, не оснащених RFID-транспондерами, використовуватимуть систему оптичного розпізнавання. Для реалізації цієї технології

були розроблені оптимізовані алгоритми обробки зображень. Пропонований метод на основі нейронних мереж забезпечує високу точність і швидкість розпізнавання номерів вагонів зображеннями. Цей підхід дає змогу автоматизувати процес ідентифікації, значно знижуючи ймовірність помилок, характерних для традиційних методів. Алгоритм нейронної мережі здатний ефективно обробляти великі обсяги даних, забезпечуючи оперативне розпізнавання номерів у реальному часі, що критично важливо для інфраструктури транспорту. Результати моделювання показують, що система працює стабільно за різних умов, навіть за змінних освітлювальних і погодних умов. Це дає змогу застосовувати її в широкому спектрі реальних завдань, де потрібна висока надійність і швидкість обробки.

Список використаних джерел

1. Хопфілд Дж. Дж. Нейрони з градуйованою відповіддю володіють колективними обчислювальними властивостями, подібними до властивостей двостатусних нейронів. *Праці Національної академії наук США*. 1984. Т. 81. С. 3088–3092.

2. Косько Б. Двонаправлена асоціативна пам'ять. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics.* 1987. Vol. 18. P. 49–60.

3. Адаменко В. О., Мирських Г. О. Штучні нейронні мережі в задачах реалізації матеріальних об'єктів. *Вісник Національного технічного університету України «КПІ». Серія «Радіотехніка. Радіоапаратобудування».* 2011. № 47. С. 182.

4. Zhang Y., Wang L. & Li Y. (2017). Розпізнавання номерних знаків транспортних засобів: принципи, проблеми та застосування. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems.* 18(4). 1102–1111.

5. ДСТУ Б В.2.3-29:2011. Габарити наближення будівель і рухомого складу залізниць колії 1520 (1524) Чинний від 2012.12.01. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2012. 50 с.

6. Герстінг Й. Інформаційні технології в обчислювальній техніці: підручник. 2016. С. 250–280.

7. Адамс М., Джонсон Т. Вантажні залізничні вагони. London: Routledge, 2018. 280 p.

8. Діагностування пристроїв залізничної автоматики та агрегатів рухомих одиниць: підручник / за ред. А. Б. Бойника. Харків: ПП Видавництво «Нове слово», 2008. 304 с.

9. Дранишников Л. В. Інтелектуальні методи в управлінні: навч. посіб. Кам'янське: ДДТУ, 2018. 416 с.

10. Технології безконтактної ідентифікації: комплексний посіб. / Д. Сміт, Р. Джонсон. 2nd ed. New York: Wiley, 2019. 350 p.

11. Метьюз П., Лі Л. Інтегровані системи безпеки: Проектування, управління та технології. 3rd ed. Amsterdam: Elsevier, 2020. 400 p.

12. Pidgeon M. E. B., Spencer T. J. L. Технологія RFID та її застосування. 2nd ed. London: Wiley, 2016. 350 p.

13. Коцовський В. М. Нейронні системи: навч. посіб. Ужгород, 2013. 250 с.

14. Кошовий С. В., Кошовий М. С., Трубчанінова К. А. Автоматична система діагностичного контролю температури буксових вузлів рухомих одиниць залізничного транспорту – АСДК-Б: навч. посіб. Харків: УкрДАЗТ, 2005. 66 с.

15. Левін Д. Ю. Основи управління транспортними процесами: підручник. Вид. 2-ге. Нью – Йорк: Transport Press, 2017. 280 с.

16. Міркес Е. М. Нейронні комп'ютери: Проект стандартизації. London: Springer, 2001. 350 p.

17. Грін Д., Картер Р. Системи автоматичного розпізнавання номерних знаків (ALPR): Прин-ципи та застосування. 2nd ed. Berlin: Springer, 2020. 320 p.

18. Оптична ідентифікація об'єктів рухомого складу в задачах управління залізничними перевезеннями / Е. В. Алієв та ін. *Автоматизація в промисловості*. 2009. № 5. С. 49–54.

19. Русакова О. А. Автоматична система ідентифікації транспортних засобів: PALMA: методичні вказівки. Берлін: Springer, 2016. 40 с.

20. Томпсон Р., Міллер П. Сучасні методи відстеження та моніторингу вантажів. 3rd ed. New York: Wiley, 2018. 250 p.

Ананьєва Ольга Михайлівна, доктор технічних наук, професор кафедри автоматики та комп'ютерного телекерування рухом поїздів, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна. E-mail: ananeva@kart.edu.ua. ORCID: 0000-0001-6686-8249.
Лазарєв Олексій Владленович, старший викладач кафедри автоматики та комп'ютерного телекерування рухом поїздів, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна.
E-mail: lazal@kart.edu.ua. ORCID: 0000-0002-0186-5896.
Слєпченко Олександр Олександрович, бакалавр, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна. E-mail: slepchenko_2023@kart.edu.ua. ORCID: 0009-0000-8488-9086.
Парфьонов Роман Олегович, бакалавр, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна. E-mail: roma2372@ukr.net. ORCID: 0009-0004-7776-6220.

Ananieva Olha M., Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Automation and computer telecontrol of trains, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: ananeva@kart.edu.ua. ORCID: 0000-0001-6686-8249.
Lazariev Oleksii Vladlenovych, Senior Lecturer, Department of Automation and computer telecontrol of trains, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: lazal@kart.edu.ua. ORCID: 0000-0002-0186-5896.
Oleksandr Slepchenko, bachelor, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine.
E-mail: slepchenko_2023@kart.edu.ua. ORCID: 0009-0000-8488-9086.
Parfenov Roman O., bachelor, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine.
E-mail: roma2372@ukr.net. ORCID: 0009-0004-7776-6220.

Статтю прийнято 23.05.2025 р.

УДК 629.4.014.2:621.89

РОЗРАХУНОК ПОДАВАННЯ МАСТИЛЬНОГО МАТЕРІАЛУ В МОТОРНО-ОСЬОВИЙ ПІДШИПНИК ЛОКОМОТИВА ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ПРИМУСОВОГО ЗМАЩЕННЯ

Канд. техн. наук В. О. Стефанов, асп. А. Д. Савченко

CALCULATION OF LUBRICANT SUPPLY TO THE MOTOR-AXLE BEARING OF A LOCOMOTIVE USING FORCED LUBRICATION

PhD (Tech) V. Stefanov, postgraduate student A. Savchenko

DOI: https://doi.org/10.18664/1994-7852.212.2025.336422

Анотація. *Моторно-осьовий підшипник (МОП) тягового електродвигуна локомотива є одним із найбільш навантажених вузлів екіпажної частини, що працює в умовах високих динамічних навантажень, температурних коливань і вібрацій. Встановлено, що недостатній рівень подавання мастильного матеріалу спричиняє порушення гідродинамічного режиму*

мащення, що веде до інтенсивного зношування вкладишів, зниження несучої здатності мастильного шару та, як наслідок, скорочення ресурсу підшипника. Це може призвести до його аварійного виходу з ладу, що унеможливлює подальшу експлуатацію локомотива і створює загрозу порушення безпеки руху. У статті розглянуто питання розрахунку оптимального подавання осьової оливи в моторно-осьові підшипники тягових електродвигунів тепловоза серії 2ТЕ116. Запропоновано підхід для формування математичної моделі з визначення необхідних витрат мастильного матеріалу з урахуванням умов експлуатації локомотива, таких як швидкість руху та інтенсивність адсорбційних процесів на поверхнях тертя. Наведено результати чисельних розрахунків, які можуть бути використані для вдосконалення сучасних систем подавання мастила та підвищення надійності роботи моторно-осьових підшипників у тягових електродвигунах.

Ключові слова: *моторно-осьовий підшипник, підшипник ковзання, мастильна плівка, система змащування.*

Abstract*. The motor-axle bearing (MAB) of a locomotive traction motor represents one of the most critically loaded elements of the locomotive's running gear, experiencing substantial dynamic loads throughout its operational life. Continuous exposure to these loads, particularly under varying locomotive speeds and operational conditions, imposes strict requirements on the effectiveness of the bearing's lubrication system. Insufficient supply of lubricant has been identified as a major factor leading to accelerated wear of the bearing liners, a significant decrease in service life, and, consequently, premature bearing failure. Such failures compromise the reliability and operational capability of the locomotive as a whole, resulting in increased maintenance costs and potential operational downtime.*

This article addresses the problem of determining the optimal axial oil supply rate to motor-axle bearings in the traction motors of the 2TE116 diesel locomotive. A comprehensive mathematical model has been developed, which allows for the calculation of the required oil flow rate based on critical operational parameters, including locomotive speed, load variations, and ambient conditions, as well as considering the structural characteristics of the lubrication system. The model integrates key tribological principles, including hydrodynamic lubrication theory and bearing surface protection under real-world operational conditions.

The study presents detailed calculation results, highlighting the relationships between operational modes and lubricant consumption rates. The findings demonstrate the importance of adjusting the lubrication supply dynamically in accordance with the locomotive's operational profile. Implementation of the proposed methodology could lead to significant improvements in lubrication efficiency, reduction in bearing wear, and substantial extension of the motor-axle bearing service life. Furthermore, the outcomes of this research provide practical recommendations for optimizing existing lubrication systems and inform the design of more reliable bearing assemblies for future locomotive models.

Keywords: *motor-axial bearing, sliding bearing, oil film, lubrication system.*

Вступ. Деталі моторно-осьових підшипників (МОП) тягових електродвигунів локомотивів є одними з найбільш відповідальних елементів екіпажної частини рухомого складу, що безпосередньо впливають на його технічний стан, надійність і безпеку експлуатації. Протягом усього періоду роботи локомотива, включно з пусковими режимами, прискоренням, рівномірним рухом і гальмуванням, МОП зазнають значних змінних динамічних навантажень, характерних для широкого діапазону швидкостей — від 0 до 80 км/год.

На сучасному етапі розвитку тягового рухомого складу систему змащення

моторно-осьових підшипників тепловозів серії 2ТЕ116 вважають однією з найбільш ефективних серед наявних аналогічних рішень. Вона базована на принципах примусового змащення за допомогою шестеренних насосів, що забезпечують подавання мастильного матеріалу безпосередньо до зон найбільшого тертя.

Однак, попри високий рівень технічної реалізації зазначеної системи, у її конструкції та експлуатаційних характеристиках залишаються певні недоліки, що обмежують ефективність роботи МОП за тривалих експлуатаційних умов. Однією з основних проблем є недостатня інтенсивність подавання мастильного матеріалу до зон безпосереднього контакту робочих поверхонь тертя. Це спричиняє формування мастильної плівки критичної або недостатньої товщини, яка не може повною мірою виконувати свої функції зменшення тертя і запобігання зносу.

Така ситуація призводить до прискореного зношення вкладишів підшипників, розвитку мікропошкоджень контактних поверхонь і зниження загального експлуатаційного ресурсу моторно-осьових підшипників. Крім того, виникає ризик розвитку втомних дефектів, які можуть суттєво впливати на безпечність експлуатації локомотивів.

Через виявлені недоліки існує об’єктивна необхідність у подальшому вдосконаленні системи змащення МОП локомотивів серії 2ТЕ116. Основними напрямами покращення мають стати оптимізація витрат мастильного матеріалу, забезпечення його стабільного подавання незалежно від зовнішніх умов експлуатації, а також використання новітніх мастильних матеріалів із підвищеними антифрикційними властивостями і здатністю утворювати стійкі адсорбційні плівки на поверхнях тертя. Упровадження таких заходів дасть змогу суттєво підвищити надійність, довговічність і ремонтопридатність моторно-осьових підшипників у складних умовах експлуатації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Упродовж останніх років у галузі залізничного транспорту проведено велику кількість досліджень, спрямованих на вивчення закономірностей процесів змащування моторно-осьових підшипників локомотивів. Отримані наукові результати свідчать, що сучасні конструкції систем змащення не завжди забезпечують стабільне підтримання оптимального режиму мащення в зонах тертя робочих поверхонь, що теж негативно впливає на надійність, довговічність і безпеку експлуатації підшипникових вузлів рухомого складу, зокрема за важких умов змінних навантажень і широкого діапазону робочих швидкостей [1].

У ряді досліджень [2, 3] науковці акцентують на перспективності впровадження примусових насосних систем для забезпечення подавання мастильного матеріалу безпосередньо в зону контакту поверхонь тертя. Застосування подібних систем спрямоване на створення стійкої мастильної плівки необхідної товщини, яка здатна мінімізувати явища сухого тертя, знижувати рівень контактних напружень і, відповідно, зменшувати інтенсивність зносу. Однак слід зазначити, що більшість проведених досліджень зосереджені переважно на підшипниках, які працюють у відносно сприятливих умовах із невисокими навантаженнями та помірною швидкістю ковзання.

За специфічних умов експлуатації моторно-осьових підшипників тягових електродвигунів тепловозів серії 2ТЕ116, які зазнають значних змінних навантажень і впливу вібрацій, спостерігають режим граничного змащення з частковим руйнуванням адсорбційного шару мастильного матеріалу. За даними роботи [4], часткове руйнування адсорбованого мастильного шару розглядають як один із основних чинників, що призводить до прогресуючого зносу контактних поверхонь

підшипників і скорочення їхнього експлуатаційного ресурсу.

Нині на залізничному транспорті України у процесі експлуатації тепловозів 2ТЕ116 широко застосовувана система циркуляційного змащення моторно-осьових підшипників. Проте аналіз експлуатаційних характеристик цієї системи виявляє низку суттєвих недоліків: недостатню інтенсивність подавання мастильного матеріалу до критичних зон тертя, високу ймовірність забруднення мастила, поступову деградацію мастилопровідних властивостей гнотових елементів, чутливість до сезонних коливань температури, що може призводити до загусання чи навіть замерзання мастильного матеріалу в зимовий період.

Крім того, слід зазначити, що використання традиційних осьових олив без спеціальних протизношувальних присадок значно обмежує можливості стабільного формування ефективного мастильного шару, що забезпечує надійний захист поверхонь тертя. Застосування спеціальних протизношувальних присадок сприяє покращенню адсорбційних властивостей мастильного матеріалу та забезпечує поступове збільшення товщини захисного шару протягом експлуатації, що позитивно впливає на зносостійкість підшипникових вузлів [5].

У роботі [6] досліджено визначення параметрів контактної взаємодії в підшипниках ковзання, що функціонують у вузлах електровозів. Водночас у межах цього дослідження основну увагу приділено визначенню параметрів контактної взаємодії для підшипникових вузлів тепловоза 2ТЕ116, обладнаного циркуляційною системою змащення. Таке завдання обумовлено відмінностями в конструктивному виконанні та експлуатаційних умовах тепловозного рухомого складу, що безпосередньо впливають на напружено-деформований стан і трибологічні характеристики контактуючих поверхонь.

Ураховуючи викладене, слід зазначити, що результати наведених наукових досліджень мають надзвичайно важливе значення для подальшого розроблення ефективних систем змащення для підшипників ковзання, що працюють у тяжких експлуатаційних умовах підвищених навантажень. Зокрема, моторно-осьові підшипники тепловозів 2ТЕ116 є перспективним об'єктом для впровадження удосконалених методів примусового змащення. Поглиблений аналіз процесів формування, деградації та відновлення мастильної плівки на контактних поверхнях, а також оптимізація системи подавання мастильного матеріалу можуть істотно підвищити надійність, збільшити ресурс і покращити експлуатаційні характеристики підшипникових вузлів у складних умовах експлуатації на залізничному транспорті.

Визначення мети та завдання дослідження. Метою роботи є визначення оптимального подавання мастильного матеріалу для моторно-осьового підшипника тепловоза 2ТЕ116 з урахуванням адсорбційних процесів, що відбуваються на поверхнях тертя, для забезпечення стабільних умов змащування та підвищення експлуатаційної надійності вузла.

Основна частина дослідження. На тепловозах 2ТЕ116 реалізована циркуляційна система змащування моторно-осьового підшипника (МОП). Ця система має низку істотних недоліків, що обмежують її функціональність та ефективність у складних експлуатаційних умовах. Зокрема, подавання мастильного матеріалу в системі є жорстко залежним від кутової швидкості обертання шийки колісної пари. Особливо критичним є режим запуску, коли подавання мастила насосом починається лише з досягненням локомотивом швидкості 25 км/год. До цього моменту змащування здійснюється виключно польстерною системою, не здатною забезпечити повноцінний захист

від масляного дефіциту в зоні контакту поверхонь тертя, особливо після тривалих зупинок. Це вказує на необхідність вдосконалення системи змащення, зокрема шляхом впровадження масляного насоса примусової дії, функціонування якого не залежить від швидкості обертання колісної пари та дає змогу забезпечити адаптивне подавання мастила відповідно до поточного стану підшипникового вузла. Для цього розрахуємо подавання мастильного матеріалу до МОП.

Визначення режиму подавання мастильного матеріалу в моторно-осьовий підшипник (МОП) тепловоза 2ТЕ116 базовано на детальному врахуванні адсорбційних процесів, які виникають на поверхнях тертя в результаті взаємодії з мастильним матеріалом. Основним критерієм для визначення оптимальних умов є мінімізація концентрації молекул поверхнево-активних речовин (ПАР) у мастильному шарі діаметрального зазора підшипника під час його обертання. Слід зазначити, що на поверхнях тертя колісної пари завдяки руху спостерігають втрату молекул ПАР, що призводить до змін у характеристиках мастильного шару.

Припускають, що за кожен повний оберт осі колісної пари відбувається втрата певного об’єму молекул ПАР із замкненого простору мастильного шару. Цей об'єм критично важливий для підтримання мінімальної необхідної товщини адсорбційної мастильної плівки. Така плівка є необхідною умовою для ефективного захисту поверхонь тертя від прямого контакту, що може спричинити швидке зношування або навіть пошкодження підшипника.

З огляду на конструктивні особливості МОП тепловоза 2ТЕ116, які включають особливості взаємодії осі колісної пари з мастильним матеріалом, для забезпечення належної функціональності підшипників необхідно постійно оновлювати мастильний матеріал. Оновлення має включати підтримку постійної концентрації активних молекул ПАР у мастильному шарі, що дає змогу забезпечити стабільну роботу підшипників і мінімізувати механічні втрати від тертя.

За методикою [6] розрахуємо необхідне подавання мастильного матеріалу для моторно-осьового підшипника:

$$Q = {}^{V_\Delta}/_{t}, \qquad (1)$$

де V_Δ – об’єм мастильного матеріалу в зазорі, м^3;

t – час обертання осі без заміни мастильного матеріалу в зазорі, с.

Об’єм мастильного матеріалу в зазорі визначають як

$$V_\Delta = \pi \cdot \Delta \cdot L \cdot (R_{oc} \cdot \tfrac{\Delta}{4}), \qquad (2)$$

де Δ – діаметральний зазор, мм;

L – довжина підшипника, м;

R_{oc} – радіус осі, м.

Час обертання осі без заміни мастильного матеріалу

$$t = \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{\omega}, \qquad (3)$$

де n – кількість обертів без заміни мастильного матеріалу до досягнення граничної концентрації ПАР;

ω – кутова швидкість обертання осі.

Кількість обертів n без заміни мастильного матеріалу до досягнення граничної концентрації ПАР визначають за методикою [6] і з використанням даних роботи [7]. Результати розрахунку виконано для різної величини діаметрального зазора Δ (рис. 1).

Для розрахунку необхідного подавання мастильного матеріалу до МОП використаємо такі дані:

- кутова швидкість обертання осі $\omega =$ 0-39 рад/с, що відповідає швидкості локомотива в межах 0-80 км/год;
- довжина підшипника L = 0,16 м;
- радіус осі R_{oc} = 0,095 м;

- кількість обертів n визначаємо за рис. 1 відповідно до величини діаметрального зазора Δ.

Результати розрахунку подавання мастильного матеріалу наведено на рис. 2.

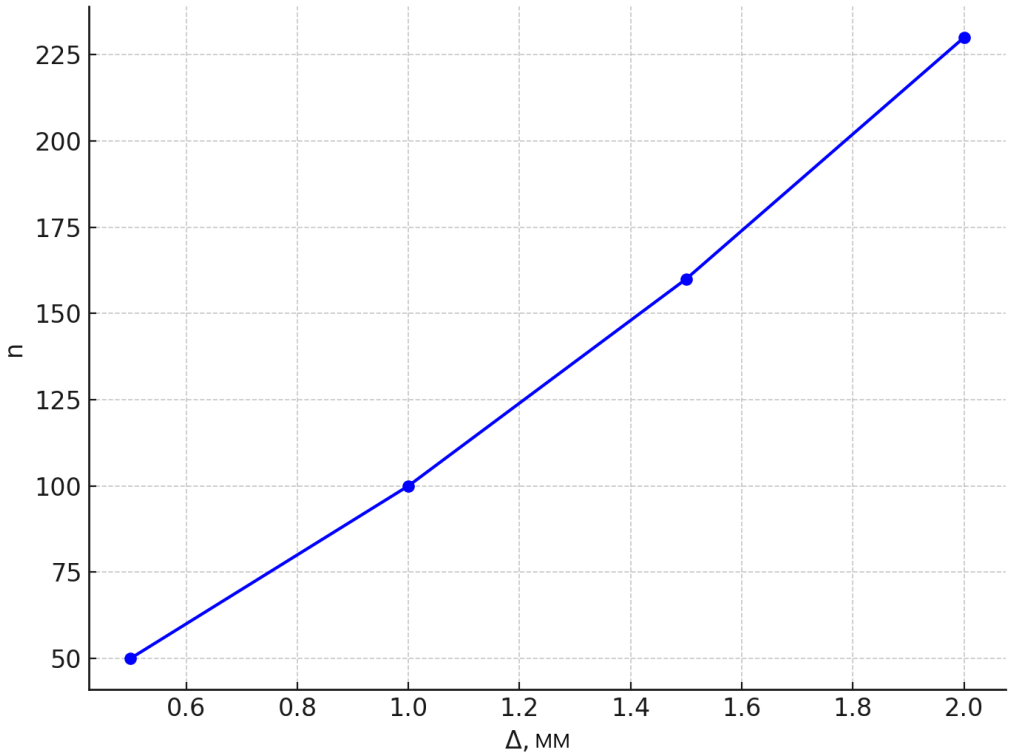


Рис. 1. Графік залежності кількості обертів осі без заміни мастильного матеріалу до досягнення граничної концентрації ПАР залежно від величини діаметрального зазора

Аналіз отриманих результатів, поданих на графіку (рис. 2), свідчить про те, що необхідний об'єм подавання мастильного матеріалу до моторно-осьового підшипника локомотива є функцією двох основних параметрів — швидкості руху та величини діаметрального зазора. Зі зростанням швидкості обертання осі зростає і потреба в мастилі, що зумовлено інтенсифікацією гідродинамічних процесів у зоні тертя.

Максимальних значень витрати мастильного матеріалу досягають за швидкості руху локомотива 80 км/год за умови діаметрального зазора Δ = 2 мм, що складають Q = 0,96 дм³/хв. Це свідчить про підвищену інтенсивність витрат мастила за високих швидкостей обертання, що зумовлює необхідність забезпечення відповідного рівня подавання для підтримання безперервного гідродинамічного змащування.

У діапазоні низьких швидкостей (до 25–30 км/год) витрати мастильного матеріалу змінюються в межах Q = 0,05–0,36 дм³/хв залежно від величини діаметрального зазора. Отримані результати підтверджують необхідність адаптивного керування подаванням мастила з урахуванням фактичного режиму руху локомотива і стану підшипникового вузла.

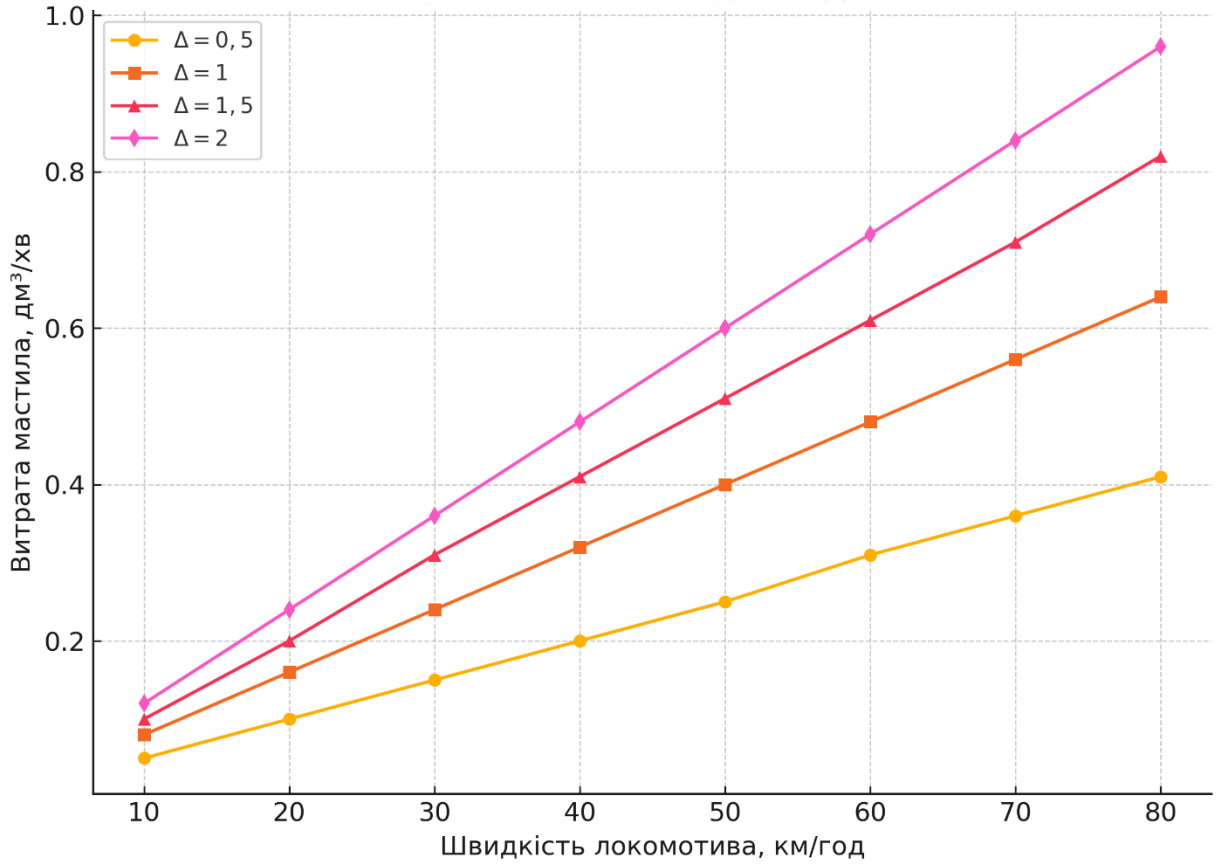


Рис. 2. Графік розрахунку необхідного подавання мастильного матеріалу до МОП залежно від швидкості руху локомотива та величини діаметрального зазора

Висновки. Проаналізовані залежності необхідного об'єму подавання мастильного матеріалу до моторно-осьового підшипника тепловоза 2ТЕ116 від швидкості руху локомотива та величини діаметрального зазора дали змогу встановити критичні умови змащування, що впливають на надійність роботи підшипникового вузла. Встановлено, що зі збільшенням швидкості руху до 80 км/год і величиною діаметрального зазора Δ = 2 мм витрати мастильного матеріалу досягають максимального значення Q = 0,96 дм³/хв, тоді як за низьких швидкостей (до 30 км/год) витрати істотно зменшуються до рівня Q = 0,05–0,36 дм³/хв.

Це свідчить про необхідність перегляду принципів подавання мастила в циркуляційній системі змащування МОП, оскільки її робота дуже залежна від швидкості обертання колісної пари та не враховує реальні експлуатаційні навантаження і стан вузла. Для забезпечення стабільного гідродинамічного режиму змащування, особливо за низьких швидкостей і після тривалих зупинок, доцільним є впровадження системи примусового подавання мастильного матеріалу, незалежної від швидкості руху локомотива. Це дасть змогу підвищити ефективність і надійність роботи моторно-осьових підшипників і зменшити ризик їхнього передчасного зносу.

Список використаних джерел

1. Стефанов В., Савченко А. Аналіз існуючих систем змащування моторно-осьових підшипників. *Proceedings of the XIV International Scientific and Practical Conference.* Copenhagen, Denmark. 2023. P. 403-404.

2. Lubricant distributions and lubrication state under regular and quantitative oil supply / L. Wenzhe et al. *Tribology International*. 2023. Vol. 43, No. 5. P. 506-516. URL: https://doi.org/10.16078/j.tribology.2022002 (last access: 12.04.2025).

3. Zhu J., Li H. Numerical analysis on the start behavior of rough journal bearings during the gear pump meshing cycle. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J*. 2020. Vol. 234, No. 8. P. 1275-1295. URL: https://doi.org/10.1177/1350650120908116 (last access: 07.04.2025).

4. Li H., Cao J. The tribological properties of bearing alloys under oil lubrication. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C*. 2020. Vol. 234, No. 10. P. 2042-2052. URL: https://doi.org/10.1177/0954406220902168 (last access: 10.04.2025).

5. Adsorption Characteristics and Mechanical Responses of Lubricants Containing Polymer Additives under Fluid Lubrication with a Narrow Gap / Otsuka M., Nishimura S. et al. *Langmuir*. 2024. Vol. 40, No. 2. P. 215–227. URL: https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.3c03725 (last access: 12.04.2025).

6. Груник І. С. Розрахунок подачі осьової оливи в моторно-осьовий підшипник локомотива з урахуванням адсорбційних явищ на поверхнях тертя. *Збірник наукових праць Української державної академії залізничного транспорту*. Харків: УкрДАЗТ 2013. Вип. 136. С. 77-82.

7. Лысиков Е. Н., Косолапов В. Б., Воронин С. В. Расчет толщины адсорбированных слоев молекул ПАВ на поверхностях. *Автомобильный транспорт: збірник наукових праць ХНАДУ*. 2001. № 7-8. С. 95-99.

Стефанов Володимир Олександрович, кандидат технічних наук, доцент кафедри машинобудування та технічного сервісу машин, Український державний університет залізничного транспорту.
ORCID iD: 0000-0002-7947-2718.Тел:. +38 (068) 819-84-27. E-mail: vstef@ukr.net.
Савченко Андрій Дмитрович, аспірант кафедри машинобудування та технічного сервісу машин, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0009-0005-0418-3945. Тел.: +38(050) 90-58-406.
E-mail: 0509058406a@gmail.com.

Stefanov Volodymyr, PhD (Tech.), Associate Professor, Department of Mechanical Engineering and Technical Service of Machines, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0002-7947-2718.
E-mail: vstef@ukr.net.
Andrii Savchenko, postgraduate student, Department of Mechanical Engineering and Technical Service of Machines, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0009-0005-0418-3945.
E-mail: 0509058406a@gmail.com.

Статтю прийнято 29.05.2025 р.

УДК 629.42

ВИЗНАЧЕННЯ І ОПТИМІЗАЦІЯ ЗАПАСІВ ДЛЯ ФУНКЦІОНУВАННЯ РЕМОНТНОГО ГОСПОДАРСТВА ЛОКОМОТИВНОГО ДЕПО

Д-р техн. наук О. С. Крашенінін, кандидати техн. наук О. О. Шапатіна, О. М. Обозний, старш. викл. О. О. Анацький, асп. К. С. Бондаренко

DETERMINATION AND OPTIMIZATION OF INVENTORIES FOR THE FUNCTIONING OF THE REPAIR MANAGEMENT OF THE LOCOMOTIVE DEPOT

**D. Sc. (Tech.) O. S. Krasheninin, PhD (Tech.) O. O. Shapatina,
PhD (Tech.) O. M. Obozny, Senior Lecturer O. O. Anatskyi,
postgraduate student K. S. Bondarenko**

DOI: https://doi.org/10.18664/1994-7852.212.2025.336440

Анотація. *Стабільна робота ремонтного господарства забезпечена наявністю необхідної кількості запасів вузлів і агрегатів, а також матеріалів.*

Це визначає необхідність формування такої структури ремонтних дільниць, яка функціонує надійно і забезпечує високий рівень виконання ремонтних робіт.

У статті розглянуто процедуру визначення і оптимізації запасів для ефективного функціонування ремонтного господарства локомотивного депо на підставі оптимізації витрат, пов'язаних із придбанням, дефіцитом запасів і витрат на його збереження.

Рівень величини запасів визначають з урахуванням рівня надійності обладнання, для якого створено запас, за планований період роботи локомотивів, тобто з урахуванням частоти заміни кожної одиниці обладнання.

Ключові слова: *ремонтне господарство, запаси, дефіцит, профіцит, відносні приведені витрати.*

Abstract. *In today's conditions, rolling stock maintenance is not only a means of maintaining operational efficiency, but also an important component of traffic safety, environmental safety of transportation and increasing profitability. Rational planning and use of the depot structure, organization of technological processes, effective use of equipment and qualified personnel allow optimizing costs and improving the quality of maintenance and repair of rolling stock. Stable operation of the repair facility is ensured by the presence of the necessary number of permanent stocks of components and assemblies, as well as materials. This determines the need to form such a structure of repair sections of the locomotive facility, which functions reliably and ensures a high level of performance of repair work and maintenance. The article considers the procedure for determining and optimizing the size of reserves for the effective operation of the repair facility of the locomotive depot based on optimizing costs associated with the acquisition, the presence of a shortage of stocks and the costs of its preservation. From the practical work of the depot, it is known that sometimes in the warehouses of the enterprise, or some departments, there are no spare parts and materials of some items and at the same time there are surpluses of other items of inventory. In the absence of necessary spare parts, when the rolling stock fails, its forced downtime occurs, which leads to losses. But excess spare parts are also associated with losses due to the "freezing" of funds and increased storage costs. One of the reasons leading to the above shortcomings is the lack of substantiated methods for determining the need for spare parts. The level of inventory is determined taking into account the level of reliability of the equipment for which the inventory is created, for the*

planned period of operation of the locomotives, that is, taking into account the frequency of replacements of each unit of equipment. Keywords: repair facilities, inventories, deficit, surplus, relative reduced costs.

Keywords: *repair economy, stocks, deficit, surplus, relative reduced costs.*

Вступ. Ремонтне господарство забезпечує необхідний рівень надійності локомотивного парку депо і базоване на оптимальному співвідношенні і поєднанні особливих і штучних елементів виробництва, тобто рівні технічного, технологічного і матеріального забезпечення і кваліфікації ремонтного персоналу.

Високий рівень готовності рухомого складу до експлуатації визначений якістю і часом проведених ремонтних заходів.

На жаль, уже довгий час фінансування ремонтної інфраструктури забезпечено за залишковим принципом, що призвело до несвоєчасного оновлення ремонтного фонду сучасними приладами механізації і автоматизації виробничих процесів і впровадження технологій і устаткування з діагностування стану вузлів, агрегатів і деталей локомотивів [1-3].

З іншого боку, це не завжди виправдані простої в ремонті, що викликано відсутністю необхідного запасу, агрегатів і матеріалів.

У таких умовах актуальним стає завдання визначення оптимальних запасів цих складових з урахуванням дійсно необхідної їхньої кількості на основі інформації про надійність їх в експлуатації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблемам підвищення ефективності експлуатації тягового рухомого складу присвячено багато праць наукового і прикладного характеру.

Так, у роботах [4, 5] розглянуто питання оптимізації системи ТО, ПР ТРС на основі оптимізації міжремонтних пробігів і обсягів ТО, ПР ТРС з урахуванням використання технологій і устаткування з діагностування обладнання локомотивів.

У дослідженні [5] основну увагу приділено обґрунтуванню витрат на життєвий цикл ТРС.

Роботи прикладного характеру направлені на створення і реалізацію удосконалення системи оцінювання технічного стану окремого обладнання ТРС [6, 7].

У деяких дослідженнях акцентовано на доцільності запровадити сервіс у локомотивних депо замість або як допоміжну систему підтримки і відновлення працездатного стану ТРС до прийнятої планово-попереджувальної системи ТО, ПР [8].

Порушують питання про зміну ролі виробників ТРС не тільки щодо виробництва, але моніторингу і виконання великих ремонтів на власних потужностях.

Як фундаментальні дослідження треба згадати роботи Гнеденка Б. В., Вентцеля Є. С., Белмана та ін., у яких розглянуто питання надійності і оцінювання системи ТО, ПР технічних систем [9].

Але для реальних умов експлуатації, і особливо організації ремонту обладнання ТРС, питання забезпечення ремонтної галузі обґрунтованим об’ємом запасів потребують подальшого розвитку, особливо враховуючи невизначені обмеження і реальний стан технічного об’єкта.

Мета та завдання дослідження. Мета дослідження полягає в розробленні підходів для визначення оптимальної величини запасів для забезпечення функціонування ремонтного господарства депо, ураховуючи надійність обладнання, для якого потрібні відповідні запаси, і чинників витрат на придбання, наявності дефіциту або, навпаки, надлишку (профіциту) цих запасів.

Для реалізації поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Обґрунтувати особливості формування величин запасів.
2. Визначити складові, що визначають рівень і динаміку зміни запасів.

3. Розрахувати оптимальну величину запасів для ремонтного господарства.

Виклад основного матеріалу. Для великих ремонтних підприємств із ремонту ТРС і його обладнання передбачено спеціальні запаси, які називають оборотними.

Традиційно оборотний запас агрегатів поділяють на технологічний і страховий, що пов'язано з забезпеченням технологічного процесу і випадковим характером потреби, пов'язаної з непередбаченими обставинами.

Такий поділ зручний для планування величини запасів для великих видів ремонтів, що значно скорочує простій під технологічними операціями.

Однак для масових потреб запасних частин, таких як кріпильне обладнання, окремі вузли систем локомотивів, цей метод неможливо використовувати.

Із практики відомо, що іноді на складах депо, відділень, залізниць відсутні запасні частини і матеріали одних найменувань, у той же час є надлишки деталей інших найменувань. За відсутності необхідних запасних частин після відмови локомотива наступає його вимушений простій, що призводить до збитків. Якщо ж є зайві запасні частини, це також пов'язано зі збитками внаслідок «заморожування» засобів і витрат зберігання. Одна із причин, що призводять до зазначених недоліків, – відсутність обґрунтованих методів визначення потреби в запасних частинах.

Величина запасу деталей розглянутого типу за планований період $T_{пл}$ роботи парку локомотивів чисельністю N має відповідати рівню надійності цих деталей, їхнім фактичним витратам. Останній переважно залежить від міжремонтних пробігів L_p, тому що ресурс деталі до заміни

$$\widehat{L}_{ср} = \int_0^{L_p} P(l)dt.$$

А середній параметр потоку замін деталей такого типу $\overline{\omega} = \frac{1}{\widehat{L}_{ср}}$.

За планований період $T_{пл}$ (залежить від періодичності поставок запасних частин) кожний локомотив виконає пробіг

$$L_{пл} = \frac{L_p}{365} \cdot T_{пл},$$

де L_p – річний пробіг, протягом якого середня частота замін кожної деталі складе

$$p_з = \overline{\omega} L_{пл} = \frac{L_p T_{пл}}{365\,\widehat{L}_{ср}}.$$

Потрібно визначити, яку кількість z_0 запасних частин необхідно мати на початку періоду за умови забезпечення мінімуму витрат на їхнє придбання, зберігання зайвих деталей і збитків у випадку дефіциту.

Імовірність того, що відмовить рівно m деталей за період $T_{пл}$, визначимо за формулою Пуассона

$$P_{m,n} = \frac{(p_з n)^m}{m!} e^{-p_з n},$$

де $n = kn$ – кількість деталей певного типу на N локомотивах, а k – кількість деталей на локомотиві.

Якщо запас деталей дорівнює z, то дефіцит їх складе $(m\text{-}z)$, а надлишок – $(z\text{-}m)$. Тоді витрати і втрати депо через придбання, надлишок і нестачу запасних частин певного типу визначають за формулами

$$E_{z.n} = c_ц \sum_{m=0}^{n} m P_{m,n}; \qquad (1)$$

$$E_{\text{zн}} = \left(c'_{ц} + c_{зб}\right)\sum_{m=0}^{n-1}\left(\text{z} - m\right)P_{m,n}; \qquad (2)$$

$$E_{zд} = c_{д}\sum_{m=z+1}^{n}\left(m - z\right)P_{m,n}, \qquad (3)$$

де $c_{ц}$ – ціна однієї деталі;

$c_{зб}$ – витрати на зберігання деталі за планований період;

$c_{д}$ – збитки від дефіциту однієї деталі;

$c'_{ц}$ – втрати від невикористання однієї деталі за період.

$$T_{пл,}c'_{ц} = c_{ц}\left[\exp\left(\varepsilon T_{пл}\right) - 1\right].$$

Замість використання нормативного коефіцієнта $E_{н}$, що має дискретний характер, застосуємо коефіцієнт ε, що допускає приведення витрат на будь-який строк, у тому числі менше року. Оскільки в цьому випадку час $T_{пл}$ вимірюють у добах, тоді

$$\varepsilon = \frac{1}{365}\ln\left(1 + E_{zн}\right),$$

і якщо $E_{zн}$ = 0,12, то $\varepsilon = 0{,}309\cdot10^{-3}$, 1/доба.

Сумарні витрати, що залежать від запасу, складуть $E_{zн} = E_{zn} + E_{zu} + E_{zд}$.

Витрати на придбання на підставі рівняння (1) і властивостей розподілу Пуассона $E_{zн} = c_{ц}p_{з}n$.

Суми у виразах (2), (3) перетворимо до вигляду

$$E_{zн} = c''_{ц}z\sum_{m=0}^{z-1}P_{m,n} - c''_{ц}p_{з}n\sum_{m=0}^{z-1}P_{m-1,n};$$

$$E_{zд} = c_{д}p_{з}n\sum_{m=z+1}^{n}P_{m,n} - c_{д}z\sum_{m=z+1}^{n}P_{m,n};$$

де $c''_{ц} = c'_{ц} + c_{зб}$.

Використовуючи табульовану функцію $q\left(x\right) = \sum_{m=x}^{\infty}\frac{a^{m}}{m!}e^{-n}$, одержимо

$$E_{zc} = c_{ц}np_{з} - c''_{ц}\left\{z\left[1 - q\left(z\right)\right] - np_{з}\left[1 - q\left(z - 1\right)\right]\right\} + c_{д}\left[np_{з}q\left(z\right) - zq\left(z + 1\right)\right].$$

Розглянемо відносні питомі витрати

$$U_{z} = \frac{E_{zc}}{nc_{ц}} = 1 + \frac{\nu_{z} - p_{з}}{\gamma_{н} + \gamma_{д}}\left(\frac{\gamma_{н}}{\gamma_{н} + \gamma_{д}} - q\left(\nu_{z}\right)\right), \qquad (4)$$

де $\gamma_{н} = \frac{c''_{ц}}{c_{ц}}$, $\gamma_{д} = \frac{c_{д}}{c_{ц}}$, $\gamma_{\text{z}} = \frac{z}{n}$, а величину $\frac{1}{n}$ через малість порівняно з ν_{z} (за великих n) не враховано.

Мінімізуючи відомими способами функцію U_{z}, можна визначити оптимальне значення ν_{z0} і запас $z_{0} = \nu_{z0}n$.

За більших значень a у виразі (4) з достатньою точністю

$$q\left(x\right) = 1 - F_{0}\left(\frac{x - a}{\sqrt{a}}\right),$$

де

$$F_{0}\left(y\right) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_{-\infty}^{y}e^{-\frac{t^{2}}{2}}dt.$$

Тоді

$$U_z = 1 + \frac{\nu_z - p_з}{\gamma_н + \gamma_д}\left[F_0\left(\frac{\nu_z - p_з}{\sqrt{\frac{p_з}{n}}}\right) - \frac{\gamma_д}{\gamma_н + \gamma_д}\right].$$

З урахуванням цього розрахуємо значення $U_z = f(\nu_z)$ і зведемо їх у табл. 1-4.

Таблиця 1

Результати розрахунку $U_z = f(\nu_z)$, якщо $P_з = 0,1,\ \gamma_д = 0,1$

$P_з = 0,1;\quad \gamma_н = 0,05;\quad \gamma_д = 0,1;\quad n = 1000$						
ν_z	0,08	0,09	0,10	0,11	0,13	0,15
U_z	1,086	1,034	1,01	1,066	1,11	1,15

Таблиця 2

Результати розрахунку $U_z = f(\nu_z)$, якщо $P_з = 0,1, \gamma_д = 0,5$

$P_з = 0,1;\quad \gamma_н = 0,05;\quad \gamma_д = 0,5;\quad n = 1000$						
ν_z	0,08	0,09	0,10	0,11	0,13	0,15
U_z	1,03	1,01	1,0	0,999	1,005	1,008

Таблиця 3

Результати розрахунку $U_z = f(\nu_z)$, якщо $P_з = 0,15,\ \gamma_д = 0,1$

$P_з = 0,15;\quad \gamma_н = 0,05;\quad \gamma_д = 0,1;\quad n = 1000$								
ν_z	0,08	0,09	0,10	0,11	0,13	0,15	0,17	0,19
U_z	1,31	1,27	1,22	1,17	1,08	1	1,03	1,08

Таблиця 4

Результати розрахунку $U_z = f(\nu_z)$, якщо $P_з = 0,15,\ \gamma_д = 0,5$

$P_з = 0,15;\quad \gamma_н = 0,05;\quad \gamma_д = 0,5;\quad n = 1000$								
ν_z	0,08	0,09	0,10	0,11	0,13	0,15	0,17	0,19
U_z	1,21	1,09	1,083	1,06	1,03	1,0	1,001	1,007

На підставі отриманих даних на рис. 1 і 2 наведено залежності $U_z = f(\nu_z)$.

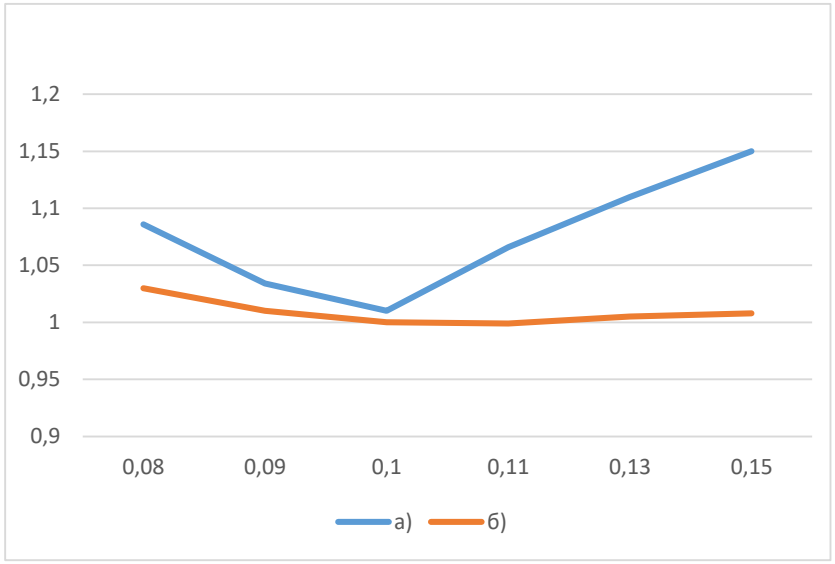


Рис. 1. Оптимізація визначення запасів агрегатів у локомотивному депо:
а - $P_з$ = 0,1; $\gamma_н$ = 0,05; $\gamma_д$ = 0,1; n = 1000;
б - $P_з$ = 0,1; $\gamma_н$ = 0,05; $\gamma_д$ = 0,5; n = 1000

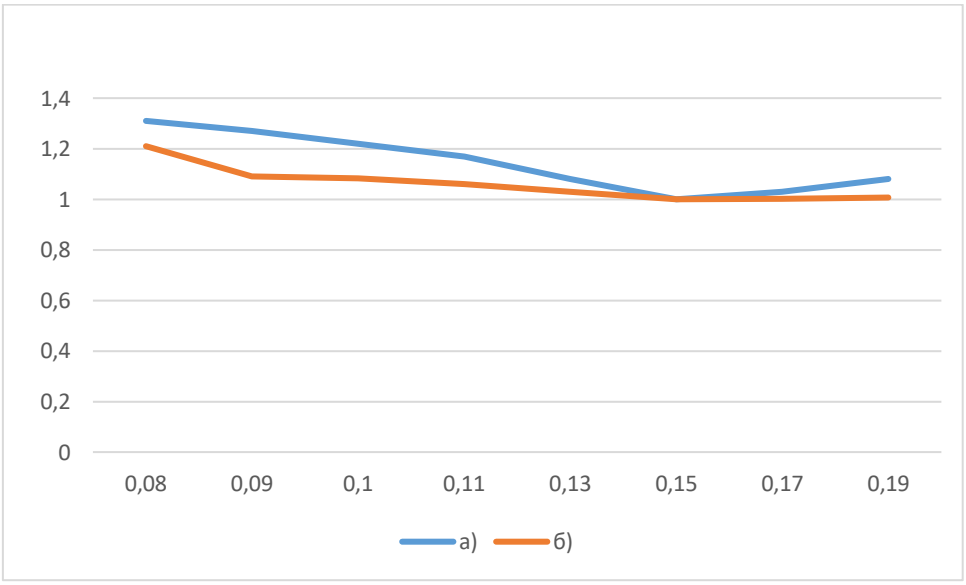


Рис. 2. Оптимізація визначення запасів агрегатів у локомотивному депо:
а - $P_з$ = 0,15; $\gamma_н$ = 0,05; $\gamma_д$ = 0,1; n = 1000;
б - $P_з$ = 0,15; $\gamma_н$ = 0,05; $\gamma_д$ = 0,5; n = 1000

Оптимальна величина запасів (рис. 1) для випадку а) $z_1 = 1000 \bullet 0{,}10 = 100$, для випадку б) $z_2 = 1000 \bullet 0{,}11 = 110$, а для рис. 2 у випадку а) $z_3 = 1000 \bullet 0{,}15 = 150$, у випадку б) $z_4 = 1000 \bullet 0{,}17 = 170$.

Висновки. За результатами проведеного дослідження отримано такі результати.

Обґрунтовано особливості формування величин запасів у локомотивному депо.

Визначено складові, що визначають рівень і динаміку зміни запасів: $P_з$, $\gamma_н$, $\gamma_д$, v_z.

Розраховано оптимальну величину запасів для ремонтного господарства, що подано на рис. 1 і 2 залежно від $P_з$, $\gamma_н$, $\gamma_д$, v_z.

Рівень $U_{z\ min}$ залежить від значення коефіцієнта $\gamma_д$ і з його збільшенням зміщується вправо по осі абсцис.

Список використаних джерел

1. Проект Закону України про залізничний транспорт України: від 06.09.2019 р. за № 1196-1. URL: w1.c1.rada.gov.ua.

2. Державна цільова програма реформування залізничного транспорту на 2010-2019 роки: затв. Постановою КМУ 16.12.2000 р. № 1390 із змінами від 26.10.2011 р. № 1106. URL: kmu.gov.ua.

3. Комплексна програма оновлення залізничного рухомого складу України на 2008-2020 роки: затв. Наказом МТЗУ від 14.10.2008 р. № 1259. Київ: ДНДЦ Укрзалізниці, 2009. 299 с.

4. Понтиселли К. Стоимость жизненного цикла жедезнодорожного подвижного состава: от теории к практике. *Техника железных дорог*. 2009. № 4. 74 с.

5. Тартаковський Е. Д., Уманець М. Г., Аулін Д. О. Визначення життєвого циклу тягового рухомого складу (ТРС). *Збірник наукових праць УкрДАЗТ*. Харків: УкрДАЗТ, 2006. Вип. 72. С. 82-86.

6. Крашенінін О. С., Фалендиш А. П. Оцінка життєвого циклу локомотивів. *Зб. наук. праць УкрДАЗТ*. Харків: УкрДАЗТ, 2001. Вип. 46. С. 55-58.

7. Візняк Р. І., Ловська А. О., Рибін А. В. Основи теорії коливань та стійкості рухомого складу : конспект лекцій. Харків: УкрДУЗТ, 2024. Ч. 2. 62 с.

8. Калабухін Ю. Є., Тартаковський Е. Д. Теоретичні положення оновлення тягового рухомого складу з урахуванням життєвого циклу. *Зб. наук. праць УкрДАЗТ*. Харків: УкрДАЗТ, 2009. Вип. 111. С. 106-120.

9. Гнєденко Б. В. Курс теорії ймовірностей : підручник. Київ: Видавничо-поліграфічний центр «Київський університет», 2010. 464 с.

Крашенінін Олександр Семенович, доктор технічних наук, професор кафедри експлуатації та ремонту рухомого складу, Український державний університет залізничного транспорту, м. Харків, Україна. Тел.: 097 991-70-99. E-mail: krasheninin@kart.edu.ua. Orcid.org/0000-0001-7462-3372.

Шапатіна Ольга Олександрівна, кандидат технічних наук, доцент кафедри управління вантажною і комерційною роботою, Український державний університет залізничного транспорту, м. Харків, Україна. Тел.: +38(066)8124889. E-mail: shapatina.uvkr@kart.edu.ua. Orcid.org/ 0000-0002-9185-6212.

Обозний Олександр Миколайович, кандидат технічних наук, старший викладач кафедри експлуатації та ремонту рухомого складу, Український державний університет залізничного транспорту, м. Харків, Україна. Тел.: 050 303-45-59. E-mail: obozny@kart.edu.ua. Orcid.org/0000-0002-0843-6023.

Анацький Олександр Олександрович, старший викладач кафедри експлуатації та ремонту рухомого складу, Український державний університет залізничного транспорту, м. Харків, Україна. Тел.: 095 737-91-66. E-mail: anatsky@kart.edu.ua. Orcid.org/0000-0002-0132-8767.

Бондаренко Костянтин Станіславович, аспірант кафедри експлуатації та ремонту рухомого складу, Український державний університет залізничного транспорту, м. Харків, Україна. E-mail: kos.bondarenko.kh@gmail.com. Orcid.org/0009-0001-2284-3557.

Krasheninin Oleksandr Semenovych, Doctor of Technical Sciences, Professor, Ukrainian State University of Railway Transport, Department of Operation and Repair of Rolling Stock, Professor, Kharkiv, Ukraine. Tel.: 097 991-70-99. E-mail: krasheninin@kart.edu.ua. Orcid.org/0000-0001-7462-3372.

Shapatina Olga Oleksandrivna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Ukrainian State University of Railway Transport, Department of Cargo and Commercial Work Management, Associate Professor of the Department, Kharkiv, Ukraine. Tel.: +38(066)8124889. E-mail: shapatina.uvkr@kart.edu.ua. Orcid.org/ 0000-0002-9185-6212.
Obozny Oleksandr Mykolayovych, Candidate of Technical Sciences, Ukrainian State University of Railway Transport, Department of Operation and Repair of Rolling Stock, Senior Lecturer, Kharkiv, Ukraine. Tel.: 050 303-45-59. Email: obozny@kart.edu.ua. Orcid.org/0000-0002-0843-6023.
Anatskyi Oleksandr Oleksandrovych, Ukrainian State University of Railway Transport, Department of Operation and Repair of Rolling Stock, Senior Lecturer, Kharkiv, Ukraine. Tel.: 095 737-91-66. E-mail: anatsky@kart.edu.ua. Orcid.org/0000-0002-0132-8767.
Bondarenko Kostiantyn Stanislavovych, Ukrainian State University of Railway Transport, Department of Operation and Repair of Rolling Stock, postgraduate student, Kharkiv, Ukraine. E-mail: kos.bondarenko.kh@gmail.com. Orcid.org/0009-0001-2284-3557.

Статтю прийнято 16.06.2025 р.

УДК 629.454.2

ДО ПИТАННЯ ПРОГНОЗУВАННЯ ВІДМОВ БУКС ВАНТАЖНИХ ВАГОНІВ

Д-р техн. наук І. Е. Мартинов, канд. техн. наук А. В. Труфанова,
аспіранти О. М. Литовченко, Д. В. Фрейліх

ON THE ISSUE OF FORECASTING FAILURES OF FREIGHT WAGON AXLE BOXES

Dr. Sc. I. Martynov, PhD (Tech.) A. Trufanova,
postgraduate student O. Lytovchenko, postgraduate student D. Freilih

DOI: https://doi.org/10.18664/1994-7852.212.2025.336478

Анотація. *У статті розглянуто розподіл відчеплень вантажних вагонів через відмови роликових букс протягом календарного року. Доведено, що кількість розподілу відчеплень необхідно розглядати як випадкову величину, яка в часі може бути передбачена за допомогою функції, що зумовлює вплив тенденції, сезонності та випадковості. Визначено основні тенденції їхнього розвитку.*

Для аналізу використано метод часових рядів. На підставі статистичних даних про відмови буксових вузлів на залізницях України запропоновано модель прогнозу відчеплень вантажних вагонів щодо нагрівання буксового вузла. Отримані результати можуть бути використані як обґрунтування необхідних обсягів справних колісних пар на ПТО для організації своєчасного ремонту вагонів.

Ключові слова: *вантажний вагон, буксовий вузол, відмова, прогнозування, сезонні коливання.*

Abstract. *The article examines the distribution of freight car uncouplings due to roller bearing failures over the course of a calendar year. Data on car uncouplings from 2017 to 2023 have been analyzed. It was established that the number of freight car uncouplings caused by bearing unit overheating has an uneven structure throughout the year, with seasonal fluctuations observed.*

It has been proven that the distribution of uncoupling events should be considered a random variable that can be predicted over time using a function influenced by trends, seasonality, and randomness. The main trends in their development have been identified.

For the analysis, the time series method was used, which makes it possible to characterize the patterns of change in the phenomenon over time. Based on time series over several years—broken down monthly or quarterly—seasonal fluctuations can be observed. These fluctuations are characterized by regular intra-annual repetitions in level changes from month to month (or quarter to quarter).

A multiplicative model is proposed, where the value of the dynamic series is presented as the product of components depending on the theoretical levels of the dynamic series, seasonal coefficients, and random influences.

Smoothing of the series levels was performed using the moving average method, with a smoothing period of one year.

Based on statistical data on bearing unit failures on Ukrainian railways, a predictive model for freight car uncouplings due to bearing unit overheating is proposed. The obtained results can be used as justification for the required number of serviceable wheelsets at inspection and repair points (PTO) to ensure timely maintenance of freight cars.

Keywords: *freight car, axle boxes, failure, forecasting, seasonal fluctuations.*

Вступ. Залізниці України з моменту їх утворення виконують переважну частину вантажообігу у промисловому комплексі країни. Особливо важлива їхня роль у перевезенні сировини та продукції металургійної промисловості, а також продукції сільського господарства. Але переважна більшість вантажних вагонів уже вичерпала свій ресурс. Вагонний парк потребує масштабного оновлення. Тому перед вагонобудівниками постає завдання розроблення нових інноваційних технічних рішень у конструкціях рухомого складу.

Вагон є складною технічною системою, яка у свою чергу складається з ряду підсистем. Серед останніх необхідно виділити ходові частини, які працюють у надважких умовах. Тому надійній роботі ходових частин і їхніх елементів завжди приділяли особливу увагу. Це повною мірою стосується буксових вузлів вагонів.

Як вантажні, так і пасажирські вагони на залізницях України вже кілька десятиріч обладнані буксовими вузлами з двома циліндричними роликовими підшипниками [1, 3]. Але їхня надійність недостатня для убезпечення руху. Так, на залізницях України у вантажних вагонів під час руху на шляху прямування до 70 % відчеплень через відмови різних елементів конструкції були викликані саме відмовами та надмірним нагріванням роликових букс [3]. Крім того, тисячі випадків відмов буксових вузлів вагонів виявляють засобами дистанційного контролю під час руху або оглядачами вагонів.

Момент виникнення відмови (нагрівання) буксового вузла є випадковою подією, тому що спричиняє затримку поїзда на шляху прямування. Це викликає затримку поїзда та економічні збитки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. З моменту початку впровадження роликових букс у вантажних вагонах науковці та фахівці вагонного господарства розпочали спостереження за експлуатацією їх. Аналіз перших результатів дав змогу визначитися з основними причинами відмов [4, 5] і напрямами удосконалення конструкції. Зусилля фахівців були зосереджені на виборі раціональних значень радіальних та осьових зазорів у підшипниках, покращенні технологій проведення монтувально-демонтувальних робіт, удосконаленні конструкції самих підшипників (виготовлення бортів не перпендикулярно до поверхні кочення, а під деяким нахилом, використання поліпшених марок сталей) [6, 7]. Ряд досліджень присвячені підвищенню надійності торцевого кріплення [8, 9]. Автори дослідження [10] пропонують використовувати в циліндричних роликових підшипниках

поліамідний сепаратор удосконаленої конструкції з підвищеною міцністю.

Спостереження за результатами експлуатації буксових вузлів із циліндричними підшипниками були продовжені фахівцями УкрДУЗТ [11-15]. Проведений аналіз засвідчив, що частка відмов роликових букс вагонів зменшується в абсолютних значеннях. Але, якщо враховувати зменшення вантажообігу та кількість вагонів у робочому парку, надійність буксових вузлів залишається практично незмінною та потребує підвищення.

Подібний аналіз був проведений у дослідженнях [16-19]. Автори детально аналізують причини відмов буксових підшипників вантажних вагонів і пропонують заходи з їх усунення.

Очевидно, що кількість наукових робіт, присвячених аналізу різних аспектів експлуатації та надійності буксових вузлів із циліндричними роликовими підшипниками, досить значна. Лише у статтях [6, 7] зазначено, що переважна більшість відмов роликових букс відбувається в період із листопада по березень. Очевидно, що питання розподілу відмов роликових букс з урахуванням часу використання залишилося поза увагою дослідників.

Мета і завдання дослідження. Метою статті є розроблення методики прогнозування кількості відмов вантажних вагонів, пов'язаних із нагріванням буксового вузла протягом року, на основі застосування методу сезонної декомпозиції випадкової величини.

Основна частина дослідження. Прогнозування – це оцінювання майбутнього з урахуванням глибокого аналізу тенденцій розвитку явищ і його взаємозв'язків. Процес прогнозування передбачає виявлення можливих альтернатив розвитку в перспективі для обґрунтованого їх вибору та ухвалення оптимального рішення.

Прогнозують з урахуванням використання широкого спектра інформації. Але вихідний етап прогнозування завжди пов'язаний з аналізом часових рядів, щоб охарактеризувати закономірність зміни явища в часі. За часовими рядами за кілька років у помісячному чи поквартальному розрізі можна спостерігати сезонні коливання.

Сезонні коливання – це різновид періодичних коливань. Їм притаманні характерні внутрішньорічні повторювання з місяця на місяць (із кварталу на квартал), зміни в рівнях. Іншими словами, сезонні коливання – регулярні підйоми, що повторюються, і зниження рівнів динамічного ряду всередині року протягом ряду років.

Рівень часового ряду доцільно розглядати як функцію тенденції, сезонності та випадковості. Відповідно за мультиплікативної моделі рівень динамічного ряду можна подати як

$$Z_{\text{і}} = Z_{\text{т}} \times K_{\text{с}} \times K_{\text{вип}}, \qquad (1)$$

де $Z_{\text{і}}$ – фактичні значення рівнів динамічного ряду;

$Z_{\text{т}}$ – теоретичні значення рівнів динамічного ряду;

$K_{\text{с}}$ – коефіцієнт сезонності;

$K_{\text{вип}}$ – коефіцієнт впливу випадковості.

Вихідні дані за роками подані в табл. 1.

Зважаючи на те, що сезонність характеризує внутрішньорічні коливання зі згладжуванням рівнів ряду (z_i) методом ковзної середньої, період ковзання має дорівнювати року. Тоді вдасться погасити вплив сезонності. Для випадку, коли рік сприймають як 12-місячний період, це означає, що згладжування низки має бути проведено дванадцятичленною ковзною середньою. Іншими словами, ковзну середню визначають за виразом

$$\check{z}_i = \frac{1}{12}\sum z_{12} \ . \qquad (2)$$

Таблиця 1

Вихідні дані для прогнозування за роками

Місяць	Рік					$\bar{z}_{si} = \frac{1}{n}\sum z_{ij}$
	1	2	…..	*n-1*	*n*	
1	z_{11}	z_{12}	…..	z_{1n-1}	z_{1n}	$\bar{z}_{s1}$
2	z_{21}	z_{22}	…..	z_{2n-1}	z_{2n}	$\bar{z}_{s2}$
3	z_{31}	z	…..	z_{3n-1}	z_{3n}	$\bar{z}_{s3}$
4	z_{41}	z_{42}	…..	z_{4n-1}	z_{4n}	$\bar{z}_{s4}$
5	z_{51}	z	…..	z_{5n-1}	z_{5n}	$\bar{z}_{s5}$
6	z_{61}	z_{62}	…..	z_{6n-1}	z_{6n}	$\bar{z}_{s6}$
7	z_{71}	z	…..	z_{7n-1}	z_{7n}	$\bar{z}_{s7}$
8	z_{81}	z_{82}	…..	z_{8n-1}	z_{8n}	$\bar{z}_{s8}$
9	z_{91}	z_{92}	…..	z_{9n-1}	z_{9n}	$\bar{z}_{s9}$
10	z_{101}	z_{102}	…..	z_{10n-1}	z_{10n}	$\bar{z}_{s10}$
11	z_{111}	z_{112}	…..	z_{11n-1}	z_{11n}	$\bar{z}_{s11}$
12	z_{121}	z_{122}	…..	z_{12n-1}	z_{12n}	$\bar{z}_{s12}$
Разом	$\sum z_i$	$\sum z_i$	$\sum z_i$	$\sum z_i$	$\sum z_i$	$\bar{z} = \frac{1}{n}\sum \bar{z}_{si}$

Згладжені рівні ($\check{z}_i$) характеризують рух кількості відчеплень вагонів, у якому погашено вплив сезонності. Слід вимірювати сезонність у вигляді абсолютної величини $S_i = z_i - \check{z}_i$ і коефіцієнта сезонності $K_{S_i} = z_i/\check{z}_i$. Оскільки аналізують дані протягом ряду років, на кожен вагон за період року припадає кілька коефіцієнтів сезонності (табл. 2). Тому розраховують середні показники сезонності як

$$\overline{K_j} = \frac{1}{\mathrm{n}}\sum K_{S_i} \,. \qquad (3)$$

Сезонні коливання взаємно погашаються протягом року. Тому сума коефіцієнтів (для 12-місячної моделі) дорівнює 12. За практичних розрахунків ця рівність може бути незначно порушена. Тому корегують сезонну компоненту.

Видалення сезонності дає змогу отримати більш чітку картину тенденції. Щоб видалити сезонну компоненту, необхідно поділити фактичний рівень коефіцієнта сезонності. Отже, отримують значення рівнів ряду, зумовлені тенденцією разом із випадковою складовою.

Далі проводять аналітичне вирівнювання цих даних і отримують рівняння тренду – більш чіткий опис власне тенденції низки з елімінуванням як сезонності, так і випадкової складової.

Таблиця 2

Порядок визначення коефіцієнтів сезонності

Місяць	Рік					$\overline{K}_j = \frac{1}{n}\sum \frac{z_i}{\check{z}_i}$
	1	2	…..	*n-1*	*n*	
1	-	$z_{12}/\check{z}_{12}$	…..	$z_{1n-1}/\check{z}_{1n-1}$	$z_{1n}/\check{z}_{1n}$	$\overline{K}_1$
2	-	$z_{22}/\check{z}_{22}$	…..	$z_{2n-1}/\check{z}_{2n-1}$	$z_{2n}/\check{z}_{2n}$	$\overline{K}_2$
3	-	$z_{32}/\check{z}_{32}$	…..	$z_{3n-1}/\check{z}_{3n-1}$	$z_{3n}/\check{z}_{3n}$	$\overline{K}_3$
4	-	$z_{42}/\check{z}_{42}$	…..	$z_{4n-1}/\check{z}_{4n-1}$	$z_{4n}/\check{z}_{4n}$	$\overline{K}_4$
5	-	$z_{52}/\check{z}_{52}$	…..	$z_{5n-1}/\check{z}_{5n-1}$	$z_{5n}/\check{z}_{5n}$	$\overline{K}_5$
6	-	$z_{62}/\check{z}_{62}$	…..	$z_{6n-1}/\check{z}_{6n-1}$	$z_{6n}/\check{z}_{6n}$	$\overline{K}_6$
7	$z_{71}/\check{z}_{71}$	$z_{72}/\check{z}_{72}$	…..	$z_{7n-1}/\check{z}_{7n-1}$	-	$\overline{K}_7$
8	$z_{81}/\check{z}_{81}$	$z_{82}/\check{z}_{82}$	…..	$z_{8n-1}/\check{z}_{8n-1}$	-	$\overline{K}_8$
9	$z_{91}/\check{z}_{91}$	$z_{92}/\check{z}_{92}$	…..	$z_{9n-1}/\check{z}_{9n-1}$	-	$\overline{K}_9$
10	$z_{101}/\check{z}_{101}$	$z_{102}/\check{z}_{102}$	…..	$z_{10n-1}/\check{z}_{10n-1}$	-	$\overline{K}_{10}$
11	$z_{111}/\check{z}_{111}$	$z_{112}/\check{z}_{112}$	…..	$z_{11n-1}/\check{z}_{11n-1}$	-	$\overline{K}_{11}$
12	$z_{121}/\check{z}_{121}$	$z_{122}/\check{z}_{122}$	…..	$z_{12n-1}/\check{z}_{12n-1}$	-	$\overline{K}_{12}$
Разом						$\sum K_i = 12$

Використовуючи потім рівняння тренду для прогнозування, включаємо в прогнозування показник сезонності, тобто сумарно прогнозуємо тренд з урахуванням сезонної складової. Отже, за рівнянням тренду знаходимо теоретичні рівні динамічного ряду, зумовлені впливом тенденції, і далі визначаємо тренд з урахуванням сезонної компоненти:

$$z_s = \check{z}_s \cdot K_j \ . \qquad (4)$$

Порядок знаходження коефіцієнтів випадковості подано в табл. 3.

Відповідно, ураховуючи вищевикладені положення, формулу (1) можна подати як

$$Z_{\text{і}} = Z_{\text{т}} \times \overline{K}_{\text{с}} \times \bar{E}_i \times \bar{L}_j, \qquad (5)$$

де $Z_{\text{і}}$ – фактичні рівні динамічного ряду;

$Z_{\text{т}}$ – теоретичні значення рівнів динамічного ряду;

$\overline{K}_{\text{с}}$ – коефіцієнт сезонності;

$\bar{E}_i$ – коефіцієнт впливу випадковості;

$\bar{L}_j$ – середнє значення коефіцієнта впливу тенденції.

На залізницях України у вагонному господарстві в найбільш несприятливі роки кількість відчеплень вантажних вагонів через відмови роликових букс досягала 51,2 % із загальної кількості відчеплень через технічні несправності. Переважна більшість несправностей буксового вузла пов'язана з підвищенням його нагрівання з різною інтенсивністю.

Контроль стану буксових вузлів в експлуатації проводять візуально на пунктах технічного обслуговування оглядачі вагонів, а на перегонах і підходах до пунктів технічного обслуговування (ПТО) – за допомогою підлогових безконтактних засобів теплового контролю інфрачервоного випромінювання від букс поїздів, що проходять. Фактично КТСМ

(АСДК) є основними апаратними засобами контролю буксових вузлів на залізницях.

Дані системи контролю технічного стану рухомого складу дають змогу своєчасно виявляти несправності ходових частин рухомого складу, що з'являються в процесі експлуатації, і тим самим попереджати виникнення незворотних відмов, здатних призвести до аварій і катастроф.

Проаналізовано інформацію про розподіл кількості відчеплень вагонів із 2017 по 2023 рр., внаслідок чого встановлено, що кількість відчеплень вантажних вагонів через нагрівання буксового вузла має нерівномірну структуру розподілу за сезонами року або, іншими словами, сезонні коливання, а також тенденцію розвитку.

Залежність зміни кількості відчеплень через відмови роликових букс наведена на рис. 1.

Таблиця 3

Порядок знаходження коефіцієнтів випадковості

Місяць	Рік					$\bar{E}_j = \frac{1}{n}\sum \frac{z_i}{z_s}$
	1	2	…..	*n-1*	*n*	
1	z_{11}/z_s	z_{12}/z_s	…..	z_{1n-1}/z_s	z_{1n}/z_s	$\bar{E}_1$
2	z_{21}/z_s	z_{22}/z_s	…..	z_{2n-1}/z_s	z_{2n}/z_s	$\bar{E}_2$
3	z_{31}/z_s	z_{32}/z_s	…..	z_{3n-1}/z_s	z_{3n}/z_s	$\bar{E}_3$
4	z_{41}/z_s	z_{42}/z_s	…..	z_{4n-1}/z_s	z_{4n}/z_s	$\bar{E}_4$
5	z_{51}/z_s	z_{52}/z_s	…..	z_{5n-1}/z_s	z_{5n}/z_s	$\bar{E}_5$
6	z_{61}/z_s	z_{62}/z_s	…..	z_{6n-1}/z_s	z_{6n}/z_s	$\bar{E}_6$
7	z_{71}/z_s	z_{72}/z_s	…..	z_{7n-1}/z_s	z_{7n}/z_s	$\bar{E}_7$
8	z_{81}/z_s	z_{82}/z_s	…..	z_{8n-1}/z_s	z_{8n}/z_s	$\bar{E}_8$
9	z_{91}/z_s	z_{92}/z_s	…..	z_{9n-1}/z_s	z_{9n}/z_s	$\bar{E}_9$
10	z_{101}/z_s	z_{102}/z_s	…..	z_{10n-1}/z_s	z_{10n}/z_s	$\bar{E}_{10}$
11	z_{111}/z_s	z_{112}/z_s	…..	z_{11n-1}/z_s	z_{11n}/z_s	$\bar{E}_{11}$
12	z_{121}/z_s	z_{122}/z_s	…..	z_{12n-1}/z_s	z_{12n}/z_s	$\bar{E}_{12}$
Разом	$\bar{F}_1$	$\bar{F}_2$		$\bar{F}_{n-1}$	$\bar{F}_n$	$\bar{L} = \frac{1}{n}\sum \bar{E}_j = \frac{1}{12}\sum \bar{F}_n$

На рис. 2. подані результати згладжування динамічного ряду методом ковзної середньої порівняно з апроксимуючою кривою. Ці дані визначають загальну тенденцію поведінки випадкової величини. Очевидно, що теоретична крива незначно відрізняється від емпіричної кривої.

Рівняння теоретичної апроксимуючої кривої має такий вигляд:

$$V(t) = -0{,}00006t^4 + 0{,}0128t^3 - 0{,}8435t^2 + 17{,}619t + 159{,}55\,. \qquad (4)$$

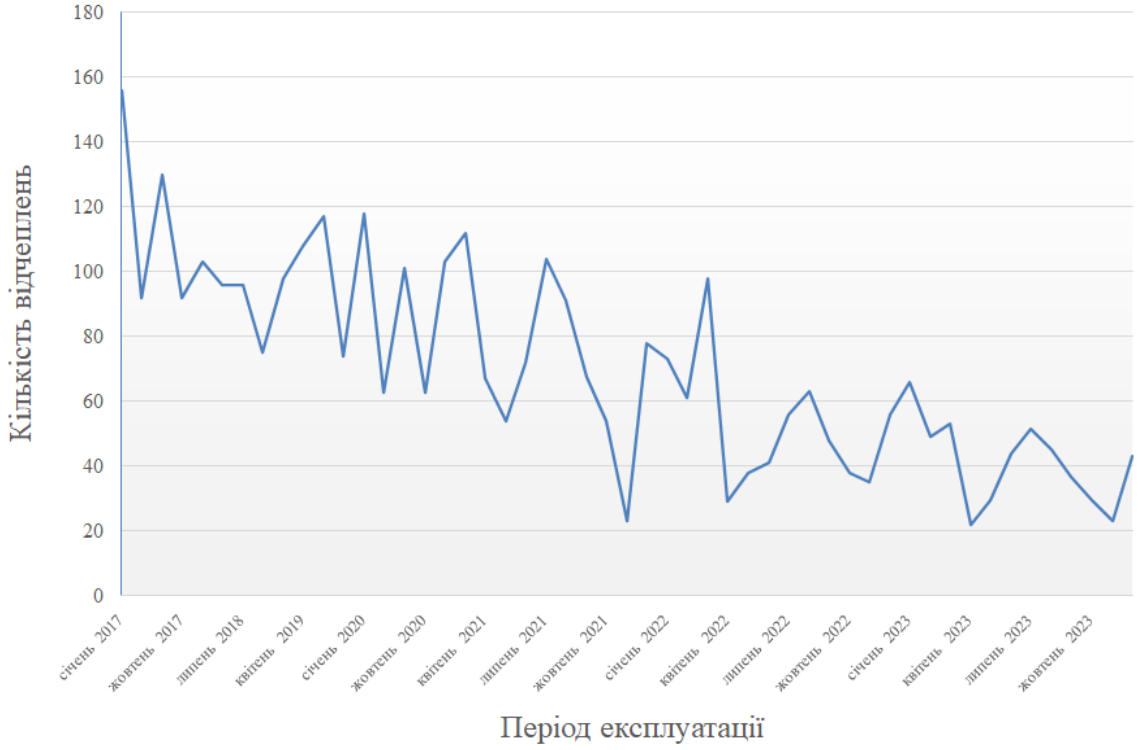


Рис. 1. Динамічний часовий ряд відчеплень вантажних вагонів через нагрівання буксових вузлів

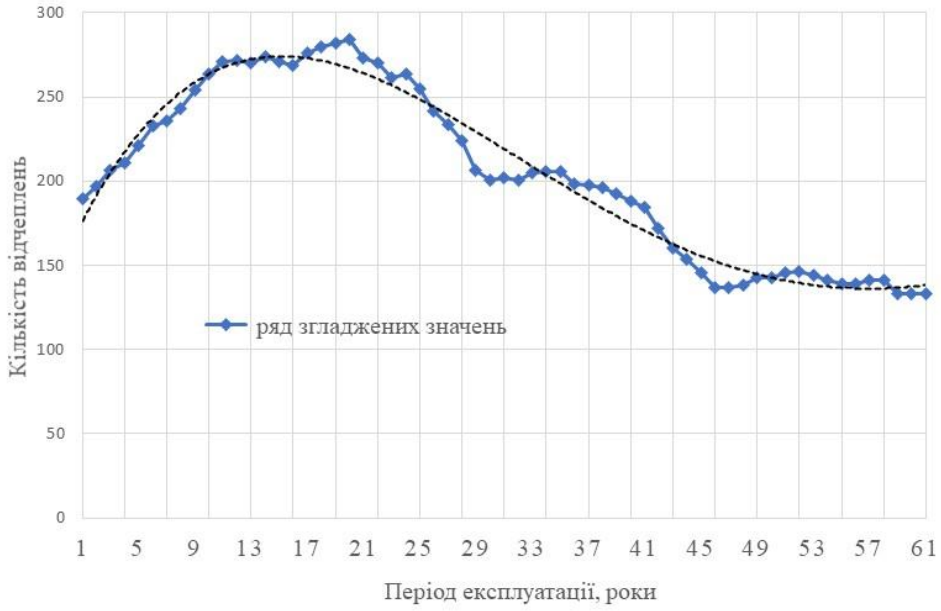


Рис. 2. Фактичний ряд згладжених значень відчеплень вагонів через відмови роликових букс порівняно з теоретичною кривою

У табл. 4 наведені значення коефіцієнтів сезонності. Результати прогнозування подано на рис. 3.

Таблиця 4

Значення коефіцієнтів сезонності

	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	Середній показник сезонності
Січень		0,9101	1,0118	1,2124	1,268	1,157	1,4175	1,1628
Лютий		1,1419	1,2372	1,0105	0,945	1,0322	1,0597	1,0711
Березень		1,5538	1,25788	1,4906	1,3788	1,7265	1,1846	1,4320
Квітень		0,9401	1,0499	0,6864	0,8342	0,5258	0,5023	0,7548
Травень		0,8838	0,8672	0,6091	0,6766	0,7054	0,6818	0,7373
Червень		0,9930	1,0117	0,9957	0,9361	0,7478	1,0469	0,9552
Липень	1,0162	0,9735	1,1114	1,1559	1,3836	1,0567		1,1359
Серпень	1,2225	0,7943	1,2623	1,0914	1,2523	1,2019		1,1375
Вересень	0,9579	0,9021	0,89969	0,9269	0,9436	0,9335		0,9273
Жовтень	0,8010	0,7878	0,7012	0,7654	0,7675	0,7965		0,7692
Листопад	0,6767	0,6861	0,7666	0,665	0,3433	0,7433		0,6469
Грудень	1,0208	1,0906	1,1231	1,1991	1,1876	1,2077		1,1382

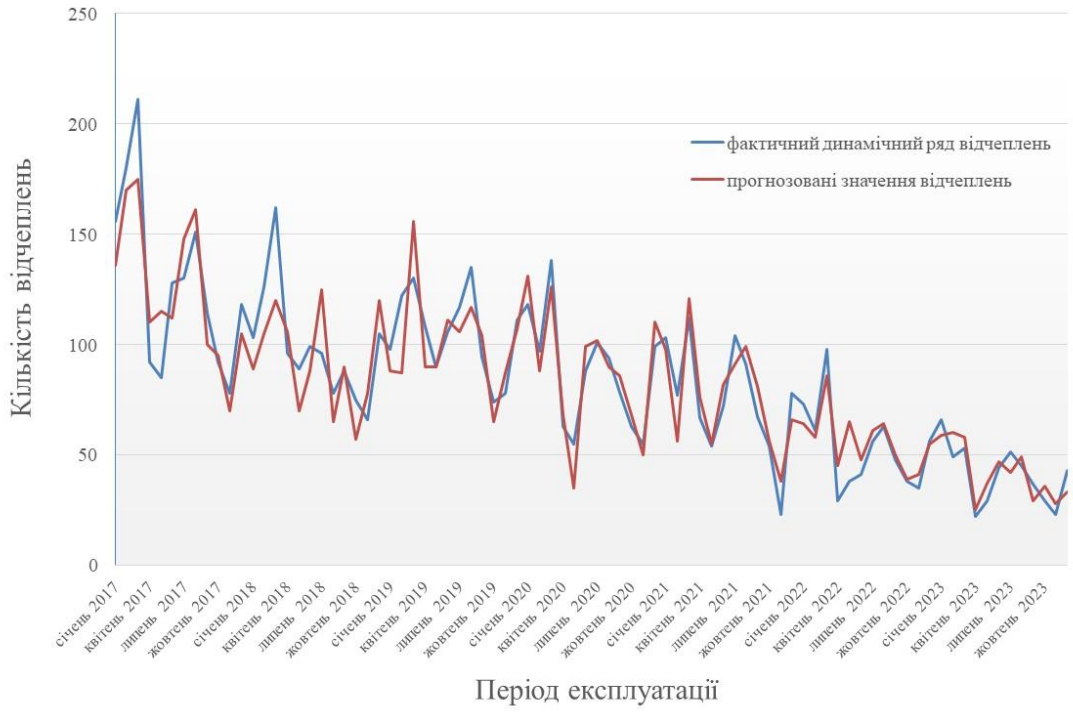


Рис. 3. Фактичний динамічний часовий ряд відчеплень вантажних вагонів через нагрівання буксових вузлів порівняно з прогнозним рядом відчеплень

Очевидно, що отримана модель вдало описує фактичні рівні вихідного динамічного ряду.

Висновки.

1. Систематизовано дані про розподіл кількості відчеплень вантажних вагонів через надмірне нагрівання буксових вузлів за період 2017-2023 рр.

2. Запропоновано модель прогнозування випадкової величини кількості відчеплень вантажних вагонів через надмірне нагрівання буксових вузлів з урахуванням впливу тенденції, сезонності та випадковості.

3. Показано, що кількість відчеплень вантажних вагонів через нагрівання буксових вузлів можна розглядати як випадкову величину, яка в часі може бути передбачена за допомогою функції, що зумовлює вплив тенденції, сезонності та випадковості.

4. Запропонована математична модель прогнозування кількості відчеплень вантажних вагонів через нагрівання буксових вузлів може бути використана для забезпечення постачання необхідної кількості колісних пар на ПТО для організації своєчасного ремонту вагонів.

Список використаних джерел

1. Мартинов І. Е., Труфанова А. В. Сафронов О. М. Roller bearings of axle boxes of wagons: design and calculations. Кременчук, 2022.
2. Петров В. А,. Амелина А. А. Анализ выбора и пути развития конструкций буксового узла для оборудования вагонов магистральных железных дорог СССР. *Труды ВЗИИТа*. 1984. Вып. 122. С. 4-25.
3. Гайдамака А. В. Надійність циліндричних роликопідшипників букс вагонів і локомотивів. *Зб. наук. праць Укр. держ. акад. залізнич. трансп*. Харків: УкрДАЗТ, 2013. Вип. 139. С. 103-111.
4. Прилепов Н. Н., Петров В. А. Что показал анализ отказов подшипников качения. *Железнодорожный транспорт*. 1976. № 4. С. 55-57.
5. Цюренко В. Н. Опыт эксплуатации вагонов с буксовыми узлами на подшипниках качения. *Труды ВНИИЖТ*. Москва, 1982. Вып. 654. С. 4-26.
6. Шавшишвили А. Д. Анализ опыта эксплуатации вагонных букс с роликовыми подшипниками / Ростовский институт инженеров железнодорожного транспорта. *Межвуз. темат. сб.* Ростов-на-Дону, 1982. № 167. С. 13-18.
7. Цюренко В. Н., Петров В. А. Надежность роликовых подшипников в буксах вагонов. Москва: Транспорт, 1982. 96 с.
8. Борзилов И. Д., Гапий В. З., Алексеев Ю. А. Распределение нагрузки по виткам резьбовых соединений осевого крепления букс вагонов. Харьковский институт инженеров железнодорожного транспорта. *Межвуз. сб. науч. тр.* Харьков, 1987. Вып. 3. С. 15-17.
9. Борзилов И. Д., Гайдамака А. В., Федорец Е. В. О возможности повышения эксплуатационной надежности торцового крепления букс с роликовыми подшипниками. Ростовский институт инженеров железнодорожного транспорта. *Межвуз. темат. сб.* Ростов-на-Дону, 1982. Вып. 167. С. 66-69.
10. Андриевский В. Г. Буксовый роликоподшипник повышенной надежности. *Залізничний транспорт України*. 1998. № 1. С. 62-65.
11. Мартынов И. Э. Анализ опыта эксплуатации цилиндрических роликоподшипников букс грузовых вагонов. *Вісник Східноукраїнського державного університету.* 2000. №5 (27). С. 157-159.

12. Мартинов І. Е., Труфанова А. В., Ільчишин В. М. До питання оцінки надійності буксових вузлів критих вантажних вагонів. *Зб. наук. праць ХарДАЗТ*. Харків: ХарДАЗТ, 2013. Вип. 143. С. 69-74.

13. Пути повышения безопасности движения в вагонном хозяйстве / В. Н. Самсонкин, Н. Е. Вещева, А. В. Труфанова, А. Ф. Гаврилюк. *Восточноукраинский журнал передовых технологий*. 2003. № 5. С. 30-32.

14. Мартинов І. Е. До питання оцінки надійності буксових вузлів критих універсальних вагонів. *Зб. наук. праць Укр. держ. акад. залізнич. трансп*. Харків, 2014. Вип. 143. С. 69 –74.

15. До питання забезпечення працездатності буксових вузлів вантажних вагонів / І. Е. Мартинов, А. В. Труфанова, В. О. Шовкун та ін. *Комунальне господарство міст: наук.-техн. зб. Серія: технічні науки та архітектура.* 2024. Т. 4, вип. 185. С. 228-234.

16. Аширбаев Г. К., Утепова А. У., Аширбаева И. А. Повышение надежности буксовых узлов колесных пар железнодорожных вагонов. *Вестник КазАТК.* 2021. № 2 (117). С. 7-12.

17. Analysis of failures of bearings of axle box unit with polyamide cages and prospects of increasing their service life / D. V. Butorin, N. G. Filippenko, A. V. Livshits, S. I. Popov. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, International Conference on Transport and Infrastructure of the Siberian Region (SibTrans-2019).* 2019. Vol. 760. P. 1-10.

18. Failures of bearings and axles in railway freight wagons / V. Gerdun, T. Sedmak, V. Sinkovec, I. Kovse, B. Cene. *Engineering Failure Analysis*. 2007. Vol. 14(5). P. 884-894.

19. Hermnio M. Analysis of failures of rolling stock railways rolling bearings. Fernandes Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Dissertation in Mestrado Integrado em Engenharia Mecanica. 2017. 107 c.

Мартинов Ігор Ернстович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри інженерії вагонів та якості продукції, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: https://orcid.org/0000-0002-0481-3514. Тел.: 057 730-10-36. E-mail: martinov.hiit@gmail.com.

Труфанова Альона Володимирівна, кандидат технічних наук, доцент кафедри інженерії вагонів та якості продукції, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: https:// orcid.org/0000-0003-1702-1054. Тел:. +38 (050) 520-17-81. E-mail: alena.hiit.vagons@gmail.com.

Литовченко Олександр Миколайович, аспірант кафедри інженерії вагонів та якості продукції, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: https:// orcid.org/0000-0003-1702-1054. Тел.: +38 050 161-18-48. E-mail: rokada_t@ukr.net.

Фрейліх Денис Вікторович, аспірант кафедри інженерії вагонів та якості продукції, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: https:// orcid.org/0009-0002-0797-4513. Тел.: +38 057 265-48-67. E-mail: rokada_t@ukr.net.

Martynov Igor, Dr. Sc. (Tech). Professor, head department of wagons engineering and product quality, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: https://orcid.org/0000-0002-0481-3514. Tel. (057) 730-10-36. E-mail: martinov.hiit@gmail.com.

Trufanova Alena, Associate Professor, Department of wagons engineering and product quality, Ukrainian State University of Railway Transport. https://orcid.org/0000-0003-1702-1054**.** Тел.: (057) 730-10-35. E-mail*:* alena.hiit.vagons@gmail.com.

Lytovchenko Oleksandr, postgraduate student, department of wagon engineering and product quality. ORCID iD: https:// orcid.org/0000-0003-1702-1054. Тел.: +38 050 161-18-48. E-mail: rokada_t@ukr.net.

Freilih Denis, postgraduate student, department of wagon engineering and product quality. ORCID iD: https:// orcid.org/0009-0002-0797-4513 Тел.: +38 057 265-48-67.

Статтю прийнято 30.06.2025 р.

УДК: 656.212:004.942

ПРОГНОЗУВАННЯ ОБСЯГІВ ВАГОНОПОТОКІВ ПУНКТІВ ВЗАЄМОДІЇ З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДУ RANDOM FOREST

**Кандидати техн. наук Т. В. Головко, П. В. Долгополов,
аспіранти Д. Ю. Ляпін, І. С. Демченко**

FORECASTING OF VEHICLE FLOW VOLUMES AT INTERACTION POINTS USING THE RANDOM FOREST METHOD

**PhD (Tech.) T. V. Golovko, PhD (Tech.) P. V. Dolgopolov,
postgraduate student D. Yu. Lyapin, postgraduate student I. S. Demchenko**

DOI: https://doi.org/10.18664/1994-7852.212.2025.336486

Анотація. *У статті запропоновано інтегрований підхід для підвищення ефективності планування вагонопотоків через поєднання методів машинного навчання та оптимізації. Зокрема, модель Random Forest використовують для попереднього прогнозування попиту на перевезення, результати якого слугують вхідними даними для подальшого розв'язання оптимізаційної задачі мінімізації затримок у логістичних вузлах. Такий підхід дає змогу враховувати обмеженість ресурсів та інфраструктурні обмеження, що робить його особливо актуальним для складних умов роботи транспортної системи. Отримані результати свідчать про потенціал запропонованої моделі для підвищення точності прогнозування та ефективності логістичного планування.*

Ключові слова**:** *машинне навчання, Random Forest, прогнозування, планування вагонопотоків, ресурсні обмеження, інфраструктурна ефективність.*

Abstract. *The paper presents a comprehensive approach to improving the efficiency of rail freight car flow planning through the integration of modern machine learning techniques with mathematical optimization tools. In light of increasing complexity in logistical processes and the need for rapid response to changes in demand, traditional dispatching and planning methods are becoming less effective. This necessitates the implementation of intelligent solutions capable of adapting to the dynamic operational environment of the railway industry.*

At the initial stage of the study, the Random Forest model was applied, offering high accuracy in freight demand forecasting based on historical data, statistical indicators, and seasonal fluctuations. A key advantage of this method lies in its ability to detect hidden dependencies among numerous factors affecting transportation demand. The resulting forecasts serve as input data for the subsequent optimization of railcar allocation across the railway network.

The second stage involves the development of an optimization model that accounts for both infrastructure and resource constraints, including station throughput capacity, available locomotive fleet, crew availability, and time restrictions for shipment execution. The model's objective function aims to minimize total delays, idle time, and bottlenecks at key logistics nodes, ultimately leading to reduced operational costs and more efficient utilization of rail assets.

Simulation results based on test scenarios derived from real operational data demonstrate a significant improvement in both forecast accuracy and planning efficiency compared to conventional methods. The findings confirm the feasibility and effectiveness of integrating analytical models into the decision-making processes of rail freight operations. The proposed approach can play a key role

in the digital transformation of the railway sector, contributing to enhanced logistics service quality and improved competitiveness of rail transport as a whole.

Keywords: *machine learning, Random Forest, forecasting, train flow planning, resource constraints, infrastructure efficiency.*

Вступ. Залізничні вантажні перевезення є основним компонентом світової торгівлі, що з'єднує виробників і споживачів у різних регіонах і країнах, тому їх надійність відіграє вирішальну роль у забезпеченні стабільної роботи глобального ланцюга поставок, стимулюванні економічного зростання, посиленні соціальної зв'язності та досягненні сталого розвитку. Точне прогнозування залізничних вантажних перевезень допомагає оцінювати їхні обсяги для подальшого планування відповідних ресурсів, інфраструктури, логістики, експлуатації рухомого складу та оптимізації перевізного процесу, що сприятиме покращенню стабільності та надійності послуг. Процес прогнозування вагонопотоків оцінює майбутній обсяг перевезень залізничним транспортом, зокрема кількість вагонів, які проходитимуть певними маршрутами та пунктами взаємодії в заданий період часу [1], і здійснюваний основними методами: трендовий аналіз, середніх значень, регресійний аналіз, імітаційне моделювання, машинне навчання. До методів машинного навчання належить метод Random Forest (RF), який працює з великими обсягами даних, здатний виявляти складні залежності між вхідними параметрами, прийнятний для точного прогнозування за наявності достатньо повної та чистої історичної інформації. Random Forest – це така комбінація дерев, за якої кожне дерево залежить від значень випадкового вектора, вибірка якого здійснюється незалежно та з однаковим розподілом для всіх дерев у лісі. Похибка узагальнення лісу класифікаторів дерев залежить від сили окремих дерев у лісі та кореляції між ними [2]. Алгоритм випадкового лісу оцінює важливість змінної, дивлячись на те, на скільки збільшується кількість помилок прогнозування зі зміною її даних [3].

Спираючись на вищенаведене, використання RF для прогнозування вагонопотоку в пунктах взаємодії залізничного та інших видів транспорту – актуальне й обґрунтоване рішення, особливо в умовах складної логістики, багатьох факторів впливу та обмеженості точних даних.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Питання необхідності прогнозування вагонопотоків виникає внаслідок нерівномірного навантаження мережі, яке є одним з факторів зростання простоїв рухомого складу в пунктах взаємодії. При цьому на складність прогнозування впливає багато факторів, такі як наявність багатьох змінних, сезонність, геополітичні змінні, поточні експлуатаційні фактори, неоднорідність даних і їх неповнота, потреба в інтероперабельності інформаційних даних.

Огляд попередніх досліджень показує, що метод RF активно застосовуваний у логістиці на транспорті для моделювання та прогнозування складних процесів. У роботі [4] досліджено застосування алгоритму RF для прогнозування вантажообігу порту на прикладі Шанхайського порту. Автори підкреслюють важливість точного прогнозування портової пропускної здатності для ефективного управління логістичними потоками та інфраструктурного планування. Використовуючи історичні дані про вантажообіг, економічні індикатори та інші релевантні фактори, модель RF демонструє високу точність порівняно з традиційними методами прогнозування. Дослідження підтверджує потенціал машинного навчання як ефективного інструменту для ухвалення стратегічних рішень у сфері перевезень.

Автори [5] розглядають застосування алгоритмів машинного навчання для прогнозування обсягів авіаційних вантажоперевезень і досліджують ефективність методу порівняно з традиційними статистичними моделями, включаючи авторегресійні моделі. На основі історичних даних про авіаційні вантажопотоки модель машинного навчання продемонструвала вищу точність прогнозування. Результати підкреслюють потенціал використання інтелектуальних алгоритмів як інструменту підтримки ухвалення рішень в авіаційному транспортному плануванні.

Цей метод виявився ефективним у багатьох транспортних задачах, включаючи прогнозування вагонопотоків, завдяки стійкості до перенавчання, здатності працювати з великою кількістю ознак і врахуванню взаємозв'язків між ними. Отримані результати мають практичне значення для проєктування інтелектуальних транспортних систем [6].

Застосування RF у транспортній сфері дає змогу досягти високої точності прогнозування, що було підтверджено в дослідженні [7], де модель переважала традиційні регресійні підходи за значенням R^2 і зниженням помилки прогнозу.

Отже, методи ансамблевого навчання, зокрема RF, демонструють високу адаптивність і надійність у задачах прогнозування вагонопотоків. Вони дають змогу працювати з великою кількістю гетерогенних ознак, ураховувати складні взаємозалежності та забезпечують стабільні результати навіть за наявності шуму в даних. Це робить їх перспективними для впровадження в системи підтримки ухвалення рішень у галузі залізничної логістики.

Визначення мети та завдання дослідження. Метою дослідження є розроблення моделі прогнозування обсягів вагонопотоків пунктів взаємодії з використанням методу RF для підвищення точності прогнозів ухвалення ефективних рішень у сфері транспортного планування та логістики. Для досягнення сформульованої мети потрібно вирішити такі завдання: аналіз сучасних методів прогнозування вагонопотоків, акцентуючи на машинному навчанні [8], алгоритми ансамблевого типу; попередня обробка даних: очищення, нормалізація, обробка пропусків і побудова нових ознак; побудова моделі прогнозування вагонопотоків і мінімізації затримок із урахуванням прогнозованих обсягів як вхідних параметрів за допомогою алгоритму RF; оцінювання ефективності використання методу в завданнях транспортного планування.

Основна частина дослідження

Прогнозування обсягів вагонопотоків у міжнародних вантажних терміналах є одним із основних завдань сучасної транспортної логістики, що впливає на ефективність управління залізничними перевезеннями, оптимізацію використання інфраструктури та планування вантажних операцій. Огляд наукових досліджень у сфері прогнозування обсягів вагонопотоків у міжнародних терміналах із використанням методу RF свідчить про широке застосування цього підходу в логістиці та транспорті. У цьому контексті метод має широке визнання як потужний інструмент для моделювання складних динамічних процесів, для яких характерні висока багатовимірність і неоднорідність даних, він є ансамблевим алгоритмом машинного навчання, який базований на побудові множини дерев рішень (decision trees) із випадковим відбором підмножини вхідних ознак на кожному кроці побудови дерев [9]. Такий підхід забезпечує високу стійкість моделі до перенавчання з можливістю ефективно відображувати нелінійні залежності та взаємодії між ознаками. У контексті прогнозування вагонопотоків це особливо важливо, оскільки процеси вантажних перевезень залежать від великої кількості факторів — сезонності, логістичних обмежень, змін у попиті, технічних характеристик вагонів, пропускної здатності інфраструктури тощо.

Розробляючи модель прогнозування обсягів вагонопотоків у пунктах взаємодії за допомогою Random Forest, цільову функцію формалізують як мінімізацію середньоквадратичної помилки прогнозування, що є стандартною метрикою якості для задач регресії. Математично це можна подати у вигляді функції втрат

$$F(x) = \frac{1}{n}\sum_{i-1}^{n}\left(y_i - \hat{f}(x_i)\right)^2 \to min, \quad (1)$$

де y_i – фактичний обсяг вагонопотоку в період i;

$\hat{f}(x_i)$ – прогноз моделі Random Forest на основі вхідних ознак x_i;

n – кількість спостережень.

Оптимізація цієї функції втрат полягає у знаходженні такої конфігурації ансамблю дерев рішень, яка найкраще апроксимує невідому залежність між вхідними параметрами (включно з часовими показниками, характеристиками вантажів, технічними параметрами та іншими релевантними ознаками) і цільовою змінною – обсягом вагонопотоку. При цьому важливо враховувати системні обмеження і специфіку реального функціонування залізничних терміналів, зокрема пропускної здатності, графіків руху, регуляторних вимог і зовнішніх впливів, що можуть модифікувати поведінку транспортної системи.

Завдяки здатності RF обробляти великі масиви різнорідних даних і автоматично враховувати складні взаємозв'язки, метод є перспективним інструментом для побудови адаптивних систем підтримки ухвалення рішень у залізничних логістичних комплексах. Застосування цієї методології дає змогу підвищити точність прогнозів, знизити рівень операційних ризиків і оптимізувати планування ресурсів, що сприяє підвищенню ефективності міжнародних вантажних перевезень.

У логістичних системах залізничного транспорту прогнозування вагонопотоків має враховувати ряд обмежень, що обумовлені техніко-експлуатаційними характеристиками інфраструктури та організацією робочих процесів. Зокрема, модель прогнозу має забезпечувати дотримання обмежень за пропускною здатністю пунктів взаємодії, максимальною кількістю вагонів на кожному напрямку та балансом між вхідними і вихідними потоками. Формально ці умови можна записати у вигляді системи нерівностей і рівностей

$$\begin{cases} \sum_j \hat{f}(x_{ij}) \le I_i^{max}, \forall_i \\ \hat{f}(x_{ij}) \le R_{ij}^{max}, \forall_{i,j} \\ \sum_j \hat{f}(x_{ij}) = \sum_j f(x_{ij}), \forall_i \end{cases}, \quad (2)$$

де $\hat{f}(x_{ij})$ – прогнозований вагонопотік із пункту i до j, які належать множині пунктів взаємодії;

I_i^{max} – максимальна пропускна спроможність пункту i;

R_{ij}^{max} – максимально допустима кількість вагонів на напрямку (i,j) за одиницю часу.

Крім прогнозування обсягів вагонопотоків, надзвичайно важливим аспектом ефективного логістичного планування є контроль і мінімізація затримок у подаванні та обробці вагонів і суден, що особливо актуально для морських портових терміналів і залізнично-портових вузлів. Затримки на цих етапах мають прямий вплив на загальну пропускну спроможність транспортної системи, її операційну ефективність і рівень сервісу, а також формують ризики виникнення логістичних «вузьких місць» і додаткових витрат.

Через це в математичну модель доцільно інтегрувати додаткові системні обмеження, які моделюють допустимі межі затримок подавання та обробки вантажних одиниць – вагонів і суден. Такі обмеження є основними для відтворення реального функціонування інтермодальних терміналів, де координація між залізничною та морською складовими має бути максимально злагодженою.

Введення обмежень за затримками в модель дає змогу не лише покращити якість прогнозів обсягів вантажопотоків, але й сформувати аналітичну основу для ухвалення управлінських рішень щодо оптимізації графіків подавання, розподілу ресурсів і пріоритезації обробки вантажів. Зокрема, урахування таких обмежень допомагає моделювати ситуації з перевантаженням терміналів і прогнозувати виникнення «заторів» у логістичних ланцюгах, що є критично важливим для забезпечення стабільності міжнародних перевезень. Розширення класичної моделі відповідними обмеженнями за затримками формалізовано як систему нерівностей, що накладені на прогнозовані значення часу подавання та обробки, та інтегровано в загальну цільову функцію оптимізації, забезпечуючи більш реалістичне та прикладне подання транспортно-логістичних процесів у міжнародних терміналах:

$$\begin{cases} D_{ij} \le D_{ij}^{max}, \forall_{i,j} \\ T\left(\hat{f}(x_{ij})\right) \le T_{ij}^{max}, \forall_{i,j} \end{cases}, \quad (3)$$

де Dij – час затримки подавання/обробки вагонів (або суден) на напрямку (i,j);

D_{ij}^{max}– максимально допустима затримка;

T– час обробки вагонів/суден у пункті i;

T_{ij}^{max} – максимальний допустимий час обробки в пункті i.

Для зображення застосування побудованої моделі прогнозування та оцінювання дотримання зазначених обмежень у практичних умовах [10, 11] на рис. 1 наведено порівняльну гістограму прогнозованих та історичних обсягів вагонопотоків на п’яти пунктах взаємодії.

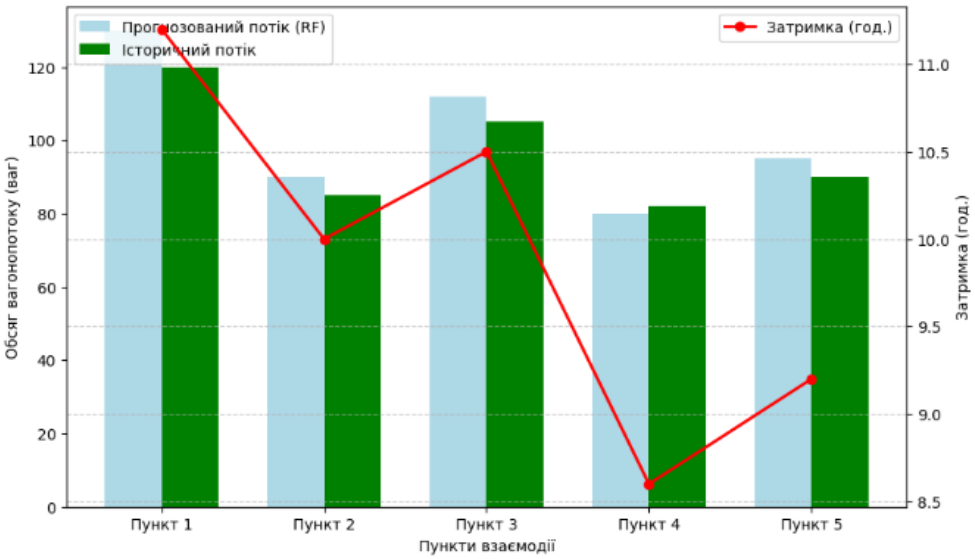


Рис. 1. Візуалізація порівняння прогнозованих і фактичних вагонопотоків, отриманих методом RF

Для кожного пункту побудовано два типи стовпчикових діаграм: світло-блакитні – прогнозовані обсяги вагонопотоків за допомогою методу RF, зелені – фактичні історичні обсяги. Червона лінія ілюструє рівень затримок, які виникають з обробкою вагонів.

Результати аналізу свідчать, що для більшості терміналів прогнозовані обсяги вагонопотоків дещо перевищують історичні

показники, що може свідчити про зростаючий попит на логістичні послуги або потенціал збільшення пропускної здатності. Такі результати підкреслюють наявну проблему навантаження та необхідність удосконалення організації робочих процесів. Отже, інтеграція методів машинного навчання, зокрема випадкового лісу, у систему прогнозування вантажних потоків дає змогу точніше оцінити майбутнє навантаження на залізничну інфраструктуру. Це сприяє ухваленню більш обґрунтованих управлінських рішень щодо оптимізації ресурсів і мінімізації затримок у вантажних операціях.

Задача прогнозування вагонопотоків полягає в оцінюванні обсягів перевезень між пунктами взаємодії транспортної мережі на основі історичних даних, календарних та інфраструктурних факторів. Але, окрім прогнозної точності, важливо також мінімізувати затримки, які виникають з подаванням та обробкою вагонів і суден з урахуванням прогнозованого вагонопотоку.

$$f(y) = \sum_{i.j} \left(D_{ij}(y_{ij}) + T_{ij}(y_{ij}) \right) \to min, \quad (4)$$

де $D_{ij}(y_{ij})$ – час затримки подавання вагонопотоку;

$T_{ij}(y_{ij})$ – час затримки обробки вагонопотоку;

y_{ij} – обсяг вагонопотоку між пунктами взаємодії i та j.

RF метод можна використати для попереднього прогнозу попиту, після чого розв'язати оптимізаційну задачу мінімізації затримок із урахуванням прогнозованих обсягів як вхідних параметрів. Запропонована модель дає змогу поєднати машинне навчання для прогнозу обсягів перевезень з оптимізаційним підходом, що мінімізує затримки в логістичних вузлах. Це підвищує ефективність планування вагонопотоків, особливо в умовах обмежених ресурсів та інфраструктурних обмежень.

На рис. 2 показано порівняльний аналіз прогнозованих та оптимізованих обсягів потоку для п'яти пунктів взаємодії (терміналів).

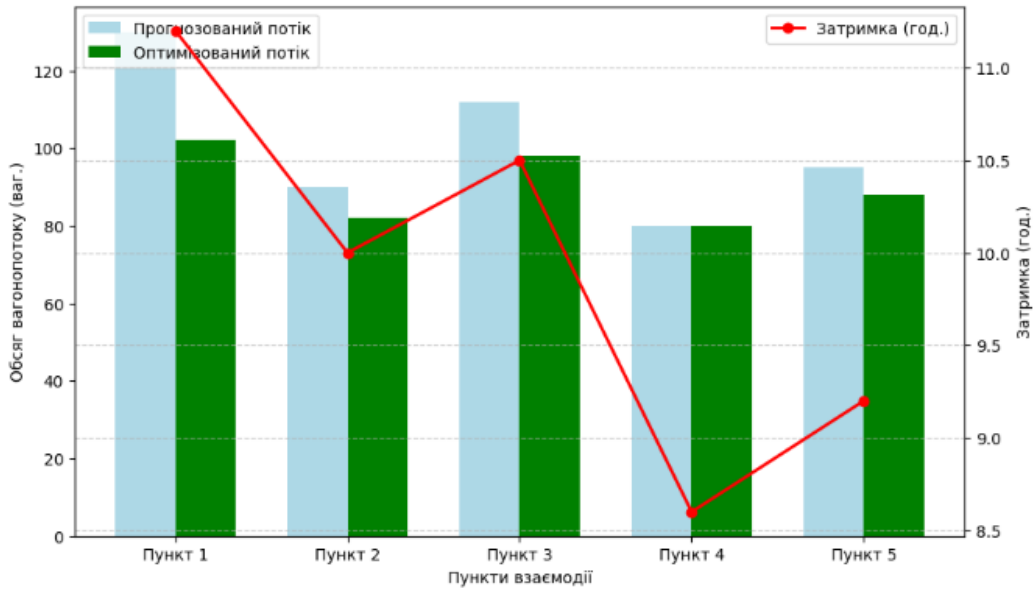


Рис. 2. Графічна інтерпретація моделювання вагонопотоку методом Random Forest

У дослідженні проаналізовано прогнозовані та оптимізовані обсяги вагонопотоків на п'яти терміналах залізничної інфраструктури, а також оцінено рівень затримок, що виникають з обробкою вантажів. Для відображення обсягів вагонопотоків використано дві категорії: прогнозований (світло-блакитний колір) та оптимізований (зелений колір) потоки. Затримки проілюстровані червоною лінією.

Для першого пункту характерний найвищий прогнозований вантажопотік, який складає близько 130 вагонів, що після оптимізації суттєво знижується до 102. Водночас він демонструє найвищий рівень затримок – 11,2 год. Такий дисбаланс свідчить про перевантаження потужностей, що потребує впровадження заходів з оптимізації для зменшення часу обробки і покращення пропускної здатності. У другому маємо прогнозований потік близько 90 вагонів, що після оптимізації знижується до 82. Затримка на рівні 10,0 год свідчить про наявність середнього рівня навантаження та потенціал для покращення логістичних процесів. Третій демонструє високий прогнозований вагонопотік – 112 вагонів, який оптимізований до 98, при цьому затримка становить 10,5 год, що є другим за величиною показником серед усіх терміналів. Це вказує на можливі проблеми з пропускною здатністю і необхідність удосконалення організації робіт. Четвертий пункт має найнижчий рівень затримок – приблизно 8,6 год, а обсяги вагонопотоків практично не змінюються в результаті оптимізації (близько 80 вагонів). Це свідчить про збалансованість робочих процесів і адекватну пропускну спроможність. П`ятий має прогнозований вантажопотік близько 95 вагонів, який після оптимізації зменшується до 88, із затримкою на рівні 9,2 год. Зниження обсягу потоку вказує на позитивний вплив заходів оптимізації на зменшення навантаження.

Отже, візуалізація демонструє, що оптимізація вагонопотоків дає змогу ефективно зменшити навантаження на найбільш перевантажені пункти взаємодії, що у свою чергу сприяє зниженню затримок і підвищенню ефективності роботи залізничної інфраструктури. Для пунктів із помірним і низьким навантаженням оптимізація підтримує стабільний рівень пропускної спроможності і мінімізує час обробки вантажів.

Висновки. Запропонована модель прогнозування вантажопотоків на пунктах взаємодії залізничного транспорту з іншими видами транспорту базована на алгоритмі випадкового лісу (Random Forest, RF) з урахуванням системи обмежень, що значно підвищує точність і надійність прогнозів. Такий підхід дає змогу ефективно інтегрувати методи машинного навчання з принципами операційної оптимізації, забезпечуючи більш адекватне відображення реальних умов функціонування транспортних логістичних вузлів.

Застосування системи обмежень у моделі має головне значення, оскільки враховує специфічні технологічні, інфраструктурні та часові ліміти, що виникають під час обробки вантажних потоків. Урахування таких обмежень дає змогу уникати типових помилок прогнозування, пов'язаних із перевантаженням вузлів або ігноруванням технологічних вузьких місць, що часто призводить до затримок у перевезеннях і нераціонального використання ресурсів.

Результати досліджень підтверджують, що запропонована модель демонструє високу точність у прогнозуванні обсягів вантажопотоку на пунктах взаємодії різних видів транспорту. На візуалізованих графіках порівняння прогнозних і фактичних даних можна чітко простежити суттєве зближення показників, що свідчить про адекватність урахування системи обмежень у моделюванні. Такий рівень точності забезпечує підвищення ефективності планування логістичних операцій, що призводить до скорочення часу обробки вантажів, зниження ризику

виникнення затримок та оптимізації використання транспортних і складських потужностей.

Впровадження моделі в практику має важливе значення для розвитку цифрових платформ оперативного управління рухом, що є основою сучасних «розумних» транспортних систем. Перспективним напрямом розвитку є інтеграція алгоритмів машинного навчання з реальним часом і адаптивним управлінням, що дасть змогу не лише прогнозувати, а й оперативно корегувати маршрути руху, план вантажоперевезень і навантаження інфраструктури на основі актуальних даних.

Отже, застосування запропонованої моделі дає змогу створити ефективний інструмент для аналітичного планування, який максимально узгоджує прогнозні сценарії з можливостями залізничної системи. Це сприяє підвищенню загальної надійності та стійкості транспортної інфраструктури, зменшенню витрат, пов'язаних із перевантаженнями, і підвищенню якості сервісу в логістичній галузі. У довгостроковій перспективі подібні моделі можуть стати невід'ємною частиною інтелектуальних систем управління залізничним транспортом, забезпечуючи комплексне розв'язання проблем координації багатомодальних перевезень і підвищення ефективності функціонування транспортних вузлів.

Список використаних джерел

1. Lyk-Jensen S. V. Forecasting freight flows. *Transport Reviews*. 2011. Vol. 31, No. 5. P. 603–624. doi: 10.1080/01441647.2011.566984.

2. Breiman L. Random Forests. *Machine Learning*. 2001. Vol. 45. P. 5–32. doi: 10.1023/A:1010933404324.

3. Ліав А. Класифікація та регресія за допомогою randomForest. *R News*. 2002. Т. 2, № 3. С. 18–22. URL: http://CRAN.R-project.org/doc (access date: March 29, 2025).

4. Wang X. Port throughput forecasting using Random Forest algorithm: A case of Shanghai Port. *Transport Policy*. 2020. Vol. 91. P. 1–10. doi: 10.1016/j.tranpol.2020.03.005.

5. Kim S. Application of machine learning algorithms for forecasting air cargo volumes. *Journal of Air Transport Management*. 2018. Vol. 71. P. 1–9. DOI: 10.1016/j.jairtraman.2018.06.005.

6. Shi Q. Big data applications in real-time traffic operation and safety monitoring and improvement on urban expressways. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2015. Vol. 58. P. 380–394. doi: 10.1016/j.trc.2015.02.022.

7. Wang C. Freight demand forecasting using Random Forest algorithm. *Journal of Advanced Transportation*. 2018. Article ID 1478923. doi: 10.1155/2018/1478923.

8. Scikit-learn – Python бібліотека машинного навчання. URL: https://scikit-learn.org (access date: May 15, 2025).

9. R: randomForest package URL: https://cran.r-project.org/web/packages/randomForest/index.html (access date: May 15, 2025).

10. RapidMiner Studio – інструмент для data mining. URL: https://rapidminer.com (access date: May 20, 2025).

11. Orange Data Mining – програмне забезпечення для візуального аналізу. URL: https://orangedatamining.com (access date: May 20, 2025).

Головко Тетяна Владиславна, кандидат технічних наук, доцент кафедри управління експлуатаційною роботою, Український державний університет залізничного транспорту. Тел.: +380958389172.
E-mail: golovko_tv@kart.edu.ua. ORCID iD: https://orcid.org/0000-0002-7977-9664.

Долгополов Петро Віталійович, кандидат технічних наук, доцент кафедри управління експлуатаційною роботою, Український державний університет залізничного транспорту. Тел.: +380950903747.
E-mail: dolgopolov@kart.edu.ua. ORCID iD: https://orcid.org/0000-0002-2166-8064.
Ляпін Дмитро Юрійович, аспірант кафедри управління експлуатаційною роботою, Український державний університет залізничного транспорту. Тел.: +380501700310. E-mail: karazinvuz@gmail.com.
Демченко Ілля Сергійович, аспірант кафедри управління експлуатаційною роботою, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID: 0009-0008-6708. Тел.: +380509388928.
E-mail: ilya.dem4enko@gmail.com.

Golovko Tetiana, PhD (Tech), Associate Professor, department of operational work management, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: +380958389172. E-mail: golovko_tv@kart.edu.ua.
ORCID iD: https://orcid.org/0000-0002-7977-9664.
Dolgopolov Peter, PhD (Tech), Associate Professor, department of operational work management, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: +380950903747. E-mail: dolgopolov@kart.edu.ua.
ORCID iD: https://orcid.org/0000-0002-2166-8064.
Lyapin Dmitry, postgraduate student, department of operational work management, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: +380501700310. E-mail: karazinvuz@gmail.com.
Demchenko Ilya, postgraduate student, department of operational work management, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID: 0009-0008-6708. Tel.: +380509388928. E-mail: ilya.dem4enko@gmail.com.

Статтю прийнято 30.06.2025 р.

УДК 629.463.001

АНАЛІЗ ПОШКОДЖЕНЬ ВІЗКІВ УНІВЕРСАЛЬНИХ НАПІВВАГОНІВ

Канд. техн. наук В. О. Шовкун, аспіранти М. В. Дмитренко, О. А. Жерновенков, Р. О. Мартишко, Є. О. Шульга

ANALYSIS OF DAMAGE TO THE RUNNING GEAR OF UNIVERSAL GONDOLA CARS

PhD (Tech.) V. O. Shovkun, postgraduate students M. V. Dmytrenko, O. M. Zhernovenkov, R. O. Martishko, E. O. Shulga

DOI: https://doi.org/10.18664/1994-7852.212.2025.336514

Анотація. *У статті подано статистичний аналіз несправностей ходових частин вантажних напіввагонів. Виділено моделі, що мають підвищену інтенсивність відмов, визначено домінуючі типи дефектів і оцінено їхній вплив на експлуатаційну надійність рухомого складу. Застосовано методи класифікаційного групування та перевірку статистичної значущості залежностей. Основну увагу приділено аналізу типових несправностей колісних пар і буксових вузлів. Порівняно пошкоджуваність різних моделей напіввагонів і показано, що найчастіше відмовляють напіввагони моделі 12-9046. Встановлено, що найбільш поширеними несправностями є знос гребенів коліс, перегрів підшипників і дефекти елементів автозчіпного обладнання. На підставі отриманих результатів сформульовано рекомендації щодо організації технічного обслуговування.*

Ключові слова: *напіввагон, кузов, ходові частини, технічний стан, несправності, інтенсивність відмов, статистичний аналіз.*

Abstract. *This article presents an in-depth statistical analysis of failure occurrences in the running gear of universal freight gondola cars operated by Ukrainian Railways. Drawing from a dataset of over 10,000 inspected gondola cars across eight models over the period 2021–2024, the study identifies key trends in fault distribution by model, type, and frequency. The focus is placed on typical failures such as spring fractures, wheel flange wear, axle fatigue, and overheating of journal bearings. A defect matrix is developed to cross-reference failure modes with specific wagon types. The analysis shows that models 12-9046 and 12-132 account for the highest number of failures, likely due to their wide deployment and specific design features. The study also reveals that cars with more than 25 years of service demonstrate significantly higher failure rates compared to newer models, indicating the importance of life-cycle-based diagnostics. Statistical tools such as classification grouping and Pearson's chi-squared test were used to verify dependencies between wagon models and failure types. The results confirm a strong correlation, emphasizing the need for model-specific maintenance strategies. Furthermore, failure intensity was calculated for each wagon type, demonstrating that even newer designs with improved structures (e.g., models 12-1704-04 and 12-296-01) are not immune to specific technical issues. The conclusions include recommendations for technical maintenance planning, highlighting the benefits of targeted diagnostics and predictive repair scheduling. The outcomes of this research may be applied to enhance operational safety, reduce downtime, and improve the economic efficiency of wagon maintenance. The study contributes to the broader field of rolling stock reliability engineering and supports the modernization of freight fleet management practices based on empirical data and statistical modeling.*

Keywords: *freight car, gondola wagon, running gear, failure analysis, spring defects, axle wear, statistical diagnostics, maintenance optimization.*

Вступ. В умовах інтенсивної експлуатації залізничного транспорту і старіння парку вантажних вагонів питання підвищення їхньої надійності та безпеки набуває особливої актуальності. Значну частину відмов, що призводять до вимушеного відчеплення вагонів від поїздів під час руху, становлять несправності ходових частин. Вони безпосередньо впливають на безпеку руху, стабільність навантаження та загальний технічний стан вагона.

Універсальні напіввагони складають більше половини парку вантажних вагонів АТ «Укрзалізниця». Напіввагони експлуатують у дуже складних умовах: постійний вплив зовнішнього середовища, відсутність захисту від атмосферних опадів, пошкодження з завантаженням і розвантаженням тощо.

Раніше проведені дослідження здебільшого зосереджені на аналізі окремих типів дефектів або конструктивних рішень, що не дає змогу сформувати повну картину з експлуатаційної статистики. Тому дуже актуальним є дослідження з визначення рівня технічного стану напіввагонів. Існує необхідність у комплексному дослідженні структури несправностей на основі фактичних даних технічного обстеження з урахуванням моделі і терміну експлуатації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз несправностей вантажних вагонів, зокрема їхніх ходових частин, є предметом дослідження низки науковців як в Україні, так і за кордоном. У роботах Фоміна А. Ф. [1] і Мурадяна Л. А. [2] розглянуто питання впливу конструкції візків на динаміку вагонів, а також виявлено проблеми, що виникають унаслідок втомних навантажень.

Myamlin S. V. у своїх роботах [3] акцентує увагу на питанні динамічного навантаження ресорних підвісок та ефективності амортизації. Іноземні дослідники, зокрема Hemida H. та Flynn D. [4, 5], вивчають аеродинамічні та структурні впливи на вантажні вагони, однак лише частково торкаються аспектів технічного стану ходових частин.

У роботах Zarembski A. M. [6] оцінено ризик та управління технічним станом колісних пар, а Liu Y. et al. [7] застосовують методи машинного навчання для діагностики несправностей у буксових вузлах. Результати багаторічних досліджень як науковців, так і фахівців вагонного господарства підсумовано в ряді нормативних документів [8].

Автори статті [9] стверджують, що після семи-восьми років експлуатації кожен напіввагон у середньому сім-десять разів на рік надходить у ремонт. Пошкодження вказують на те, що значна частка відмов кузовів напіввагонів пов'язана з інтенсивними корозійними процесами, викликаними впливом вантажу, що перевозять.

Публікація [10] присвячена аналізу конструктивних особливостей напіввагонів нового покоління, їхніх переваг і недоліків, особливо напіввагонів виробництва Крюківського вагонобудівного заводу.

У статті [11] подано результати статистичного аналізу розподілу відмов елементів конструкції напіввагонів. Автори доходять висновку, що для опису напрацювання доцільно використовувати нормальний закон розподілу.

Очевидно, що, незважаючи на значну кількість досліджень цього напряму, поза увагою дослідників залишилися питання аналізу технічного стану універсальних напіввагонів, порівняння надійності моделей різних виробників із різним терміном експлуатації.

Мета і завдання дослідження. Метою статті є аналіз технічного стану ходових частин універсальних напіввагонів власності АТ «Укрзалізниця».

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- проаналізувати парк універсальних напіввагонів власності АТ «Укрзалізниця» і поділити за моделями;
- дослідити технічний стан і визначити пошкоджуваність елементів конструкції ходових частин універсального НПВ.

Аналіз і систематизація несправностей ходових частин. У дослідженні використано дані про відчеплення вагонів за період 2021–2024 рр. База даних була складена на підставі повідомлень форми ВУ-23.

У межах проведеного дослідження проаналізовано понад десять тисяч напіввагонів восьми моделей. Найбільшу частку серед оглянутих становить напіввагон моделі 12-9046 (18,72 % усіх перевірених вагонів). Дещо менший показник демонструє модель 12-132**,** що складає 17,57 % загальної вибірки. Третє місце – модель 12-119 – 15,35 %. Найменшу частку становлять моделі 12-1293 та 12-1704-04, на які припадає відповідно 9,53 і 8,64 % усіх оглянутих одиниць.

Напіввагони розрізняються за роком побудови, заводом-виробником, а також конструктивними особливостями. Інформація про досліджувані моделі напіввагонів подана в таблиці.

Моделі 12-9046 і 12-132 мають підвищений об’єм кузова та оснащені сучасними візками. Модель 12-119 має підвищену вантажопідйомність, а 12-757 — класичний універсальний варіант. Моделі 12-1293**,** 12-1704-04 мають посилені рами, орієнтовані на підвищену зносостійкість. Найстарішими є напіввагони Уралвагонзаводу12-119 і 12-132: їх почали виготовляти наприкінці 80-х і на початку 90-х рр. минулого століття.

Такий розподіл дає змогу зробити висновки про пріоритетність аналізу моделей, які є найбільш масовими в експлуатації та відповідно мають більший вплив на загальний стан парку вантажних вагонів. Ці моделі доцільно розглядати як основні з формуванням заходів із підвищення технічної надійності.

За результатами статистичного аналізу на підставі згрупованих статистичних даних було побудовано кількісний розподіл несправностей ходових частин вантажних напіввагонів за моделями (рис. 1).

Таблиця

Інформація про досліджувані моделі напіввагонів

Модель	Завод-виробник	Період випуску	Особливості конструкції
12-119	Уралвагонзавод	1989-1991	Підвищена вантажопідйомність (до 71 т)
12-132	Уралвагонзавод	з 1992	Збільшений об’єм кузова – 88 м³
12-757	Крюківський ВБЗ	1986-2005	Кузов із торцевими дверима та збільшеним об'ємом (85 м³) і навантаженням на вісь (248,5 кН)
12-1293	Рузхіммаш	2007-1998	Посилена рама підвищеної міцності
12-9046	Стахановський ВБЗ	з 2004	Підсилений кузов
12-4106	Дніпровагонмаш	2001-2018	Спеціалізований для перевезення сипких вантажів
12-296-01	Алтайський ВБЗ	з 2004	Полегшена рама
12-1704-04	АТ «Техкомплекс»	2015	Застосовано зносостійкі матеріали в опорних вузлах

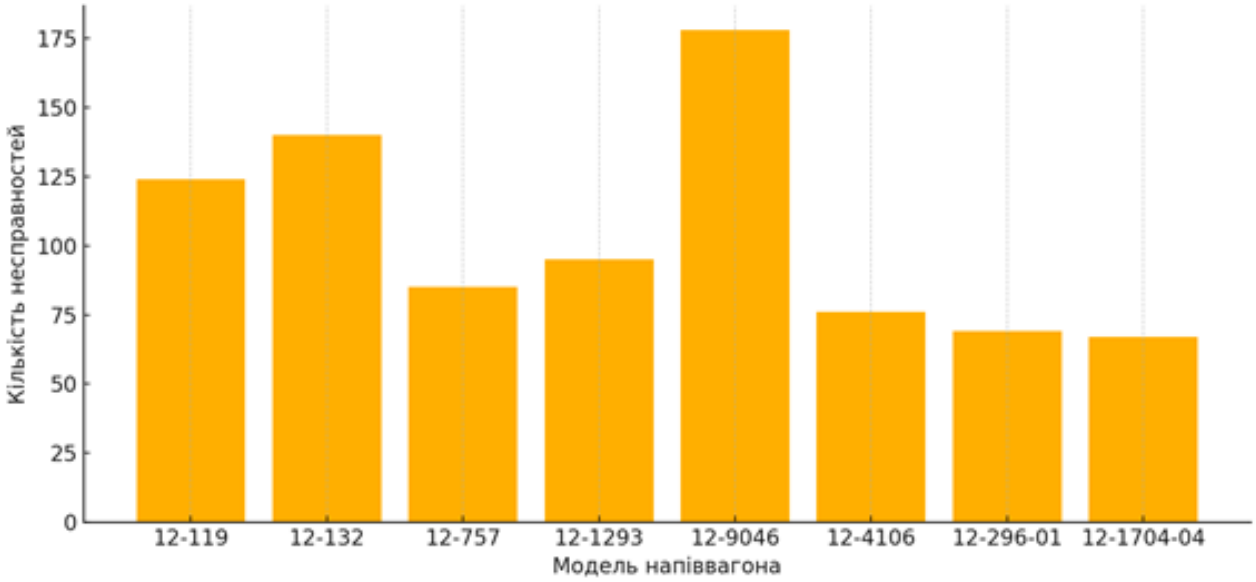


Рис. 1. Розподіл несправностей за моделями напіввагонів

Моделі 12-9046 (21.34 % випадків), 12-132 (16.78 %) і 12-119 (14.87 %) демонструють найвищу кількість відмов. Це може свідчити як про високу інтенсивність їх експлуатації, так і конструктивну вразливість. Моделі 12-296-01 і 12-1704-04, хоча і більш сучасні, мають меншу частоту несправностей, можливо, завдяки вдосконаленню конструкції.

Злам пружин ресорного підвішування є найбільш поширеним дефектом, що становить приблизно 30 % усіх виявлених несправностей (рис. 2).

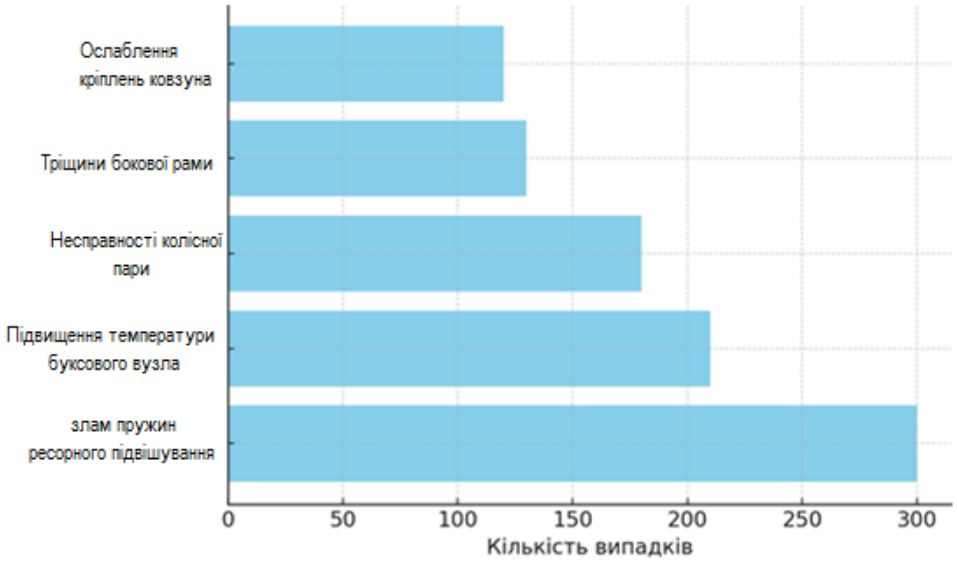


Рис. 2. Структура найбільш поширених несправностей ходових частин

Перегрів букс (21 %) і несправності осі та коліс (18 %) — наступні за частотою, причому останній має чіткий зв'язок із втомним навантаженням за довготривалої експлуатації.

Тріщини бокової рами і ослаблення кріплень ковзунів вказують на локальні дефекти литої конструкції візка.

Основними причинами бракування колісних пар є неприпустимий знос гребеня колісної пари.

Матриця, яка подана на рис. 3, ілюструє частоту виникнення кожного типу несправності для окремих моделей.

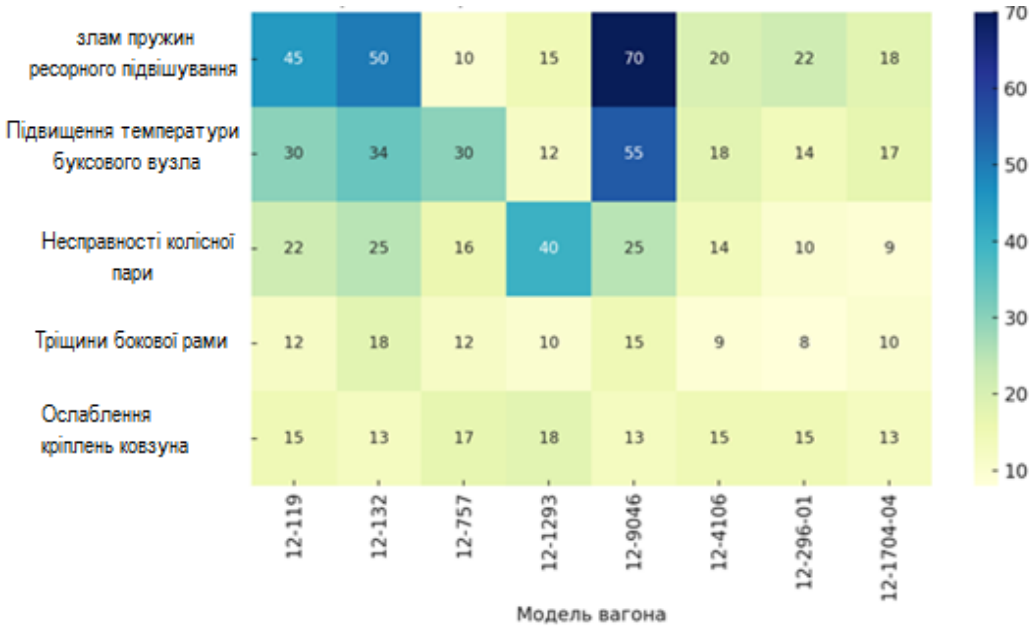


Рис. 3. Матриця несправностей за моделями напіввагонів

Так, напіввагони моделі 12-9046 мають найвищу концентрацію поломок пружин ресорного комплекту (70 випадків) і перегріву букс (55), що потребує переоцінювання конструкції візка.

У напіввагонів моделі 12-1293 чітко домінує зношення коліс та осей (40 випадків), що може свідчити про неефективне розвантаження осі.

Напіввагони моделі 12-757 мають підвищену кількість перегрівів букс (30).

Однією з найважливіших характеристик надійності рухомого складу є інтенсивність відмов. Інтенсивність відмов λ(t) є основним показником надійності елементів складних систем. За різними методиками її можна обчислювати на певну кількість кілометрів пробігу або певну кількість вагонів (рис. 4).

Очевидно, що напіввагони моделей 12-9046 і 12-132, попри великий парк, мають вищу інтенсивність, що сигналізує про потребу в структурному моніторингу стану.

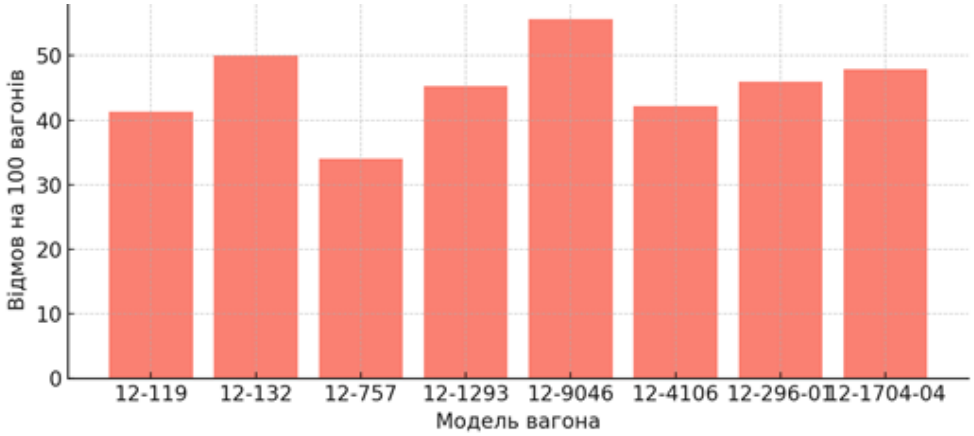


Рис. 4. Інтенсивність відмов універсальних НПВ різних моделей

Перевірка достовірності. На підставі згрупованих статистичних даних було побудовано частотний розподіл несправностей ходових частин вантажних напіввагонів за моделями і типами відмов. Основні результати подані у вигляді трьох графіків (опис вище).

Для перевірки гіпотези про існування залежності між моделлю вагона і типом несправності застосовано χ^2-критерій Пірсона.

Нульова гіпотеза H_0: тип несправності не залежить від моделі вагона (незалежні змінні). Альтернативна гіпотеза H_0: існує залежність між моделлю вагона і типом несправності.

Було сформовано контингентну таблицю та обчислено очікувані частоти за формулою

$$E_{ij} = \frac{R_i \cdot C_i}{N}, \qquad (1)$$

де E_{ij} – очікуване значення в комірці на перетині i-го рядка та j-го стовпця;

R_i – сума за i-м рядком;

C_i – сума за j-м стовпчиком;

N – загальна кількість спостережень.

Значення $\chi 2$ визначено за формулою

$$\chi 2 = \sum_{i=1}^{r} \sum_{j=1}^{c} \frac{(O_{ij} - E_{ij})^2}{E_{ij}}, \qquad (2)$$

де O_{ij} – фактичні частоти.

У результаті розрахунків встановлено:

- $\chi 2 = 46{,}82$;
- ступені свободи: $df = (8–1) \times (6–1) = 35$;
- p-value < 0.01 (розраховано через χ^2-розподіл).

Оскільки p-value < 0.01, ми відкидаємо нульову гіпотезу на рівні значущості $\alpha = 0{,}5$. Це означає, що структура несправностей істотно залежить від моделі вагона.

Зокрема:

- напіввагони моделей 12-9046 і 12-132 демонструють підвищену ймовірність поломки пружин;
- для напіввагонів моделі 12-757 характерна концентрація перегріву буксових вузлів;
- у напіввагонів моделі 12-1293 переважає спрацювання коліс.

Висновки

1. Найбільш поширеними несправностями є злами елементів ресорного комплекту (злам пружин), перегрів підшипників і механічне пошкодження гальмівних важелів.

2. Частота несправностей залежить від моделі вагона та його віку. Вагони з подовженим ресурсом (понад 25 років) мають втричі більше відмов, ніж нові інноваційні моделі.

3. Впровадження регулярного аналізу несправностей дасть змогу підвищити безпеку і зменшити витрати на ремонти.

За отриманими результатами можна в подальшому формувати модельно-орієнтовані підходи щодо технічного обслуговування та діагностики, з фокусуванням на характерних дефектах.

Список використаних джерел

1. Фомін А. Ф. Втомна міцність елементів вантажних вагонів. Київ: Транспорт, 2018.
2. Мурадян А. В. Вплив конструкції візка на динамічні властивості вантажного вагона. *Вісник ДНУЗТ*. 2021. № 47. С. 24–31.
3. Myamlin S. V. Dynamics of Railway Rolling Stock: Theory and Practice. Dnipro: UkrNIIV, 2017.
4. Hemida H., Krajnović S. The impact of crosswinds on freight train stability. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 2015. Vol. 145. P. 60–70.
5. Flynn D. C., Hemida H. On the effect of crosswinds on the slipstream of a freight train. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 2016. Vol. 156. P. 14–28.
6. Zarembski A. M. Track and Vehicle System Safety. CRC Press, 2016.
7. Liu Y., Wang D., Zhang Q. Intelligent Fault Diagnosis of Axle Boxes Using Neural Networks. *Sensors*. 2020. Vol. 20(6).
8. ДСТУ ГОСТ 7595:2014. Вагони вантажні. Норми й методи контролю технічного стану. Київ: Мінінфраструктури України, 2014.
9. Конюхов А. Д. Коррозия и надежность железнодорожной техники. *Железнодорожный транспорт*. 1997. № 1. С. 42-47.
10. Myamlin S. V., Kebal I. U., Kolesnykov S. R. Design review of gondola car. Наука та прогрес транспорту. *Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту.* 2014. № 6 (54). С. 136-145. https://doi.org/10.15802/stp2014/33773.
11. Ivanova T. V., Petrov V. A., Nalabordin D. G. (2015). Statistical estimation of mean time to failure of gondola cars between repairs. Dependability.(1):32-38. https://doi.org/10.21683/1729-2646-2015-0-1-32-38.
12. Karibzhanov E. A. Freight wagons in Kazakhstan: improving technical condition. Cars and car economy. 2009. 4(20). С. 34-36.

Шовкун Вадим Олександрович, кандидат технічних наук, доцент кафедри інженерії вагонів та якості продукції, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0003-1826-6053. Тел.: +38 (067) 399 6881. E-mail: vadimshovkun62@gmail.com.

Дмитренко Максим Володимирович, аспірант кафедри інженерії вагонів та якості продукції, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0009-0000-2712-2495. Тел.: +38 (067) 399 6881.
E-mail: lemtr21@gmail.com.
Жерновенков Олексій Андрійович, аспірант кафедри інженерії вагонів та якості продукції, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0009-0002-1477-5141. Тел.: +38 (067) 399 6881.
E-mail: leksey_jk@ukr.net.
Мартишко Руслан Олексійович, аспірант кафедри інженерії вагонів та якості продукції, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0009-0002-1138-5674. Тел.: +38 (097) 287 14 41.
E-mail: martishko8@kart.edu.ua.
Шульга Євген Олександрович, аспірант кафедри інженерії вагонів та якості продукції, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0009-0009-4966-3124. Тел.: +380 (63) 570 76 34.
E-mail: pum4vi5ion@gmail.com.

Shovkun Vadim, PhD (Tech). Associate Professor department of wagons engineering and product quality, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0003-1826-6053. Tel.: (067) 399 6881.
E-mail: vadimshovkun62@gmail.com.
Dmytrenko Maksym. Postgraduate student, department of of wagons engineering and product quality, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0009-0000-2712-2495. Tel.: +38 (067) 399 6881.
Zhernovenkov Oleksii. Postgraduate Student, Department of Wagons Engineering and Product Quality, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0009-0000-2712-2495 Tel.: +38 (067) 399 6881.
E-mail: leksey_jk@ukr.net.
Martyshko Ruslan. Postgraduate Student, Department of Wagons Engineering and Product Quality, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0009-0002-1138-5674. Tel.: +38 (097) 287 14 41.
E-mail: martishko8@kart.edu.ua.
Shulha Yevhen. Postgraduate Student, Department of Wagons Engineering and Product Quality, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0009-0009-4966-3124. Tel.: +380 (63) 570 76 34.
E-mail: pum4vi5ion@gmail.com.

Статтю прийнято 30.06.2025 р.

УДК 331.658:334

ТЕОРЕТИЧНІ ПЕРЕДУМОВИ ЕКОНОМІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ОХОРОНИ ПРАЦІ НА ТРАНСПОРТНИХ ПІДПРИЄМСТВАХ

Канд. екон. наук Н. В. Гриценко, канд. техн. наук Д. С. Козодой

THEORETICAL THOUGHTS OF ECONOMIC PROTECTION SECURITY IN TRANSPORT ENTERPRISES

Phd (Ekon.) N. V. Hrytsenko, Phd (Tech.) D. S. Kozodoy

DOI: https://doi.org/10.18664/1994-7852.212.2025.336517

Анотація. *Актуальність статті обумовлена економічною ситуацією, яка склалася в галузі забезпечення безпечних умов і охорони праці на транспортних підприємствах країни. Негативна нинішня тенденція слабкого забезпечення працеохоронних заходів продовжує своє існування, підживлюючись змінами в економічному розвитку країни: неприйняття працеохоронних витрат роботодавцями як необхідних і невідкладних, наявність опортуністичної поведінки щодо убезпечення праці. Пропоновані у статті теоретико-методичні положення економічного забезпечення охорони праці дають змогу певною мірою змінити цю ситуацію, зокрема вони сприятимуть підвищенню економічної зацікавленості*

роботодавців у забезпеченні працеохоронних заходів, а також допоможуть вийти на шлях інвестицій у людські ресурси. У статті запропонована графічна розробка моделі економічного забезпечення охорони праці для впровадження у транспортне підприємство.

Ключові слова: *економічне забезпечення, охорона праці, ресурси, праця, працеохоронні заходи, працівники, фактори, модель.*

Abstract. *The relevance of the article is due to the developing economic situation in the field of ensuring safe conditions and labor protection at transport enterprises of the country. The negative trend of insufficient provision of occupational health and safety measures is omnipresent. It is fueled by the changes in the country economic development. Employers do not accept occupational health and safety costs as necessary and urgent. Opportunistic behavior in occupational health and safety also takes place. In this regard, the theoretical and methodological foundations of economic provision of occupational health and safety can somehow change this situation. Particularly, they can increase the employers' economic interest in ensuring occupational health and safety measures, as well as help them start to invest in human resources. Thus, the article proposes a modern model of economic provision of occupational health and safety. This scientific study examines the theoretical prerequisites for the economic support of occupational safety, which are designed to stimulate employers to invest in occupational safety measures. This will allow them to improve their economic and legal literacy by introducing the «Economic Support» component into the program of education, training and retraining in occupational safety. The article presents the formed system of occupational safety in the form of three functional components that reflect the features of its economic support and management. The structure of economic support of occupational safety has been developed, which is presented in the form of a graphic model. It is proved that the current stage of the country's development requires the latest and more flexible economic methods of managing occupational safety at the enterprise. An analysis of the legislation on occupational safety and health was conducted, and it was found that the financing of occupational safety measures by employers does not meet regulatory requirements.*

Keywords: *economic provision, occupational health and safety, resources, measures for occupational health and safety, workers, factors, model.*

Вступ. Забезпечення безпеки та здоров'я працездатного населення країни є однією з найважливіших і невід'ємних систем життєзабезпечення будь-якої держави. В Україні ця система відома як охорона праці. Як і всі суспільно значущі системи, охорона праці має певні суперечності, які полягають, на нашу думку, у недостатньому економічному забезпеченні заходів з охорони праці, що виникає внаслідок відсутності справжнього розуміння соціально-економічної складової сутності та значення охорони праці. Це призвело до ситуації, коли багато роботодавців недостатньо зацікавлені в убезпеченні умов та охороні праці на робочому місці, зокрема в частині інвестування в людські ресурси. Розв'язання цих проблем зумовлює необхідність трансформації структури та змісту чинної системи охорони праці через включення соціально-економічної складової, а саме економічне забезпечення охорони праці.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питаннями економічного забезпечення охорони праці як напряму стимулювання та підвищення ефективності економічного впливу на працівників займалися такі українські вчені, як Огінська А. Ю. [8], Пожарова О. В. [9], Роледерс В. В., Кукель Г. С. [10], Следь О. О. [11] та багато інших. Однак ці питання розглядали окремо одне від одного, і проблема створення ефективної системи в цілому так і залишається нерозв'язаною. **Актуальністю** цього наукового

дослідження є передумови економічного забезпечення охорони праці на транспортних підприємствах, як загального цілого.

Визначення мети та завдання дослідження. Метою дослідження є обґрунтування необхідності впровадження на державному та законодавчому рівні комплексного терміну «Економічне забезпечення охорони праці». **Завданнями** дослідження є розроблення теоретичних складових економічного забезпечення охорони праці, у тому числі формування системи заходів з охорони праці з урахуванням фактора економічного забезпечення, побудови графічної моделі структури економічного забезпечення охорони праці.

Основна частина дослідження. Офіційне визначення охорони праці, викладене в Законі України «Про охорону праці», не дає комплексного уявлення про соціально-економічну сутність охорони праці та її зміст, у тому числі про ресурси, що забезпечують охорону праці. Ця ситуація ще більше погіршується відсутністю термінологічної одноманітності в правовому та освітньому середовищі, що посилено недостатньою економічною та правовою грамотністю значної частини роботодавців щодо охорони праці. Ми вважаємо, що ця недостатня обізнаність, фактична відсутність важелів впливу та механізмів мотивації є основною передумовою для появи трудового опортунізму серед роботодавців щодо своїх працівників [1-3]. Це пов'язано насамперед із слабкою зацікавленістю в убезпеченні умов праці та належному рівні охорони праці та проявляється в її недостатньому економічному забезпеченні. Вирішуючи це питання, необхідно звернути увагу на переваги убезпечення методів праці для працівників, особливо збереження їхнього здоров’я. Такий підхід є основним у забезпеченні збереження кадрового потенціалу підприємства.

Розглядаючи питання кон’юнктурної поведінки роботодавців у сфері охорони праці, пропоновано подати сформовану систему заходів з охорони праці у вигляді трьох функціональних складових елементів, які відображують особливості її економічного забезпечення та управління (рис. 1).

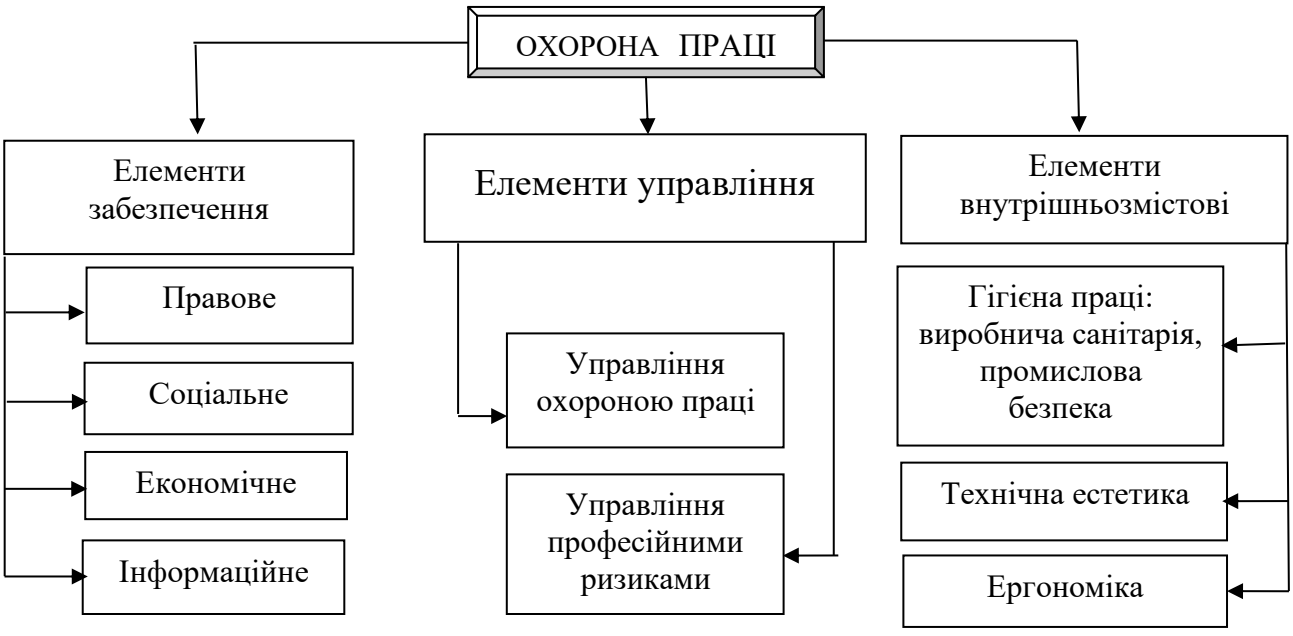


Рис. 1. Система функціональних складових елементів економічного забезпечення та управління охороною праці на транспортному підприємстві (згруповано авторами на підставі робіт [4, 5])

Блок забезпечення являє собою необхідні ресурси для створення безпечних умов і охорони праці на виробництві. Правове забезпечення – це сукупність законодавчих і нормативно-правових актів з охорони праці, які встановлюють вимоги з охорони праці. Економічне забезпечення – це сукупність соціально-економічних механізмів і фінансових ресурсів, реалізованих для здійснення заходів з охорони праці. Під соціальним забезпеченням розуміють сукупність трудових ресурсів, необхідних для задоволення вимог охорони праці. Інформаційне забезпечення – це сукупність інформаційних ресурсів, присвячених темі охорони праці.

Блок управління – це процеси та зв’язки. Управління охороною праці є основним процесом в її організації, в основі якого лежить створення систем управління цією сферою трудової діяльності. Управління професійними ризиками передбачає комплекс взаємопов’язаних заходів, спрямованих на виявлення, оцінювання та зниження рівнів професійних ризиків працівників.

Змістовий блок складають елементи, що входять до складу охорони праці, включаючи санітарно-гігієнічні, технічні та інші заходи.

Із коментарів до рис. 1 видно, що роботодавці бачать соціально-економічне значення структурних блоків охорони праці та їхніх складових. Однак на змісті структурного елемента «господарське забезпечення» зупинимося більш детально. Для цього необхідно розглянути теоретико-методологічні положення щодо економічного забезпечення заходів з охорони праці, які склалися в нормативно-правовому та науковому середовищі на сьогодні.

Слід зазначити, що у фаховій літературі немає визначення поняття «економічне забезпечення охорони праці».

Огляд відповідного законодавства розкриває поняття «фінансування заходів щодо поліпшення умов та охорони праці», яке можна трактувати як форму економічної підтримки. Однак у контексті охорони праці термін «фінансування» означає певний набір коштів, обмежений законодавчо встановленим нормативом, викладеним у статті 226 Трудового кодексу України. Відповідно до цього джерела, бачимо, що фінансування заходів з охорони праці роботодавцями (за винятком державних унітарних підприємств і державних установ) має бути в розмірі не менше 0,5 % загальних витрат на оплату праці [2]. Проте очевидно, що цей стандарт не відповідає нормативним вимогам з охорони праці. Ця цифра являє собою мінімальний обов'язковий рівень, встановлений державою. Щоб відповідати нормативним вимогам, необхідно збільшити це стандартне значення.

Отже, поняття «економічне забезпечення охорони праці» є більш розширеним за обсягом, ніж поняття «фінансування заходів з охорони праці», оскільки охоплює додаткові фінансові вкладення в заходи, спрямовані на поліпшення умов та охорони праці. По суті економічна підтримка охоплює інвестиції в людські ресурси, що забезпечує комплексний і багатогранний підхід щодо підвищення якості трудового життя і захисту інтересів працівників.

Виходячи з вище зазначеного та визначивши призначення елементу «економічне забезпечення охорони праці», можемо сформулювати його мету – формування нового типу ідеології охорони праці роботодавця та працівника. Це базовано на цілеспрямованому збереженні кадрового потенціалу. Далі мета дає змогу позначити завдання економічного забезпечення охорони праці [6]:

- збереження життя і здоров'я працівників у процесі їхньої трудової діяльності (збереження генетичного здоров'я нації, зниження рівня професійного ризику);
- зниження потенціалу трудового опортунізму менеджменту організацій

відносно працівників і пов'язаних із ним трансакційних витрат;

- зміна уявлень про витрати на працеохоронні заходи (витрати, інвестиції в людські ресурси);
- підвищення правової та економічної грамотності роботодавців;
- створення стійкої економіки організації;
- підвищення прихильності роботодавця та працівника до охорони праці.

Зробивши необхідний теоретичний аналіз, можна стверджувати, що економічне забезпечення охорони праці є сукупністю економічних механізмів і грошових коштів обов'язкового і додаткового характеру (цільового призначення), реалізованих для здійснення заходів з охорони праці. Ці заходи забезпечують збереження життя і здоров'я працівників шляхом створення безпечних умов праці та підвищення ефективності господарської діяльності організації за рахунок зниження трансакційних витрат, пов'язаних із проявами трудового опортунізму роботодавців відносно працівників у сфері охорони праці. Сукупність економічних механізмів і грошових ресурсів становить внутрішній зміст процесу економічного забезпечення. Під ним розуміють принципи, джерела і методи оцінювання достатності її обсягу, у тому числі коштів, що витрачають на забезпечення організації охорони праці та поліпшення її умов.

Структуру економічного забезпечення охорони праці, можна подати як графічну модель на рис. 2.

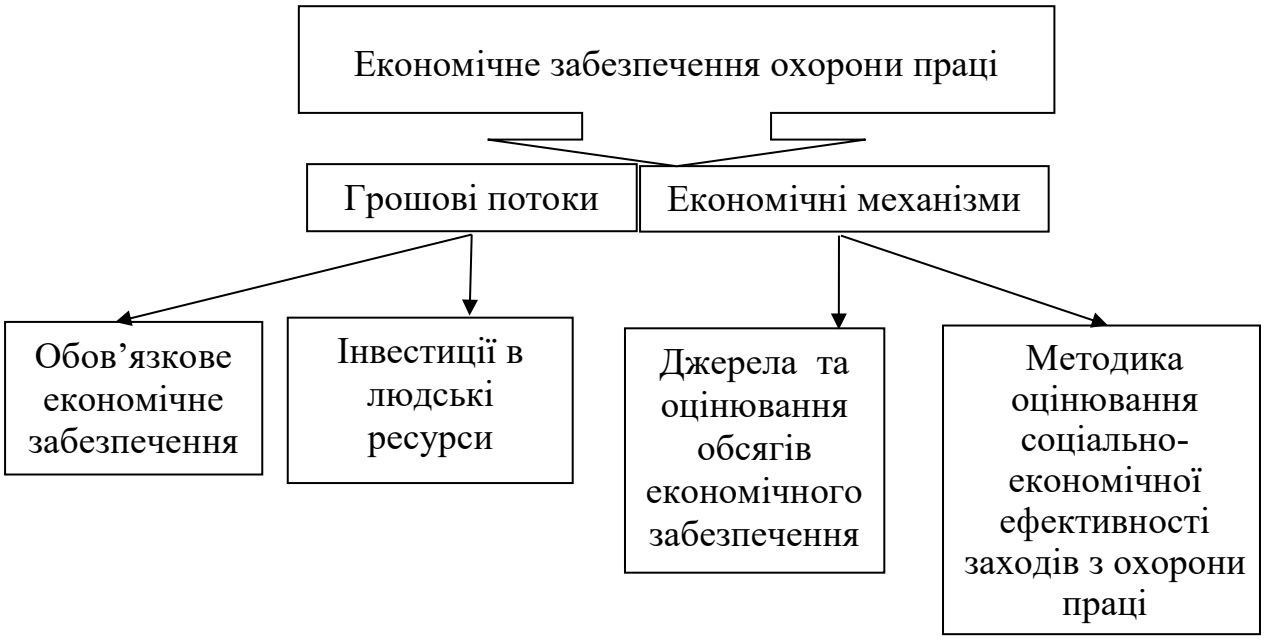


Рис. 2. Графічне відображення моделі економічного забезпечення охорони праці (згруповано авторами на підставі джерел [5, 8])

Раніше норми про підтримку прав працівників у законодавстві про захист працівників не були прописані самі по собі. Вони завжди були частиною законів про права працівників [1-3, 7].

Слід зазначити, що є певні труднощі економічного забезпечення охорони праці. По-перше, відповідальність за економічне забезпечення охорони праці покладено виключно на роботодавця. По-друге, чинна

законодавча база ускладнює застосування економічного забезпечення охорони праці в малому та середньому бізнесі. Держава встановила мінімальний поріг 0,5 % відрахувань на поліпшення умов праці та економічне забезпечення заходів з охорони праці. Цим обмежуються більшість підприємств. Проте заборони підприємствам вкладати більші кошти в охорону праці немає, хоча мало хто це робить. Ускладнює ситуацію і чинний залишковий принцип економічного забезпечення охорони праці. Це пояснюють тим, що охорону праці не вважають одним з основних показників ефективності господарської діяльності організації, що сприяє зростанню прибутку. Тому багато роботодавців розглядають це як фінансовий пріоритет, виділяючи із залишкових ресурсів [8, 10].

Ці обставини свідчать про наявність проявів трудового опортунізму роботодавців стосовно працівників за дотримання ними як вимог працеохоронного законодавства, так, загалом і в цілому, конституційного права на працю в безпечних умовах.

Сучасний стан економічного забезпечення як державної промисловості, так і малого підприємництва є незадовільним. Працівники не забезпечені засобами індивідуального захисту, використовують неякісний спеціальний одяг і взуття, на місцях не проводять медичні огляди та навчання працівників правилам охорони праці. В окремих організаціях стан виробничого обладнання та конструктивних елементів виробничих приміщень і будівель створює реальну загрозу життю і здоров'ю працівників. Слід зазначити, що інспектори Держпраці часто фіксують невідповідність економічного забезпечення охорони праці нормативу фінансування заходів з охорони праці. У таких випадках основну увагу приділяють простому дотриманню офіційних правил, а не інвестиціям у збереження людських ресурсів. Така фінансова підтримка охорони праці часто зумовлена обмеженими фінансовими підприємств, що може перешкоджати їхній здатності інвестувати в розвиток, або відсутністю управлінської пріоритетності заходів з охорони праці.

На сьогодні актуальним є обговорення практичного застосування теоретико-методологічних основ економічного обґрунтування охорони праці зі збереженням кадрового потенціалу на підприємствах країни. Під основами тут слід розуміти сукупність теоретичних положень економічного забезпечення охорони праці, її принципів і джерел, а також сукупність методичних розробок щодо оцінювання та аналізу відповідних показників. Розглянуті показники стосуються як економіко-соціальних аспектів охорони праці, так і її економічного забезпечення в конкретних формах із кількісними значеннями. Теоретичні основи частково відображені в законодавчій базі, включаючи Закон України «Про охорону праці», Кодекс законів про працю та відповідні нормативні акти, видані Кабінетом Міністрів України. Проте самі по собі ці законодавчі положення не дають повного огляду процесів економічного забезпечення охорони праці. Методологічна база, яка використана для вивчення, оцінювання та аналізу економічної підтримки, включає конкретні методи та прийоми. Наприклад, існує методика оцінювання втрат валового внутрішнього продукту країни, показників втрат фонду робочого часу, виплат пенсій за списками № 1 і № 2. Ці методи використовують зі складанням звітів про стан умов і охорони праці на підприємствах країни. Додатково існують методики розрахунку окупності заходів з охорони праці. Найбільш поширеною з них є методика розрахунку окупності через нормативний термін 12,5 років, прийнята в Україні для заходів з охорони праці [9, 11]. Прикро, що оцінювання та аналіз прямих і непрямих витрат у сфері охорони праці відбувається досить рідко. Тепер використовують єдиний метод розрахунку витрат або збитків, пов'язаних із нещасним

випадком на виробництві. Крім того, оцінюванню впливу факторів охорони праці на продуктивність праці не завжди приділяють належну увагу.

Ще одним основним економічним показником є відповідність обсягів фінансування законодавчим нормам, оскільки багато соціально-економічних процесів залежать від економічного забезпечення заходів з охорони праці або його відсутності. Показник зменшення плинності кадрів за рахунок покращення умов та охорони праці наразі не використовують. З цією метою колектив авторів працює над розробленням методики оцінювання соціально-економічної ефективності заходів з охорони праці, спрямованої на поліпшення умов праці і відповідність їх нормативним актам з охорони праці.

Висновки. Розробляють усе більшу кількість важелів мотивації, які спонукають роботодавців цінувати людський ресурс і спрямовувати значні кошти на його збереження, підтримуючи тим самим ініціативу досягнення прийнятного рівня професійного ризику на виробництві (наприклад програма «нульового» травматизму). Проте поки роботодавці забезпечуватимуть охорону праці за залишковим принципом, ситуація не зміниться на краще. З метою стимулювання роботодавців вкладати кошти в заходи з охорони праці необхідно запровадити в законодавчу практику теоретико-методологічні положення щодо економічного забезпечення охорони праці. Це дасть змогу підвищити їхню економічну та правову грамотність шляхом впровадження компоненту «Економічне забезпечення» до програми навчання, підготовки та перепідготовки з охорони праці. Сучасний етап розвитку країни потребує новітніх і більш гнучких економічних методів управління охороною праці на підприємстві. Ці методи будуть сприяти створенню безпечних умов праці для людини.

Список використаних джерел

1. Кодекс законів про працю України: 322-08 № 4170-IX від 01.01.2025 р. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/322-08#Text (дата звернення: 07.04.2025).

2. Про охорону праці: Закон України. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2694-12#Text (дата звернення: 07.04.2025).

3. Про загальнообов'язкове державне соціальне страхування: Закон України. URL: https://ips.ligazakon.net/document/T991105 (дата звернення: 07.04.2025).

4. Безпека функціонування транспортної інфраструктури в умовах воєнного стану / Ю. В. Буц, А. О. Каграманян, Д. С. Козодой та ін. *Збірник наук. праць Укр. держ. ун-ту залізнич. трансп.* Харків: УкрДУЗТ, 2024. Вип. 210. С. 163-179.

5. Гриценко Н. В., Козодой Д. С. Управління сучасними економічними методами охорони праці. *Збірник наук. праць*. Харків: НТУ«ХПІ», 2020. № 24(1349). С. 112-115.

6. Гриценко Н. В., Панченко Н. Г. Організація протидій негативному наслідку впливу ризиків у логістичних транспортних системах. *Збірник наук. праць Укр. держ. ун-ту залізнич. трансп*. Харків: УкрДУЗТ, 2024. Вип. 209. С. 91-101.

7. Мальчик М. В., Попко О. В., Гонтаренко Н. А. Маркетингово-логістичні процеси в економіці: теорія та практика: монографія / за ред. М. В. Мальчик. Рівне : НУВГП, 2015. 197 с.

8. Огінська А. Ю. Соціальний захист населення та фінансовий механізм його реалізації: теоретико-концептуальний зріз. *Економіка та держава*. 2018. № 4. С. 131-136.

9. Пожарова О. В. Охорона праці: навч. посіб. Одеса, 2022. 86 с. URL: https://doi.org/10.32837/11300.18442.

10. Роледерс В. В., Кукель Г. С. Проблеми фінансування сфери соціального захисту населення в Україні та шляхи їх подолання. *Інвестиції: практика та досвід.* 2019. № 10. С. 49–54.

11. Следь О. О. Економічні та соціальні аспекти поліпшення умов та охорони праці в ринковій системі господарювання: навч. посіб. розділ «Економічний аналіз». 2011. Вип. 9. Ч. 2.

12. Шишкін В. О., Бахметова Я. Ю. Перспективи використання логістичної стратегії як умова забезпечення конкурентоспроможності підприємства. *Modern Economics*. 2019. № 14(2019) С. 296-300. DOI: https://doi.org/10.31521/modecon.V14(2019)-46 (дата звернення: 07.04.2025).

Гриценко Наталя Валеріївна, кандидат економічних наук, доцент кафедри транспортних систем та логістики, Український державний університет залізничного транспорту, м. Харків, Україна.
ORCID iD: https://orcid.org/0000-0002-2901-1411. Тел.: +38(050)-582-44-32. E-mail: gritsenkonatal@gmail.com.
Козодой Дмитро Сергійович, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри охорони праці та навколишнього середовища, Український державний університет залізничного транспорту, м. Харків.
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0450-2617. Тел.: +38(066)-519-47-31. E-mail: dmitry_1980@ukr.net.

Hrytsenko Natalya Valeriivna, PhD (Ekon), Associate Professor, department of transport systems and logistics, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. ORCID iD: https://orcid.org/0000-0002-2901-1411. Tel.: +38(050)-582-44-32. E-mail: gritsenkonatal@gmail.com.
Kozodoy Dmitro Serhiyovych, PhD (Tech), Associate Professor, associate professor of the department of protection of natural environment, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine.
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0450-2617. Тел.: +38(066)-519-47-31. E-mail: dmitry_1980@ukr.net.

Статтю прийнято 30.06.2025 р.

УДК629.424.1

ВИЯВЛЕННЯ ПЕРВИННОЇ ПРИЧИНИ ЗРОСТАННЯ ЗНОСУ ГРЕБЕНІВ КОЛІС ЛОКОМОТИВІВ І ПРОПОЗИЦІЇ ЩОДО ЙОГО ЗМЕНШЕННЯ

Д-р техн. наук В. Г. Маслієв, асп. О. О. Якунін

IDENTIFICATION OF THE PRIMARY CAUSE OF INCREASING WEAR OF LOCOMOTIVE WHEEL FLANGES AND PROPOSALS FOR ITS REDUCTION

Dr. Sc (Tech.) V. Masliev, postgraduate student O. O. Yakunin

DOI: https://doi.org/10.18664/1994-7852.212.2025.336527

Анотація. *У статті проаналізовано причини виникнення на залізничному транспорті проблеми підвищеного зносу гребенів коліс локомотивів, оцінено вплив на нього змін, які відбулися в параметрах і характеристиках колії, екіпажів локомотивів та в експлуатації у другій половині минулого століття. Еволюція зв'язків колісних пар із рамами візків призвела до втрати точності і стабільності розміщення колісних пар у рамі візка. Висунуто гіпотезу, що це стало головною причиною підвищення зносу гребенів коліс. Розв'язувати проблему пропоновано через обладнання візків локомотивів повідцями із шаровими шарнірами. Вони стабілізують розташування колісної пари в рамі візка і виключають її кутові обертання навколо вертикальної осі, що зменшить кути набігу гребенів на рейки та їх знос.*

Ключові слова: *залізничний транспорт, візок, колісна пара, зв'язок, шаровий шарнір, кут набігу, знос гребенів коліс.*

Abstract. *The article analyzes the causes of the problem of increased wear of locomotive wheel ridges in railway transport, evaluates the impact of changes that occurred in the parameters and characteristics of the track, locomotive crews and operation in the second half of the last century. The evolution of the connection of wheel pairs with trolley frames is studied: from jaw-type ones on steam locomotives to modern, chain-type ones on diesel locomotives and electric locomotives. which led to the loss of accuracy and stability of the installation of wheel pairs in the trolley frame. It is hypothesized that this was the main reason for the increase in the wear of locomotive wheel ridges compared to previous years, when the carts had a jaw connection of the cart frames with the wheel pairs, which stabilized their position in the frames. When switching to an elastic leash connection of trolley frames with wheel pairs, they got a certain freedom of movement in the plane of the track. This allowed them to rotate against the direction of the track when moving along curved sections – under the action of the friction forces of the wheels on the rails, and increased the angles of the wheel flanges on the rails. The consequence of this was an increase in wear at the contact of the wheel flange with the side edge of the rail. We see the direction of solving this problem in the creation of a dog link, which stabilizes the location of the wheel pair in the bogie frame, primarily in the longitudinal direction, and also eliminates its angular rotations around the vertical axis. This does not allow it to turn against the direction of the curved section of the track under the action of the friction forces of the wheels on the rails, and eliminates the corresponding increase in the angles of the wheel flanges on the rails. The consequence of this will be a decrease in the wear of the flange and the side edge of the rail and gives real hope of reaching its level, which was with the «jaw» bogies.*

Keywords: *railway transport, bogie, wheel pair, link, ball joint, angle of attack, wear of wheel flanges.*

Вступ. Як відомо, знос гребенів коліс залишається великою проблемою для Укрзалізниці (УЗ), а витрати внаслідок цього на відновлення профілів коліс і рейок – непідйомні. Доки існує ця проблема, є загроза для УЗ бути збитковою.

Основну частину екіпажів рейкових транспортних засобів (ТЗ) являють собою візки. Від досконалості їхньої конструкції залежить успішна експлуатація системи «ТЗ – колія», зокрема знос гребенів коліс і бічних граней рейок, опір руху та витрати енергоносіїв на тягу.

Дослідження, які проводять десятки років українські та закордонні фахівці, доводять, що однією з головних причин виникнення проблеми зростання зносу гребенів і бічних граней рейок є недосконаліть конструкції саме візків.

Сер У. ЧЕРЧІЛЬ: «Якщо хочеш зрозуміти теперішнє, подивись у минуле!». Саме так ми спробуємо визначити первинні причини, які призвели до збільшення зносу гребенів коліс локомотивів порівняно з минулими роками, і сформулювати пропозиції щодо вирішення цієї дуже актуальної проблеми.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. До 1960-1970 рр. на вітчизняних залізницях експлуатували виключно локомотиви зі «щелеповими» візками (ДДА (США), ТЕ1, ТЕ2, ТЕ3, 2ТЕ10 та електровози). Вони мали такі самі позитивні особливості в розташуванні колісних пар у рамах візків, що і паровози. Отже, можна припустити, що знос гребенів коліс у них мав бути наближеним до того, який був на паровозах.

«Щелеповий» зв'язок колісних пар із рамою зберігав паралельність між собою осей колісних пар, що мали можливість обертатися лише навколо поперечної до

колії осі. Також зберігалася перпендикулярність і симетричність їх відносно поздовжньої осі симетрії візка як на стоянках, так і з рухом по прямих і кривих ділянках колії. Висока точність і стабільність установлення колісних пар відносно рами візка була необхідна для надійної роботи механізму, який поєднував паровий двигун із колесами паровоза.

Ця стабільність сприяла утриманню протягом усього терміну експлуатації кутів набігу гребенів на рейки на певному рівні, який обчислювали як відношення «полюсної відстані» колісної пари до радіуса певної кривої ділянки колії. Оскільки знос гребеня пропорційний куту набігу, то він, відповідно, був також стабільним у процесі експлуатації колісної пари [1].

У роботі [2] розглянуто проблеми динаміки руху тепловозів, обладнаних пристроями, що зменшують знос гребенів і поверхонь кочення бандажів коліс. Складено математичні моделі тепловозів з урахуванням роботи таких пристроїв з рухом по кривих ділянках колії. Ранжовано за значущістю чинники, від яких залежить знос. Запропоновано метод прогнозування зносу гребенів бандажів коліс. Але автор недостатньо уваги приділив динаміці швидкісного руху ТЗ.

Це питання розглянуто в роботі [3], де зазначено, що пара «колесо – рейка» є системою з позитивним зворотним зв’язком: екіпажі з перекосами осей зношують головку рейки, а це викликає більш інтенсивний (лавиноподібний) знос гребенів коліс. Перекіс колісних пар на 0,001 рад збільшує опір руху на 5,5 Н/т, бічні сили на осях, що набігають, збільшуються на величину до 20 кН. Кути набігу, а отже, і чинник зносу, істотно залежить від величини перекосу колісних пар: взаємний перекіс 0,004 рад збільшує чинник зносу в чотири-вісім разів. У 80 % колісних пар спостерігають знос лише одного з гребенів колісної пари. Аналогічні результати отримано на полігоні в Пуебло (США), на підставі чого в Асоціації американських залізниць зроблено висновок про те, що відхилення паралельності осей колісних пар понад 0,003 рад не припустимо.

Але автори не дослідили залежностей зносу гребенів інших відхилень осей колісних пар відносно поздовжньої осі симетрії візка.

У роботі [4] цьому питанню приділено увагу: отримано залежності кутів набігу гребенів коліс від відхилень у розташуванні колісних пар у рамі від номінального, які є типовими для візків вантажних вагонів моделі 18-100. Особливістю цих візків є те, що бокові рами не жорстко пов'язані між собою, внаслідок чого виникають поздовжні «забігання» бічних рам разом із колісними парами, що досягають 20 мм. До цієї величини треба додати зазори в щелепових зв’язках букс із бічними рамами, технологічні відхилення розмірів бічних рам, що додає ще 2-3 мм та ін. Ці чинники разом можуть створити у кривій радіусом 600 м кут набігу гребеня на рейку до 0,030 рад, а за відсутності їх кут складає 0,006 рад. Сумарний кут набігу за цих умов збільшився у п’ять разів, що відповідно вплине на знос гребенів. За максимальних значень перекосу колісних пар бічні навантаження на рейки збільшуються на 35–50 % за будь-яких швидкостей руху і в кривих будь-якого радіуса.

Отже, навіть за «щелепового» зв’язку з бічною рамою колісні пари такого візка не мають стабільного розташування відносно його поздовжньої осі симетрії, що може бути вагомою причиною суттєвого зростання зносу гребенів їхніх коліс.

Але в роботі не визначено вплив на кути набігу гребенів підвищення зовнішньої рейки кривої ділянки колії.

У роботі [5] подано спрощену модель контакту рейки та колеса з урахуванням його кута обертання навколо вертикальної осі. Досліджено поведінку контакту між стандартним китайським профілем рейки CHN 60 і трьома типами профілів коліс і різними зсувами колісної пари і кутами обертання. Визначено, що припущення

можуть бути використані для опису контакту колеса та рейки і нормального тиску на ньому з високою точністю.

Але залишається невирішеним питання про універсальність моделі контакту, наприклад, для вітчизняних типів рейок і профілів коліс.

У роботі [6] за допомогою математичного моделювання досліджено екіпаж із системою для радіального встановлення колісних пар (РУКП) у кривих ділянках колії. Отримано залежності для кутів обертання колісних пар від параметрів буксових повідців. Доведено, що РУКП суттєво зменшує знос гребенів коліс на першій колісній парі екіпажу з рухом по кривих радіусом 300–600 м.

Але в роботі не проаналізовано динаміку екіпажу з РУКП по прямих ділянках колії.

У роботі [7] з використанням методу багатокритеріальної оптимізації спроєктовано профілі коліс для міських поїздів, які мінімізують їхні знос і втому. Наприклад, один із варіантів профілів, на ділянці з радіусом кривизни 350 м знос зменшився на 4,3 %, а індекс втоми поверхні – на 17,9 %. Характеристики безпеки руху, такі як сход із рейок і бічна сила, у цих профілів показали найкращі характеристики порівняно з вихідним профілем. Результати будуть використані для підвищення терміну служби коліс і рейок і підвищення швидкості проходження транспортних засобів по криволінійних ділянках.

У статті [8] за допомогою різних контактних моделей проведено теоретичне оцінювання інтенсивності зносу бандажів колісних пар локомотивів з рухом у режимі тяги по сухих рейках із швидкістю 60 км/год у кривій 300 м. Інтенсивність зносу розраховували для нових профілів бандажа та рейки за умови двоточкового контакту. Інтенсивність зносу поверхні кочення бандажа дорівнює 10^{-6} мм/кДж, а гребеня $6{,}4 \cdot 10^{-6}$ мм/кДж. Ця робота дуже важлива для прогнозування зносу гребенів в експлуатації, але зазвичай ще потрібно експериментально перевірити і подати «інтенсивність зносу» у прийнятій в експлуатації розмірності (мм/10 тис. км).

У роботі [9] наведено результати дослідження динамічних процесів взаємодії гребеня колеса та рейки, а також формування їх зносу у кривих ділянках колії. Ураховано нормальні та дотичні навантаження в зоні контакту гребеня колеса та рейки з їхнім поздовжнім і круговим взаємним ковзанням. Доведено доцільність застосування антифрикційних матеріалів для зниження зносу на контакті.

Але в роботі не досліджено вплив кутів набігу гребеня на рейку на формування зносу на їх контакті.

У роботі [10] наведено результати експериментальних досліджень щодо ефективності використання нової мастильної композиції, до складу якої входить індустріальна олива марки BioRail з додаванням наноматеріалу. Показано, що цей склад істотно збільшує зносостійкість пари тертя колесо–рейка, запобігає електрохімічній корозії і, головне, стабілізує коефіцієнт тертя на оптимальному рівні 0,25. Доведено, що змащування контакту гребінь-рейка лише частково вирішує проблему, але в цілому вона залишається, тому що долає лише наслідки, а не причини зносу.

За кордоном з успіхом розв’язують проблему зносу гребенів коліс через обладнання візків системами для радіального встановлення колісних пар у кривих (РУКП) [11]. Європейські держави (Австрія, Швейцарія, Італія, Норвегія та ін.) мають майже 50-річний досвід використання таких систем РУКП на ТЗ.

У роботі [12] зазначено, що в екіпажів із РУКП знизилися кути набігу гребенів коліс на рейки. Внаслідок цього зменшилися поздовжнє та поперечне ковзання коліс, напрямні сили та шум, утворення ковзунів. Зникли дефекти на поверхнях кочення коліс, уповільнився розвиток хвилеподібного зносу внутрішньої рейки у кривій, зменшився опір руху поїзда та схильність до

наповзання гребеня на рейку, що підвищило безпеку руху.

Завдяки РУКП періодичність переточування коліс вдалося довести до 500 тис. км пробігу, а в окремих випадках і до 700 тис. км, навіть на ділянках, де багато кривих малого радіуса.

У роботі [13] досліджено вплив чинника форми профілю колеса на взаємодію його з рейкою. Такий чинник змінює місце контакту між колесом і рейкою, а також форму плями контакту і впливає на динамічні характеристики ТЗ, а також знос і втому контактів. Оскільки контактний тиск між гребенем колеса і рейкою на кривій вище, ніж на прямій, це призводить до збільшення зносу та втоми коліс, підвищення шуму, погіршення комфорту їзди тощо.

У роботі [14] за допомогою моделювання досліджено залежність пробігу коліс зменшеного діаметра у візку Y-25 від їхнього діаметра. Виявлено, що термін служби коліс із зменшенням діаметра нелінійно скорочується, а деградація колеса прискорюється. Як наслідок, скорочується інтервал перепрофілювання, тобто менші колеса проходять менші відстані, ніж більші.

У роботі [15] запропоновано варіант вирішення завдання підвищення ефективності технологічного процесу контролю встановлення колісних пар у візку з пружними повідцевими буксами. Завдання вирішено з використанням вимірювального обладнання на основі лазерних технологій і приймачів у вигляді фотоелементів, які розташовано на колісній парі. Перевагою пристрою є повна автоматизація процесу контролю та встановлення колісної пари у візку до номінального положення.

У роботі [16] наведено результати теоретичного дослідження механізму зношування коліс високошвидкісного поїзда за різних режимів гальмування.

У роботі [17] запропонована модель контакту колеса з рейкою для досліджень взаємодії залізничного ТЗ з колією, а в роботі [18] розглянуто велику кількість моделей контакту рейки з колесом, у той час як у статті [19] автори порівнюють різні показники зносу коліс для кількісного його оцінювання. Проте перший не обговорює чисельні моделі для коліс зменшеного діаметра, а останній не застосовує до них відомі показники зносу.

Отже, проблему зносу на контактах коліс із рейками остаточно все ще не вирішено. Багато фахівців продовжують активно досліджувати процеси, які відбуваються на контактах коліс із рейками. Тому можна вважати, що завдання виявлення первинних причини зростання зносу гребенів коліс локомотивів і пропозиції з його зменшення є актуальним, бо дасть змогу покращити експлуатаційні характеристики РС залізниць.

Визначення мети та завдання дослідження. Виявлення первинних причин зростання зносу гребенів коліс локомотивів і пропозиції з його зменшення. Для досягнення мети потрібно вирішити такі завдання:

1. Дослідити зміни в параметрах і характеристиках колії, режимах експлуатації ТЗ і технологіях їх проєктування і виробництва, які відбулися за період переходу від паровозної на тепловозну та електровозну тягу.

2. Узагальнено оцінити технічні наслідки від цих змін.

3. Запропонувати технічні рішення, які забезпечать поетапне розв’язання проблеми зносу на контактах коліс із рейками. На першому етапі – це зменшення зносу на контактах до рівня, який був за «щелепових» візків. Другий етап передбачає обладнання ТЗ системами для радіального встановлення колісних пар у кривих ділянках колії, щоб вийти на Європейський рівень зносу на контактах коліс із рейками.

Основна частина дослідження. Спробуємо визначити основну причину суттєвого зростання зносу гребенів коліс і бічних граней рейок на локомотивах, що почався приблизно 50 років тому. Для цього

проаналізуємо зміни, які відбулися на той час у стані колії, технології експлуатації ТЗ, будові їхніх екіпажів.

Зміни у стані, параметрах і характеристиках колії з середини минулого століття і до сьогодення були такими: ширину колії зменшено на 0,26 %, зазор між гребенем і бічною гранню рейки (за їхнього середньостатистичного зносу) зменшено на 10 %; масу погонного метра рейок збільшено на 14 %, сталь, із якої їх виготовляють, за твердістю і зносостійкістю залишилася майже на тому самому рівні. Дещо збільшилася протяжність колії із залізобетонними шпалами.

Тому можна вважати, що зміни колії не могли стати причиною суттєвого збільшення зносу гребенів коліс і бічних граней рейок.

Зміни у процесах експлуатації за цей час полягали у збільшенні сил, які діють від коліс на рейки, у межах 20–25 %, що збільшило роботу сил тертя на їхніх контактах і відповідно знос.

Відома також гіпотеза, що впровадження буксових підшипників кочення замість підшипників ковзання (рідка олива від яких нібито розбризкуванням змащувала контакти коліс із рейками) сприяло збільшенню зносу. Але не всі фахівці з цим погоджуються.

Тому можна вважати, що зміни в експлуатації не могли критично вплинути на збільшення зносу гребенів коліс і бічних граней рейок.

Зміни в будові ТЗ, зокрема параметрах і характеристиках їхніх екіпажів, почалися з 60-70 рр. минулого століття. Вони пов’язані, зокрема, із наданням колісній парі певної «свободи руху» відносно рами візка, яку створюють пружно-демпфуючі повідцеві зв'язки букс із рамою візка ТЗ.

На нашу думку, це є суттєвою відмінністю цих візків від «щелепових», де забезпечена була стабільність у розташуванні колісних пар у візку.

Хронологічно це співпадає з початком збільшення середнього питомого зносу гребенів коліс локомотивів із 0,15 мм/10 тис. км пробігу до 1960 р. до 1 мм /10 тис. км у 1990 р., коли майже всі локомотиви вже було обладнано «повідцевими» візками. Водночас почали спостерігати стрімке зростання зносу бічних граней рейок.

Тому можна сформулювати гіпотезу: надання колісній парі певної «свободи руху» відносно рами візка, тобто можливості здійснювати з рухом не тільки штатні вертикальні переміщення, а перш за все кутові обертання у площині колії навколо вертикальної осі, стимулювало збільшення кутів набігу гребенів коліс на рейки. Саме це могло критично вплинути на зростання зносу бічних граней рейок і гребенів коліс ТЗ.

З наданням колісним парам «свободи руху» не враховано безцінний досвід, що був набутий зі створенням екіпажів паровозів, де висока точність і стабільність у розташуванні колісних пар відносно рами візка була збережена також і в експлуатації.

Жахливі наслідки від цього «неврахування» добре відомі [2-4].

Значна частина витрат на ремонти УЗ з експлуатацією ТЗ обумовлена процесами, що мають місце на контактах коліс із рейками, а саме зносом рейок і коліс по колу кочення (прокат), особливо їхніх гребенів.

Розв’язання проблеми підвищеного зносу на контактах коліс із рейками необхідно починати зі стабілізації розташування колісних пар відносно рам візків. Це значно менш коштовно, ніж величезні витрати на усунення інших, другорядних, причин підвищеного зносу на контактах коліс із рейками.

Наші пропозиції є такими. Для локомотивів, які мають візки з буксовим повідцевим зв’язком колісних пар із рамою, необхідні технічні рішення, які забезпечать стабілізацію розташування колісних пар у рамі візка. Також необхідно впровадити контроль за розташуванням колісних пар у візках.

У НТУ «ХПІ» розроблено ряд технічних пристроїв, які дають змогу це реалізувати (патенти України № 23416А, № 126802, № 154795).

Розв'язувати проблему зносу на контакті гребеня колеса з бічною гранню рейки пропоновано здійснити у два етапи:

- по-перше, треба врахувати позитивний досвід використання «щелепових» візків і позбавити колісні пари можливості обертатися навколо вертикальної осі, що забезпечить пробіг ТЗ 200-300 тис. км до відновлення профілів коліс;

- по-друге, треба врахувати позитивний світовий досвід використання РУКП у кривих ділянках колії, що забезпечить пробіг ТЗ 500-700 тис. км до відновлення профілів коліс.

Для реалізації першого етапу достатньо провести модернізацію пружно-демпфуючих повідців, як показано на рисунку, де наведено візок, що містить раму 1, шворневий вузол 2 для зв’язку з кузовом ТЗ, опори 3 для установлення кузова, підвіску 4, букси 5, колісні пари 6 та повідці 7. В отворах корпуса 8 повідця розташовано пружні втулки 9, 10, а посередині між ними розміщено шарові шарніри 11, 12, в отворах яких розміщено валики 13, 14. Валик 13 закріплено до рами 1, а валик 14 – до букси 5. З обох боків корпуса 8 встановлено торцеві амортизатори 15, які закріплено на валиках 13, 14.

Така конструкція пружного повідцевого зв’язку стабілізує розташування колісної пари 6 у рамі 1 візка в поздовжньому напрямку аналогічно щелеповому зв’язку, що виключає її кутові обертання навколо вертикальної осі. Це дуже важливо, оскільки не дає їй змогу під дією сил тертя коліс по рейках у кривих ділянках обертатися проти напрямку колії і збільшувати кут набігу гребеня на зовнішню рейку. Наслідком цього «стабілізування» буде зменшення зносу гребеня і бічної грані рейки до рівня, який був за «щелепових» візків ТЗ.

До речі, такі очікування мають підґрунтя, яке теоретично підтверджено і викладено в роботі [2]. Від традиційного щелепового зв’язку така конструкція вигідно відрізняється тим, що до шарових шарнірів 11, 12 (на рисунках в, г), оливу для їх змащування додають лише зі збиранням і ремонтом візка.

Вона не витікає в довкілля і не забруднює його, що зменшує витрати в експлуатації порівняно зі штатними щелеповими візками, тому що виключено їх періодичне змащування.

Розрахунки складових повідця на міцність довели, що напруження згину в матеріалі найбільш навантаженого валика 12 на всіх режимах руху та з урахуванням динаміки не перевищують припустимих (187 МПа).

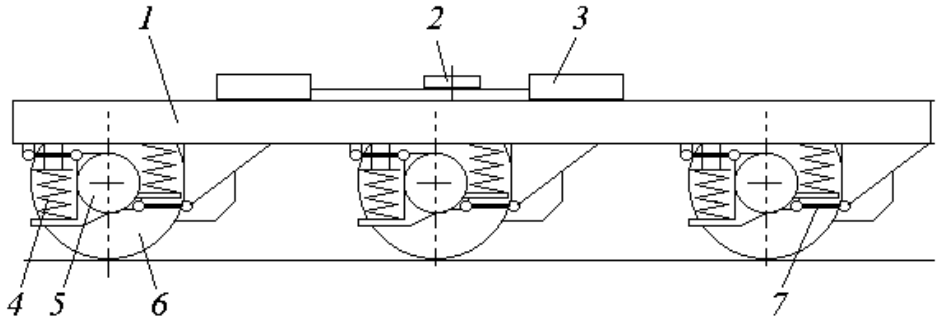
Пропонована конструкція повідців передбачає можливість заміни ними штатних повідців з ремонтом ТЗ.

Якщо динамічно-колійні випробування та перевірка в експлуатації доведуть ефективність використання таких повідців, то наступним кроком пропоновано використання на візках їхньої удосконаленої конструкції, як показано на рисунку г.

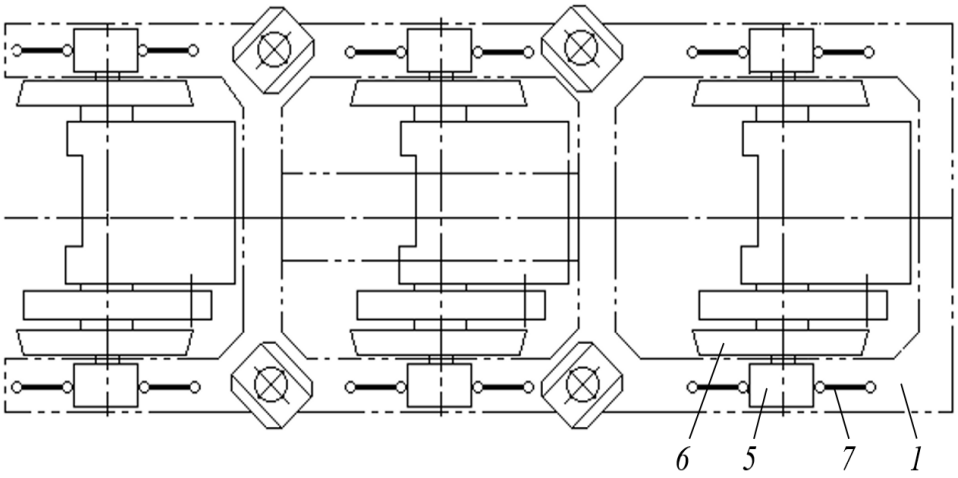
У цьому повідці шарнір 11 зміщено до краю корпуса 1. Ці несиметричні повідці встановлюють на крайніх (першій і третій) колісних парах, що забезпечує їхнє радіальне самоустановлення у кривих ділянках колії, що позитивно буде позначено на зменшенні зносу гребенів коліс [6].

У пропонованих повідцях зберігаються пружно-демпфуючі властивості. Розташування шарових шарнірів між пружними сайлентблоками захищає довкілля від витоків оливи, яка їх змащує, що вигідно відрізняється від штатного щелепового зв'язку.

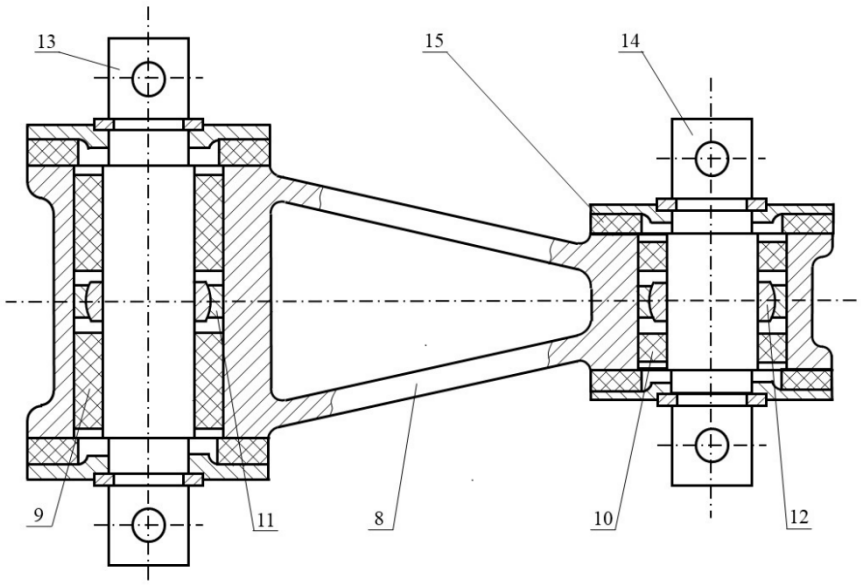
Шарові шарніри можуть бути стандартними або виконані із сучасних метало-керамічних суперзносостійких матеріалів, щоб їх заміну здійснювали через 600 тис. км пробігу.



а

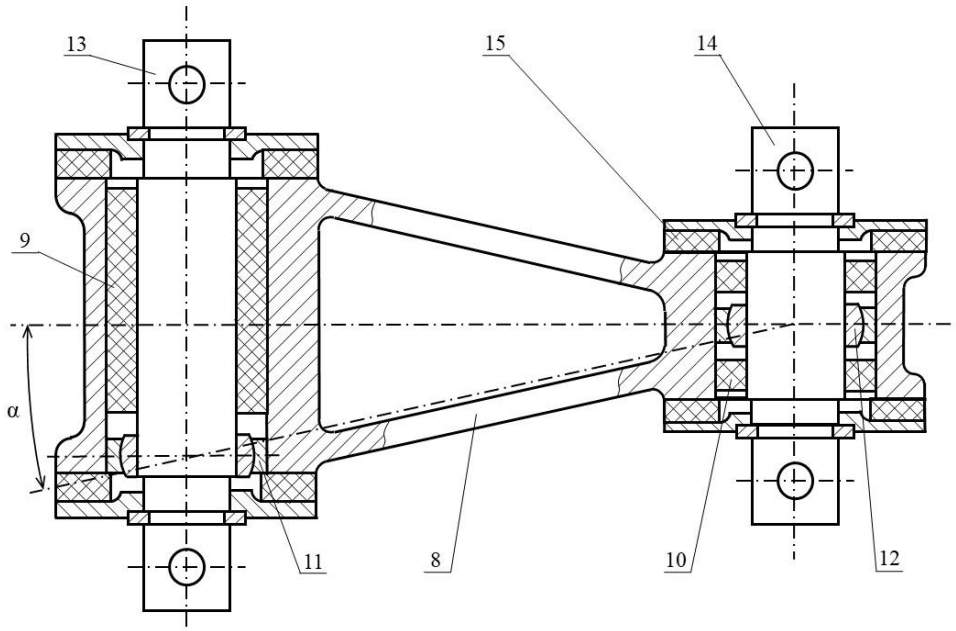


б



в

Рис. Схема візка із шаровими шарнірами в повідцях (початок):
а – вигляд збоку; б – вигляд зверху; в – повідець;



г

Рис. Схема візка із шаровими шарнірами в повідцях (закінчення):
г – повідець для радіального установлення крайніх колісних пар візка; 1 – рама; 2 – шворень; 3 – опори кузова; 4 – буксова підвіска; 5 – букси; 6 – колісні пари; 7 – повідці; 8 – корпус; 9, 10 – пружні втулки; 11, 12 – шарові шарніри; 13, 14 – валики; 15 – торцевий амортизатор

Для обґрунтування наших пропозицій дослідимо залежність кута набігу гребеня на рейку від величини зазорів у шарнірах штатних повідців, який дорівнює куту повороту колісної пари у площині колії:

$$\varphi_{\text{в}} = (\Delta_{\text{ш}\,1} + \Delta_{\text{ш}\,2}) m_{\text{в}} / n_{\text{в}} \cdot d\,, \qquad (1)$$

де $\Delta_{\text{ш}\,1}, \Delta_{\text{ш}\,2}$ – зазори між валиками повідця та його корпусом (як показано на рисунку в);

d = 2,1 м – відстань між серединами букс колісної пари;

$m_{\text{в}}$ – кількість зношених втулок у колісної пари;

$n_{\text{в}}$ = 2, якщо зношено втулки в одного з повідців букси, $n_{\text{в}}$ = 1, якщо зношено втулки в обох повідців букси.

Товщина пружних втулок 9, 10, за кресленням, складає $\Delta_{\text{г}}$= 0,01 м. Зі зносом однієї з втулок одного з повідців однієї букси на 50 % товщини величина кута набігу складе

$$\varphi_{\text{в}1} = 0{,}005 \cdot 1 \,/\, 2 \cdot 2{,}1 = \; 0{,}0012 \text{ рад.}$$

Кут набігу гребеня колеса на рейку, отриманий шляхом геометричного вписування штатного тривісного візка у криву радіусом 350 м, складає $\varphi_{\text{в}G}$~ 0,008 рад. Сумарний кут набігу дорівнюватиме

$$\varphi_{S} = 0{,}008 + 0{,}0012 = 0{,}0091 \text{ рад},$$

тобто збільшився на 15 %.

Зі зносом 50 % обох втулок повідця кут перекосу складе 0,0104 рад, тобто збільшився на 30 %. Критичним буде випадок, коли в колісної пари всі вісім втулок повідців будуть зношені на 50 %:

$$\varphi_{S} = (0{,}005 + 0{,}005)8 \,/\, 1 \cdot 2{,}1 = 0{,}038 \text{ рад},$$

$$\varphi_{S} = 0{,}008 + 0{,}038 = 0{,}046 \text{ рад},$$

тобто кут набігу збільшився на 475 %!

Оцінимо величину кута набігу від дії сил тяги і тертя на контактах поверхонь кочення колеса із рейкою з рухом по кривій радіусом 350 м для випадку, коли пружні втулки повідців ще не мають зносу.

Зробимо це для передньої колісної пари переднього візка тепловоза 2ТЕ116. Жорсткість зв'язку букси з колісною парою в поздовжньому напрямку складає $K_{\text{В}}\eta$ = 8000 кН / м. Дотична сила тяги, яку реалізує одне колесо $F_{\text{К1}}$ = 43,3 кН; поздовжня складова сили тертя колеса по внутрішній рейці з вписуванням у криву T_{111} = 8,41 кН, [2]. Поздовжнє переміщення букси

$$\Delta_{TK} = (Q_T + T_K)/\, K_{B\eta.} \qquad (2)$$

$$\Delta_{TK} = \frac{(22 + 8{,}41)}{8000} = 0{,}0038 \text{ м.}$$

Кут набігу при цьому складе

$$\varphi_{TK} = 0{,}0308/2{,}1 = 0{,}0018 \text{ рад.}$$

Кут набігу гребеня колеса на рейку, отриманий шляхом геометричного вписування штатного тривісного візка у криву радіусом 350 м, складає $\varphi_{\text{в}}$~ 0,008 рад. Тобто сумарний кут набігу дорівнюватиме

$$\varphi_{SUM} = 0{,}008 + 0{,}0018 = 0{,}0098 \text{ рад.}$$

Відомо, що знос гребенів прямо пропорційний куту набігу, тож треба очікувати його відповідного збільшення [1, 2]. Отже, навіть з новими буксовими повідцями знос гребенів буде вищим на 23 %, ніж за жорсткого «щелепового» зв’язку.

Це можна вважати одним із підтверджень нашої гіпотези, що саме позбавлення колісних пар стабільного розташування в межах рами візка стало причиною критичного зростання зносу гребенів коліс.

Хронологічне співпадіння цього «позбавлення» із практично повним переходом ТЗ УЗ на «повідцеві» візки можна вважати другим підтвердженням нашої гіпотези.

За позитивних результатів динаміко-колійних та експлуатаційних випробувань ТЗ із повідцями, які обладнано сферичними шарнірами, можна переходити до реалізації другого етапу розв’язання проблеми зносу гребенів коліс.

Для цього візки треба обладнати несиметричними пружно-демпфуючими повідцями, схему яких наведено на рисунку. Ці повідці встановлюють на крайні, тобто першу і третю колісні пари, що дасть змогу реалізувати їх радіальне встановлення у кривих ділянках колії та отримати подальше зменшення зносу гребенів коліс і бічних граней рейок [2].

Висновки. Визначено первопричину, яка призвела до збільшення зносу гребенів коліс локомотивів і бічних граней рейок порівняно з минулими роками, коли візки мали щелеповий зв’язок рам візків із колісними парами. Вона корелює із переходом на пружний повідцевий зв’язок рам візків із колісними парами, який надав їм певну свободу рухів у площині колії. Це спонукало їх обертатися проти напрямку колії з рухом по кривих ділянках під дією сил тертя коліс по рейках і відповідно збільшило кути набігу гребенів коліс на рейки. Наслідком цього стало пропорційне збільшення зносу на контактах гребенів коліс із бічними гранями рейок. Зі зносом 50 % усіх восьми втулок пружних повідців букси кут набігу, а отже, і знос гребенів коліс збільшується на 475 %, тобто критично.

Напрями розв’язання цієї проблеми ми бачимо у створенні конструкції пружного повідцевого зв’язку, який стабілізує розташування колісної пари в рамі візка в поздовжньому напрямку, що виключає також її кутові обертання навколо вертикальної осі. Це не дає їй змогу обертатися проти напрямку колії під дією сил тертя коліс по рейках з рухом по кривих

ділянках колії і виключає відповідне збільшення кутів набігу гребенів коліс на рейки. Наслідком цього буде зменшення зносу гребеня і бічної грані рейки, що дасть реальну надію виходу на рівень, який був за «щелепових» візків ТЗ.

Для виходу на світовий рівень за зносом гребенів рекомендовано обладнати візки транспортних засобів системами для радіального установлення колісних пар у кривих ділянках колії.

Список використаних джерел

1. Хейман Х. Направление железнодорожных экипажей рельсовой колеей. Москва: Трансжелдориздат, 1957. 415 с.
2. Маслиев В. Г. Динамика тепловозов с устройствами, уменьшающими износ бандажей колес: монографія. Харьков: НТУ «ХПИ», 2008. 288 с.
3. Богданов В. М., Козубенко И. Д., Ромен Ю. С. Техническое состояние вагона и износ гребней колес. *Железнодорожный транспорт*. 1998. №8. С. 23-26.
4. Dynamic interaction of rolling stock and track on high-speed lines combined with freight: monograph / V. Tkachenko, S. Sapronova, N. Braykovska, V. Tverdomed. Vinnytsia: NGO «European Scientific Platform», 2021. 240 p. ISBN 978-617-8037-58-1. DOI 10.36074/dvrsklshrsv-monograph. 2021.
5. Yu Sun, Wanming Zhai, Yunguang Ye, Liming Zhu, Yu Guo. (2020) A simplified model for solving wheel-rail non-Hertzian normal contact problem under the influence of yaw angle. *International Journal of Mechanical Scien ces*. doi: 10.1016/j.ijmecsci. 2020.105554.
6. Маслиев В. Г. Особенности динамики рельсових экипажей с устройствами для радиальной установки колесных пар в кривих. *Механіка та машинобудування.* Харків: ХДПУ, 1999. № 1. С. 161–165.
7. Song C.-Y., Cho, H.-Y. (2022). Multi-Objective Profile Design Optimization to Minimize Wear Damage and Surface Fatigue of City Train Wheel. *Appl. i.* 12. 3940. https://doi.org/10.3390/app12083940.
8. Цигановський І. Теоретична оцінка швидкості зношування бандажів колісних пар локомотивів. Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля. *Тека. Комісія з автомобілебудування та енергетики у сільському господарстві.* 2014. Т. 14. № 1. С. 312–319.
9. Говоруха С. В., Макаров Ю. А. Дослідження бокового зношування рейок при їх механічній взаємодії з колесами ходової частини вагона на криволінійних ділянках колії. *Геотехнічна механіка*. 2017. Вип. 134. С. 125 – 140. https://doi.org/10.15407/geotm2017.134.125.
10. Композиція мастил для підвищення зносостійкості важко навантажених пар тертя / В. Косарчук, М. Чаусов, В. Твердомед та ін. *Транспортні системи і технології.* 2022. № 39. С. 30–40. DOI:10.32703/2617-9040-2022-39-4.
11. Cortesi A. (1998). Trucks from SLM with radial installation of wheel pairs at curves. *News of the world*. № 3. P. 40–45.
12. Rodríguez-Arana B., San Emeterio A., Alvarado U., Martínez-Esnaola J. M. & Nieto J. (2021). Prediction of Rolling Contact Fatigue Behavior in Rails Using Crack Initiation and Growth Models along with Multibody Simulations. *Applied Sciences*. *11*(3). 1026. https://doi.org/10.3390/app11031026.
13. Pires A. C., Pacheco L. A., Dalvi I. L., Endlich C. S., Queiroz J. C., Antoniolli F. A., Santos G. F .M. (2021**).** The influence of wear of railway wheels on reprofiling and service life. 477. 203799. [Google Scholar] [CrossRef]
14. Pellicer D. S. & Larrodé E. (2024). Theoretical Study of the Wear of a Reduced-Diameter Wheel for Freight Wagons, Based on Its Diameter. *Algorithms.* 17(10). 437. https://doi.org/10.3390/a17100437.

15. Пристрій для контролю установки колісних пар у візку: пат. № 154795; № u 2023 00293; заяв. 27.01.2023; опубл. 20.12.2023, Бюл. № 51.

16. Sang H., Zeng J., Wang Q., Huang C., Mu J., Qi Y., Kang W., Liang Y. (2024). Theoretical study of the wear mechanism of high-speed train wheels under different braking conditions. *Wear*. 540–541. [Google Scholar] [CrossRef].

17. Montenegro P.A., Calçada R. (2023). Wheel–rail contact model for railway vehicle – structure interaction applications: Development and validation. *Sci Railw. Eng.* 31. 181–206. [Google Scholar] [CrossRef].

18. Bosso N., Magelli M., Zampieri N. (2022). Simulation of wheel and rail profile wear: A review of numerical models. *Railw. Eng. Sci*. 30. 403–436. [Google Scholar] [CrossRef].

19. Pacheco P. A. d. P., Magell M., Lopes M. V., Correa P. H. A., Zampieri N., Bosso N., dos Santos A. A. (2024). The effectiveness of different wear indicators in quantifying wear on railway wheels of freight wagons. *Railw. Eng. Sci.* 32. 307–323. [Google Scholar] [CrossRef].

Маслієв Вячеслав Георгійович, доктор технічних наук, професор кафедри електричного транспорту та тепловозобудування, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». ORCID iD: https://orcid.org/0000-0003-4575-7077. Тел.: 050 52 02 078 . E-mail: masliew@ukr/net.
Якунін Олександр Олександрович, аспірант кафедри електричного транспорту та тепловозобудування, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». ORCID iD: https://orcid.org/0009-0006-6398-5195. Tel.: 0962376542. E-mail: AlexYakunin@ukr.net.

Masliev Vyacheslav Georgievich, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Electric Transport and Diesel Locomotive Engineering of the National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute». ORCID iD: https://orcid.org/0000-0003-4575-7077. Tel.: 050 52 02 078. E-mail: masliew@ukr/net.
Yakunin Oleksandr Oleksandrovich, Postgraduate Student of the Department of Electric Transport and Diesel Locomotive Engineering of the National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute». ORCID iD: https://orcid.org/0009-0006-6398-5195. Tel.: 0962376542. E-mail: AlexYakunin@ukr.net.

Статтю прийнято 30.06.2025 р.

УДК 621.314

ДОСЛІДЖЕННЯ АКТИВНОГО ФІЛЬТРА-СТАБІЛІЗАТОРА НА БАЗІ ШИРОТНО-ІМПУЛЬСНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА

Кандидати техн. наук О. І. Семененко, Ю. О. Семененко, асист. О. Д. Семененко

RESEARCH OF AN ACTIVE FILTER-STABILIZER BASED ON A PULSE WIDTH CONVERTER

PhD (Tech.) O. I. Semenenko, PhD (Tech.) Y. O. Semenenko, Assistant O. D. Semenenko

DOI: https://doi.org/10.18664/1994-7852.212.2025.336535

Анотація. *У статті наведено результати дослідження активного фільтра-стабілізатора на базі широтно-імпульсного перетворювача понижувального типу в складі перетворювального агрегату тягової підстанції постійного струму. Така реалізація силової частини забезпечить значне спрощення будови активного фільтра-стабілізатора та знизить вартість впровадження його на тягових підстанціях. Синтезовано схему та алгоритм*

керування активним фільтром-стабілізатором на базі структури широтно-імпульсного перетворювача, перевірено його працездатність і проаналізовано основні характеристики.

Ключові сова: *якість електричної енергії, тягова підстанція, перетворювальний агрегат, регулятор напруги.*

Abstract. *Under the conditions of increasing loads on sections of the direct current traction network, traditional measures no longer ensure high-quality and efficient functioning of the traction power supply system. In previous works, the authors of this article proposed incorporating an active filter-stabilizer based on a single-phase bridge converter circuit into the converter unit of a traction substation. The purpose of this approach is to improve the quality of direct current electrical energy and enhance the electromagnetic compatibility of the direct current traction power supply system with adjacent electrical installations.*

The active filter-stabilizer based on the bridge converter circuit can be simplified by implementing it using a buck-type pulse-width modulation (PWM) converter structure. The article presents the results of a study on the active filter-stabilizer based on a buck-type PWM converter within the converter unit of a direct current traction substation. The synthesis of the circuit and control algorithm for the active filter-stabilizer based on the buck-type PWM converter structure has been carried out. A closed-loop automatic output voltage regulation system for the converter unit with the new variant of the active filter-stabilizer is proposed.

Using modeling in the MATLAB environment, the functionality was verified and the quality indicators of the direct current electrical energy of the converter unit with the active filter-stabilizer based on the PWM converter were analyzed.

The research confirmed that implementing the power section based on the PWM converter structure indeed significantly simplifies the design of the previously proposed active filter-stabilizer and reduces the cost of its implementation at traction substations, while maintaining high performance in terms of direct current power quality and electromagnetic compatibility with adjacent electrical installations.

Keywords: *quality of electrical energy, traction substation, converter unit, voltage regulator.*

Вступ. В умовах збільшення інтенсивності вантажних перевезень і за впровадження швидкісного пасажирського руху на ділянках тягової мережі постійного струму спостерігають значне зниження якості енергії живлення електричного рухомого складу. Ця ситуація є особливо проблематичною для ділянок швидкісного руху, де вимоги щодо якості електричної енергії [1] суттєво підвищені. Можливості застосування традиційних заходів з підсилення контактної мережі постійного струму вичерпані, тому в умовах подальшого зростання струмових навантажень зазначені заходи не забезпечують якісного та ефективного функціонування системи тягового електропостачання постійного струму [2].

Відомо також, що зі зростанням струму в мережі суттєво зростає шкідливий електромагнітний вплив системи тягового електропостачання постійного струму на суміжні електроустановки, у тому числі сучасні системи керування електричного рухомого складу та лінії залізничної автоматики, сигналізації і зв'язку [2, 3]. До сьогодні завдання придушення гармонік випрямленої напруги і струму мережі вирішували з використанням пасивних аперіодичних і резонансних *LC* фільтрів на виході перетворювального агрегату (ПА) тягової підстанції, що в умовах широкого використання мікропроцесорної техніки в системах керування та автоматики виявилось недостатньо ефективним. Застосування перетворювачів електричної енергії на основі керованих двоопераційних

напівпровідникових приладів створює умови для розроблення та впровадження нових енергоефективних систем тягового електропостачання постійного струму, які мають забезпечувати необхідні показники якості електричної енергії та електромагнітну сумісність із суміжними електроустановками [2, 3].

Аналіз останніх досліджень та публікацій. У ряді робіт [3-5] запропоновано застосовувати в складі ПА тягових підстанцій реверсивні вольтододаткові перетворювачі на базі трифазних випрямлячів напруги з широтно-імпульсною модуляцією для підвищення якості електричної енергії постійного струму та поліпшення електромагнітної сумісності системи тягового електропостачання з суміжними електроустановками. Крім виконання цих завдань, такий вольтододатковий перетворювач з застосуванням основної тиристорної випрямно-інверторної установки ПА може забезпечувати досить якісне повернення рекуперованої електричним рухомим складом енергії до зовнішньої трифазної мережі. Якщо ж на тяговій підстанції використовують накопичувачі такої енергії, а від ПА не потрібна реалізація функції повернення рекуперованої енергії до зовнішньої мережі, то можна застосовувати простіший за будовою активний фільтр-стабілізатор (АФС) на базі однофазної мостової схеми перетворювача з ємнісним накопичувачем енергії [2, 6-8].

На сьогодні відсутні приклади використання обох варіантів згаданих вище перетворювачів у складі ПА тягових підстанцій системи тягового електропостачання постійного струму, що в першу чергу пов’язано зі складністю їхньої конструкції та високою вартістю. Особливо це стосується реверсивного вольтододаткового перетворювача, силова частина якого має схему трифазного мостового випрямляча напруги, де застосовано шість потужних двоопераційних швидкодіючих ключів із знакозмінною напругою на базі *IGBT*. Що стосується АФС з ємнісним накопичувачем енергії, то він може бути реалізований на базі досить простої структури широтно-імпульсного перетворювача понижувального типу. Така реалізація силової частини забезпечить значне спрощення конструкції АФС і знизить вартість впровадження їх на тягових підстанціях системи тягового електропостачання постійного струму.

Визначення мети та задач дослідження. Метою роботи є дослідження ПА з АФС на базі широтно-імпульсного перетворювача понижувального типу. Основні завдання дослідження:

- синтезувати схему та алгоритм керування АФС на базі структури широтно-імпульсного перетворювача понижувального типу;
- перевірити працездатність і показники якості електричної енергії постійного струму ПА з АФС на базі структури широтно-імпульсного перетворювача понижувального типу.

Основна частина. Запропонована схема ПА тягової підстанції з дванадцятипульсною основною випрямною установкою ОВУ та послідовно приєднаним широтно-імпульсним перетворювачем із ємнісним накопичувачем енергії $C_н$, що є спрощеною версією АФС, наведена на рис. 1.

Як видно зі схеми (рис. 1), до складу широтно-імпульсного перетворювача АФС входять керований двоопераційний ключ *VT* на базі *IGBT* і некерований діодний ключ *VD*. Для формування вихідної напруги АФС використовує енергію постійного струму ємнісного накопичувача енергії $C_н$. Як і в попередньому варіанті силової структури АФС [6, 7], для забезпечення необхідної напруги постійного струму на ємнісному накопичувачі енергії $U_{Cн}$ передбачений трифазний мостовий випрямляч заряду ВЗ. На виході ПА застосований полегшений порівняно зі стандартним для ПА з дванадцятипульсною випрямною установкою пасивний аперіодичний *LC* фільтр.

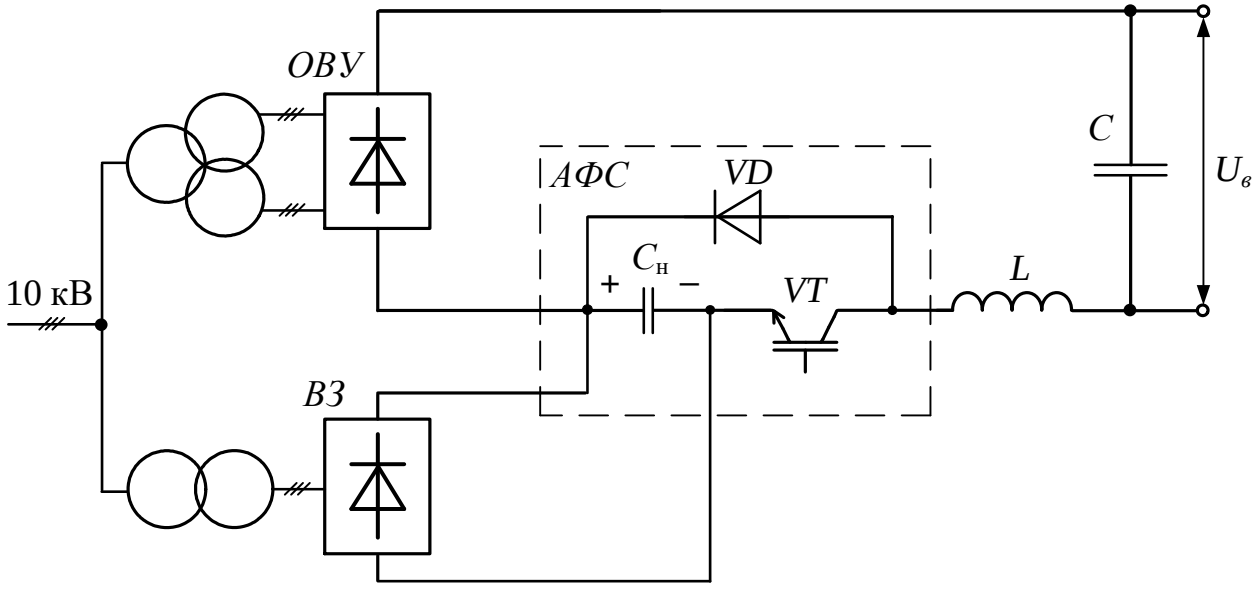


Рис. 1. Схема перетворювального агрегату з АФС на базі широтно-імпульсного перетворювача

Система керування АФС та силові елементи схеми утворюють замкнену систему автоматичного регулювання, яка забезпечує активну фільтрацію і стабілізацію вихідної напруги підстанції. Подібно до описаної в роботах [2, 6] системи для компенсації пульсацій (активної фільтрації) випрямленої ОВУ напруги u_d і підтримання стабільного значення вихідної напруги підстанції $U_в$ має формуватися напруга $u_{аг}$ (рис. 2).

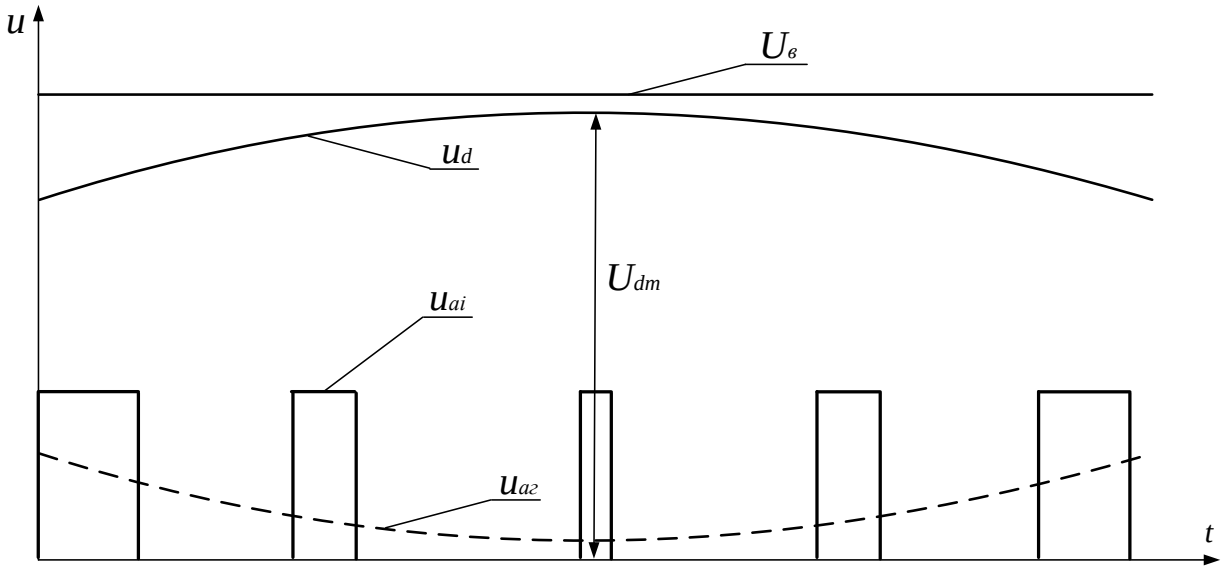


Рис. 2. Діаграми напруги перетворювального агрегату з АФС на базі широтно-імпульсного перетворювача

Для того щоб отримати таку напругу компенсації відповідної форми та амплітуди на вихідному конденсаторі *LC* фільтра, АФС генерує імпульсну напругу u_{ai} з підвищеною частотою широтно-імпульсної модуляції. При цьому імпульси напруги u_{ai} мають лише позитивну полярність, бо з використанням структури широтно-імпульсного перетворювача понижувального типу неможливо формувати імпульси негативної полярності. Саме в цьому є принципова відмінність роботи широтно-імпульсного перетворювача АФС порівняно з варіантом, виконаним за схемою однофазного мосту [6, 7]. Зрозуміло, що через неможливість формування імпульсів негативної полярності при застосуванні АФС на базі широтно-імпульсного перетворювача для формування напруги компенсації $u_{аг}$ потрібно, щоб значення вихідної напруги $U_в$ (рис. 2) було не менше амплітудного значення випрямленої напруги U_{dm}.

Щодо системи керування АФС на базі широтно-імпульсного перетворювача, то вона може бути досить просто реалізована (рис. 3) як замкнена система автоматичного регулювання вихідної напруги ПА. Датчик вихідної напруги ДВН, що забезпечує гальванічну розв'язку системи керування та силової схеми, передає сигнал про постійну та змінну складові вихідної напруги перетворювального агрегату. Від датчика сигнал $u_в$ поданий як сигнал негативного зворотного зв'язку за напругою для порівняння з сигналом завдання $u_з$ на вході регулятора напруги РН, який формує сигнал керування $u_к$. Імпульси керування $u_{кт}$ транзисторним ключем широтно-імпульсного перетворювача ШІП АФС виробляє широтно-імпульсний модулятор ШІМ.

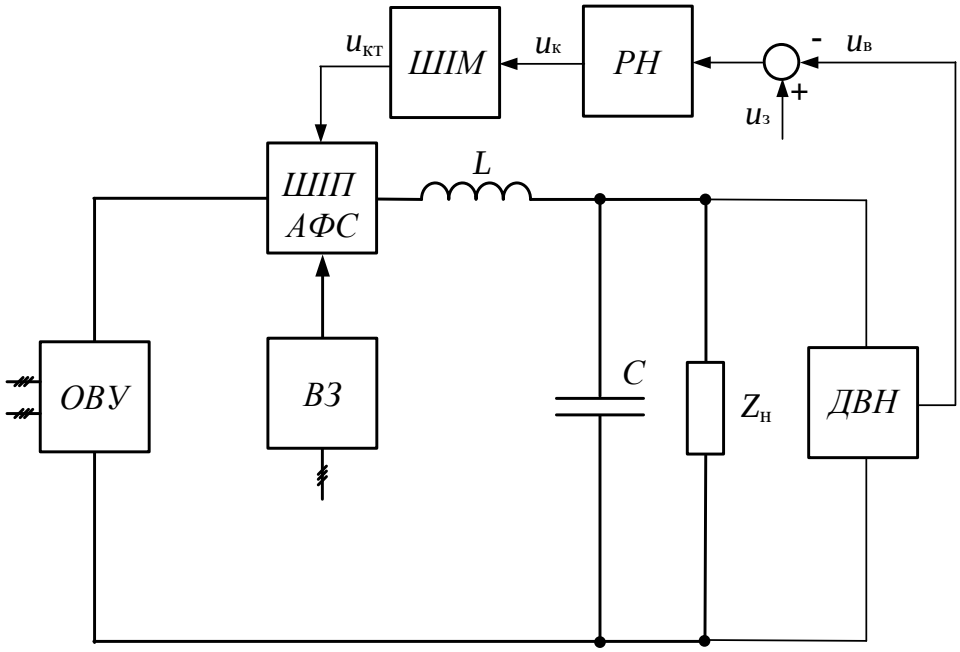


Рис. 3. Замкнена система автоматичного регулювання вихідної напруги перетворювального агрегату з АФС на базі широтно-імпульсного перетворювача

У роботі [9] у результаті аналізу динамічних характеристик була розроблена імпульсна модель мостової схеми перетворювача напруги АФС з двобічною широтно-імпульсною модуляцією, яка може бути використана для аналізу динамічних

властивостей широтно-імпульсного перетворювача АФС. Такий висновок ґрунтований на значній схожості принципу дії в обох варіантах реалізації АФС і застосуванні одного типу широтно-імпульсної модуляції. Відповідно співпадають узагальнена еквівалентна схема попереднього мостового варіанта перетворювача (рис. 4), за якою аналізували динамічні характеристики в роботі [9], та узагальнена еквівалентна схема АФС на базі широтно-імпульсного перетворювача (рис. 4).

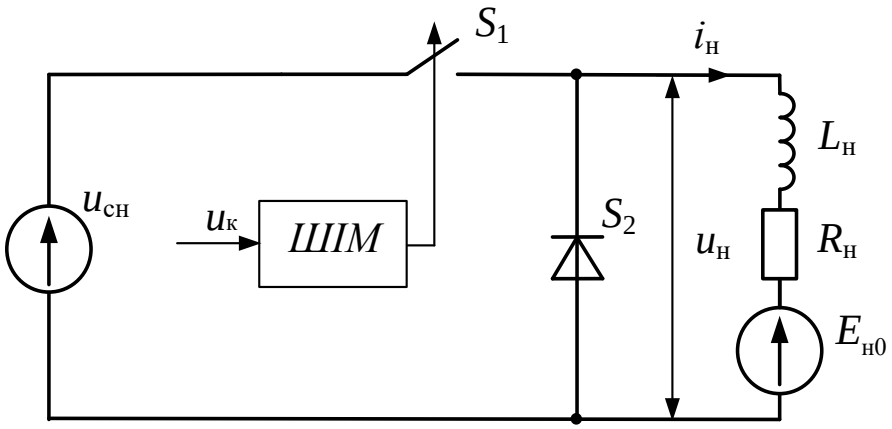


Рис. 4. Узагальнена еквівалентна схема перетворювача АФС з широтно-імпульсною модуляцією

Із використанням імпульсної моделі перетворювача в роботі [10] було синтезовано передавальну функцію регулятора напруги перетворювача АФС, яка може бути записана рівнянням

$$G(p)=\frac{T_2^2p^2+2\mu T_2p+1}{T_1p}, \qquad (1)$$

де T_1, T_2 – постійні часу передавальної функції регулятора;

μ – коефіцієнт демпфування.

Щоб забезпечити реалізацію в замкненій системі автоматичного регулювання ПА тягової підстанції процесів кінцевої тривалості [10], параметри передавальної функції регулятора напруги визначають за формулами

$$T_1=K_0K_1TF_1; \qquad (2)$$

$$T_2=T_\phi\sqrt{1+K_0K_1F_2\frac{T}{T_1}}; \qquad (3)$$

$$\mu=a(T_2^2-T_\phi^2)T_\phi\frac{\frac{F_1}{F_2}-1+e^{\alpha\gamma T}\left(\frac{T_2^2}{T_\phi^2}+1\right)\left[\cos\gamma\beta T+\frac{\xi}{a}\cdot\frac{T_2^2+T_\phi^2}{T_2^2-T_\phi^2}\sin\gamma\beta T\right]}{2T_2(T_2^2+T_\phi^2)\cdot\sin\gamma\beta T}\left(1+K_0K_1F_2\frac{T}{T_1}\right), \qquad (4)$$

де K_0 – статичний коефіцієнт передачі;

K_1 – коефіцієнт передачі ланцюга звортного зв'язку;

T – тривалість періоду широтно-імпульсної модуляції;

F_1, F_2 – фактори пульсацій;

γ – відносна тривалість вихідного імпульсу широтно-імпульсної модуляції;

$$\alpha = \frac{\xi}{T_ф}; \quad \beta = \frac{\sqrt{1-\xi^2}}{T_ф}; \quad a = \sqrt{1-\xi^2};$$

$T_ф = \sqrt{LC}$ – постійна часу пасивного фільтра;

$$\xi = \frac{1}{2Z_н(p)} \cdot \sqrt{\frac{L}{C}}$$ – коефіцієнт демпфування пасивного фільтра.

З урахуванням наведених вище аргументів можна стверджувати, що рівняння передавальної функції (1) дає нам змогу оптимізувати вибір параметрів регулятора напруги, який забезпечить реалізацію процесів кінцевої тривалості в замкненій системі автоматичного регулювання ПА тягової підстанції з АФС на базі широтно-імпульсного перетворювача.

Для перевірки працездатності АФС на базі широтно-імпульсного перетворювача понижувального типу у складі ПА розроблено *MatLab* модель, яка наведена на рис. 5.

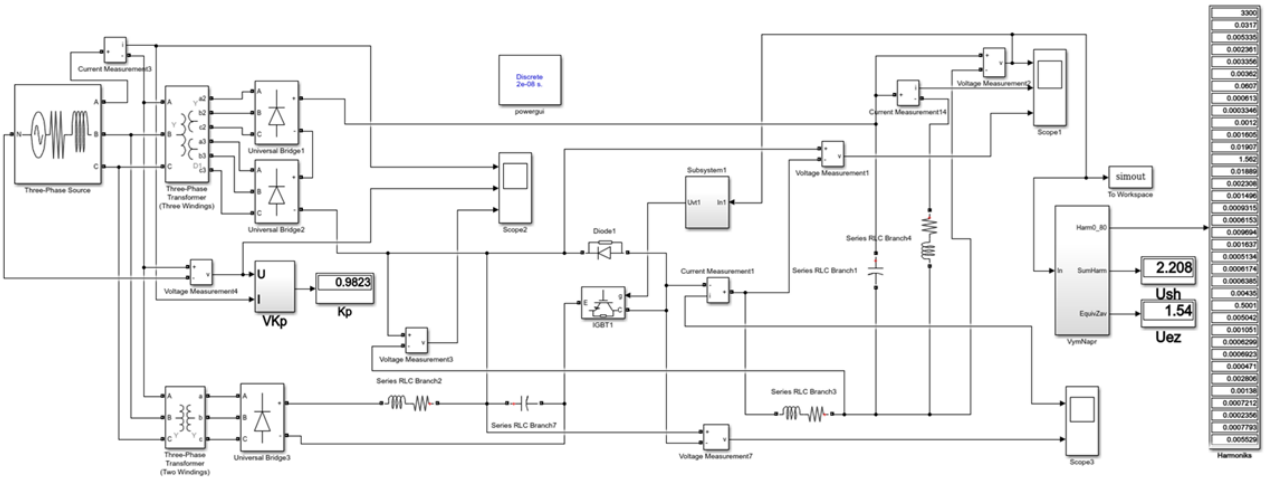


Рис. 5. Модель ПА з АФС на базі широтно-імпульсного перетворювача

У складі моделі ПА з АФС (рис. 5) застосовано елементи, що моделюють функції ОВУ *Universal Bridge* 1, *Universal Bridge* 2 і ВЗ *Universal Bridge* 3 ємнісного накопичувача енергії *Series RLC Branche* 7. Блок *Subsystem* 1 виробляє сигнал керування $u_{кт}$, за яким широтно-імпульсний перетворювач АФС, зібраний на транзисторному *IGBT* 1 і діодному *VD* 1 ключах, формує напругу компенсації для стабілізації середнього значення і подавлення змінної складової вихідної напруги на конденсаторі фільтра *Series RLC Branche* 1. Блок *VKp* визначає коефіцієнт потужності моделі ПА для роботи від трифазного джерела енергії змінного струму *Three-Phase Source* напругою 10 кВ.

Для аналізу основних показників якості електричної енергії постійного струму блок *VymNapr* виконує швидке перетворення Фур'є (*FFT* аналіз) вихідної напруги моделі ПА. Далі постійна складова

вихідної напруги і діюче значення гармонік частотами, кратними промисловій частоті 50 Гц, відображує блок *Harmoniks*, а також визначає результуюче середньоквадратичне значення цих гармонік (від першої до вісімдесятої) вихідної напруги *Ush* і значення еквівалентної заважальної напруги *Uez*. Як бачимо з рис. 5, постійна складова вихідної напруги складає 3300 В, що є заданим номінальним значенням. Еквівалентна заважальна напруга 1,54 В, що враховує можливість електромагнітної сумісності системи тягового електропостачання постійного струму із суміжними електроустановками, суттєво нижче допустимого значення, яке дорівнює 4 В [2].

Ці результати підтверджують отримані під час дослідження осцилограми вихідної напруги (рис. 6, а) і струму (рис. 6, б) моделі ПА з АФС на базі широтно-імпульсного перетворювача.

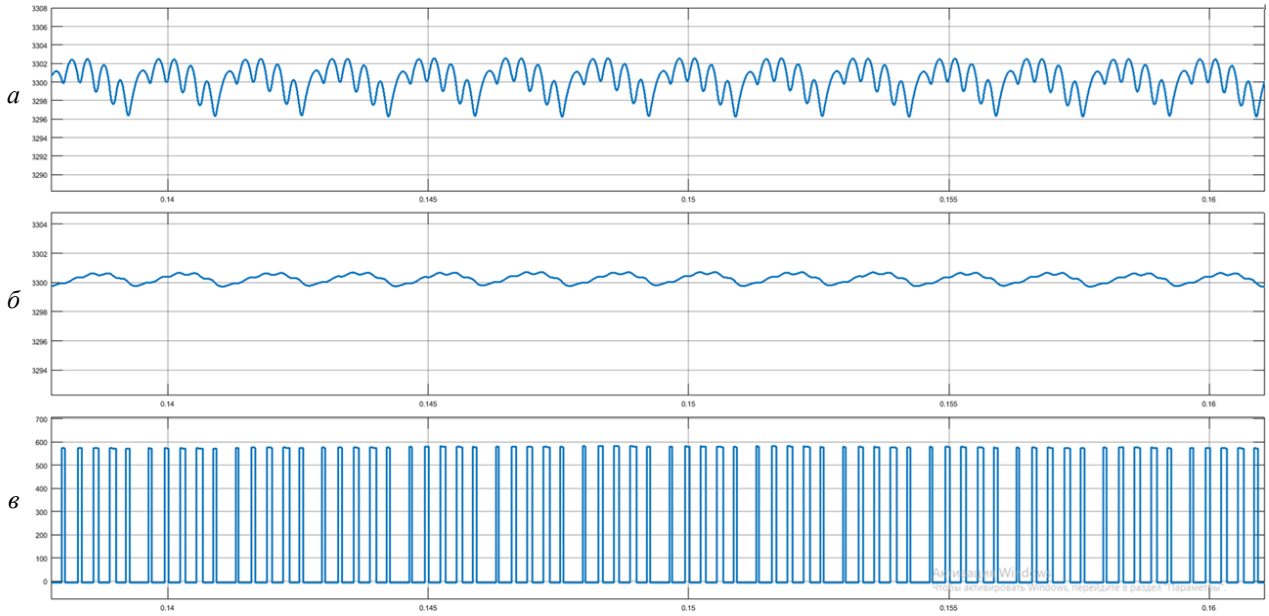


Рис. 6. Осцилограми вихідної напруги (а), струму (б) ПА, вихідної напруги АФС на базі широтно-імпульсного перетворювача (в)

Висновки. Синтезовано схему та алгоритм керування АФС на базі структури широтно-імпульсного перетворювача понижувального типу, яка має зменшену кількість швидкодіючих напівпровідникових ключів, що зменшує втрати енергії та вартість. Перевірено працездатність АФС на базі структури широтно-імпульсного перетворювача понижувального типу в складі ПА тягової підстанції, яка підтвердила досить високі показники якості електричної енергії та забезпечення електромагнітної сумісності системи тягового електропостачання постійного струму із суміжними електроустановками.

Список використаних джерел

1. Правила улаштування системи тягового електропостачання залізниць України. № ЦЕ-0009. Київ: ТОВ «Швидкий рух», 2005. 80 с.

2. Семененко Ю. О. Стабілізуючі силові активні фільтри для підвищення ефективності тягового електропостачання постійного струму: дис. … канд. техн. наук: 05.22.09. Харків, 2017. 207 с.

3. Панасенко М. В., Гончаров Ю. П., Сиченко В. Г. Проблеми електромагнітної сумісності підсистем електричної тяги постійного струму і використання засобів силової електроніки для їх вирішення. *Електротехніка та електроенергетика*. 2009. № 2. С. 22-28.

4. Обратимый преобразователь вольтодобавочного типа для тяговых подстанций электрифицированных железных дорог / Н. В. Панасенко, В. В. Божко, Ю. П. Гончаров и др. *Залізничний транспорт України*. 2007. № 4. С.76–80.

5. Гончаров Ю. П., Панасенко М. В., Божко В. В. Тяговий випрямляч з реверсивним вольтододатком на двоопераційних напівпровідникових приладах. Київ: Технічна електродинаміка. Інститут електродинаміки НАН України, 2008. Ч. 2. С. 16-21.

6. Семененко Ю. А. Стабилизация и активная фильтрация выпрямленного напряжения в замкнутой структуре. *Збірник наукових праць УкрДУЗТ*. 2016. Вип. 166. С. 131-140.

7. Семененко О. І., Семененко Ю. О. Активний фільтр-стабілізатор для випрямної установки тягової підстанції. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. Харків: УкрДУЗТ, 2016. № 4(119). С. 29-33.

8. Застосування активних фільтрів-стабілізаторів у розподіленій системі електропостачання / О. І. Семененко, О. Д. Супрун, Ю. О. Семененко, М. М. Одєгов. *Електрифікація транспорту*. 2018. № 15. С. 61-67.

9. Shcherbak Ya., Semenenko Yu., Semenenko O. Analysis of dynamic characteristics of the active filter-stabilizer. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. № 2/8(86). P. 10-15.

10. Shcherbak Y., Semenenko Y., Semenenko O., Karpenko N., Suprun O., Plakhtii O., Nerubatskyi V. Synthesis of the transfer function of the voltage controller in an active filter-stabilizer converter. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. № 2 (2 (110)). P. 71-77.

Семененко Олександр Іванович, кандидат технічних наук, доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Український державний університет залізничного транспорту.
ORCID iD: https://orcid.org/0000-0001-8885-6783. Тел.: (057) 730-10-74. E-mail: semenoi@i.ua.
Семененко Юрій Олександрович, кандидат технічних наук, доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Український державний університет залізничного транспорту.
ORCID iD: https://orcid.org/0000-0001-9422-3528. E-mail: semenenko_jo@kart.edu.ua.
Семененко Ольга Діонісівна, асистент кафедри теоретичної механіки, машинознавства та роботомеханічних систем, Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут».
ORCID iD: https://orcid.org/0009-0001-8425-562X. E-mail: o.semenenko@khai.edu.

Semenenko Oleksandr, PhD (Tech), Associate Professor, department of Electrical Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport.
ORCID iD: https://orcid.org/0000-0001-8885-6783. Tel.: (057) 730-10-74. E-mail: semenoi@i.ua.
Semenenko Yurii, PhD (Tech), Associate Professor, department of Electrical Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport.
ORCID iD: https://orcid.org/0000-0001-9422-3528. E-mail: semenenko_jo@kart.edu.ua.
Semenenko Olha, Assistant of the Department of Theoretical Mechanics, Machine Science and Robotic Systems, National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute». ORCID iD: https://orcid.org/0009-0001-8425-562X. E-mail: o.semenenko@khai.edu.

Статтю прийнято 30.06.2025 р.

УДК 656.2: 621.3: 614.8

ФУНДАМЕНТАЛЬНІ НЕДОЛІКИ БАЗОВИХ МОДЕЛЕЙ НЕБЕЗПЕЧНИХ ВІДМОВ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ БЕЗПЕКИ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ РУХОМ ПОЇЗДІВ

Канд. техн. наук В. Ф. Кустов

FUNDAMENTAL LIMITATIONS OF BASIC DANGEROUS FAILURE MODELS FOR FUNCTIONAL SAFETY ASSESSMENT IN TRAIN CONTROL SYSTEMS

PhD (Tech.) V. F. Kustov

DOI: https://doi.org/10.18664/1994-7852.212.2025.336537

Анотація. *У статті досліджено поширену практику застосування експоненціального закону розподілу небезпечних відмов для оцінювання ризику в системах керування рухом поїздів. Наведено основні фізичні ознаки старіння компонентів систем залізничної автоматики, що призводять до суттєвої похибки в разі використання експоненціальних моделей для розрахунків нормативних показників функціональної безпеки. Показано, що у випадку реальних систем з іншими законами розподілу відмов, особливо за довготривалої експлуатації (більше 10 років), таке спрощене обчислення призводить до багатократних прорахунків в оцінюванні функціональної безпеки і, як наслідок, недопустимого зниження безпеки руху поїздів. Як доказ функціональної безпеки пропоновано використовувати інші закони розподілу небезпечних відмов або на етапі допуску в експлуатацію враховувати в розрахунках реальне підвищення інтенсивності небезпечних відмов елементів внаслідок їх старіння в жорстких умовах експлуатації систем залізничної автоматики.*

Ключові слова: *безпека руху поїздів, експоненціальний закон, небезпечні відмови, недооцінювання ризику безпеки, розподіл небезпечних відмов, системи керування рухом поїздів, функціональна безпека, SIL(інтегральний рівень безпеки).*

Abstract. *The article examines the widespread practice of using the exponential distribution law for modeling hazardous failures in risk assessment of railway traffic control systems. It outlines key physical signs of aging in components of railway automation systems, which can lead to significant errors when exponential models are applied to calculate the normative indicators of functional safety. It is demonstrated that in real systems with alternative failure distributions—particularly under long-term operation (over 10 years)—such simplified calculations result in multiple misestimations of functional safety, ultimately leading to unacceptable reductions in railway traffic safety. To justify functional safety, the article recommends the use of other hazardous failure distribution laws or, during the commissioning phase, the inclusion of actual increases in failure intensity caused by aging under harsh operating conditions typical for railway automation systems.*

Keywords: *train traffic safety, exponential distribution, dangerous failures, underestimation of safety risk, distribution of dangerous failures, train control systems, functional safety, SIL (Safety Integrity Level).*

Вступ. Розрахунок імовірності небезпечної відмови є основним етапом у забезпеченні функціональної безпеки критичних систем, у тому числі систем керування рухом поїздів. Найбільш розповсюдженим для розрахунку на практиці є використання експоненціального закону розподілу небезпечних відмов, але в

багатьох реальних випадках такий розподіл має іншу форму: із піком на середині життєвого циклу, або з ефектом зношування. У таких ситуаціях застосування експоненціального закону може призвести до критичного недооцінювання ризику відповідальних систем автоматизації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Розробленню методів нормування і встановлення вимог щодо функціональної безпеки систем керування рухом поїздів присвячені роботи [1, 2]. Питання вдосконалення методів оцінювання функціональної безпеки систем залізничної автоматики в умовах наявності кратних небезпечних відмов у каналах резервування розглянуто в роботі [3]. Результати досліджень математичних моделей функціональної безпеки та безвідмовності відновлюваних технічних засобів за різних способів резервування наведено в роботах [4, 5]. Особливості забезпечення функціональної безпеки мікропроцесорних систем керування і контролю на залізничному транспорті висвітлено в дослідженні [6]. Теоретичні основи надійності та функціональної безпеки систем залізничної автоматики детально розглянуті в роботі [7]. Базові питання стандартизації функціональної безпеки в Україні наведено в публікаціях [8–10], а міжнародний досвід – у роботах [11, 12].

У світовій практиці найпоширенішим підходом для оцінювання функціональної безпеки є використання експоненціальної моделі розподілу часу до небезпечної відмови елементів і каналів резервування. Проте в умовах реальної експлуатації, особливо із застосуванням сучасних мікроелектронних компонентів високої якості, відмови часто мають інший характер розподілу. Через це в останніх версіях міжнародних стандартів [11, 12] наголошено на необхідності обережного використання експоненціальних моделей, хоча конкретних прикладів помилок чи недооцінювання ризику через їх застосування не наведено. Це зумовлює потребу в критичному оцінюванні достовірності математичних моделей розподілу небезпечних відмов, які є основою для визначення рівня функціональної безпеки. Очевидно, що точність таких оцінок, безпосередньо пов’язаних із ризиком виникнення аварій і катастроф на залізничному транспорті, має як велике наукове, так і практичне значення.

Визначення мети та завдання дослідження. Метою дослідження є оцінювання достовірності різних математичних законів розподілу часу до небезпечних відмов, що застосовують для розрахунку функціональної безпеки, порівняно з базовим експоненціальним законом, який найчастіше використовуваний і регламентований чинними стандартами.

У межах дослідження передбачено виконання таких завдань:

- проаналізувати особливості застосування експоненціального закону у стандартах функціональної безпеки;
- порівняти результати розрахунку імовірностей небезпечних відмов за експоненціальним і альтернативними законами розподілу;
- визначити потенційні похибки (недооцінювання або переоцінювання) рівня функціональної безпеки з використанням неадекватної моделі розподілу;
- сформулювати рекомендації щодо доцільності застосування певних законів розподілу залежно від типу елементів, умов експлуатації та етапу життєвого циклу.

Результати роботи можуть бути використані для удосконалення методик обґрунтування функціональної безпеки систем залізничної автоматики з урахуванням реальних характеристик відмов технічних засобів.

Метою статті є оцінювання достовірності різних законів розподілу небезпечних відмов для розрахунку функціональної безпеки порівняно з

базовим експоненціальним законом, який частіше за все використовуваний і регламентований стандартами з функціональної безпеки, а також дослідження недооцінки і переоцінки розрахунку ймовірностей небезпечних відмов у разі використання інших законів розподілу відмов відносно базового експоненціального закону.

Основна частина дослідження

1. Порівняльний аналіз щільностей імовірностей небезпечних відмов для експоненціального, нормального та вейбуллівського законів розподілу

Щільність імовірності небезпечних відмов (щільність розподілу часу до небезпечної відмови) дає змогу визначити ймовірність виникнення такої відмови протягом будь-якого інтервалу часу експлуатації системи. Геометрично це відповідає площі під кривою функції щільності в межах заданого цього інтервалу. Крім того, на її основі визначають функцію ризику – інтенсивність небезпечних відмов у часі $\lambda(t)$.

Розуміння форми розподілу часу до небезпечної відмови є основним для врахування у функціональній безпеці таких аспектів:

- розрахунок імовірності виникнення небезпечної відмови в будь-яку годину експлуатації (PFH – Probability of Dangerous Failure per Hour) відповідно до вимог міжнародних і європейських стандартів;
- визначення необхідного рівня функціональної безпеки (SIL1–SIL4) на основі отриманого значення PFH;
- моделювання сценаріїв небезпечних відмов, що можуть призвести до втрати безпечної функції у відповідальних системах автоматизації.

За стандартами [10-12], нормативне значення PFH визначають як середнє значення щільності ймовірності небезпечних відмов. Для експоненціального закону розподілу, який найчастіше використовуваний в інженерній практиці, PFH наближено дорівнює λ за умови малих значень добутку λt ($\lambda t < 0{,}1$). У таких умовах це наближення вважають допустимим, і воно навіть дає певний запас безпеки для оцінювання ризику.

Порівняльний аналіз щільностей імовірностей відмов дає змогу:

- ідентифікувати часові ділянки з максимальною ймовірністю виникнення небезпечної відмови (так звану «зону підвищеного ризику»);
- ухвалювати обґрунтовані рішення про періодичне технічне обслуговування, своєчасну заміну компонентів або модернізацію систем;
- виявити потенційні недоліки у використанні типового (експоненціального) підходу для моделювання відмов для систем із реальною статистикою деградації.

Для досліджень вибрано закони розподілу $f(t)$ із приблизно однаковими значеннями середнього наробітку до небезпечної відмови і відповідними параметрами (рис. 1):

- експоненціальний:

$\lambda = 1/100\,000$ 1/год;

- нормальний розподіл:

$\mu = 100\,000$ год, $\sigma = 20\,000$ год;

- Вейбулла: $\beta = 2$, $\eta = 113\,000$ год.

Аналіз форми розподілу щільностей розподілу небезпечних відмов уже на якісному рівні дає змогу дійти висновку про ймовірності появи небезпечних відмов за будь-який поточний час експлуатації чи будь-який інтервал періодичного контролю чи часу експлуатації. За рис. 1, імовірність небезпечних відмов для експоненціального закону розподілу найбільша на ранніх етапах експлуатації і зменшується з часом, що не завжди відповідає реальним умовам. Інші закони розподілу враховують старіння і знос і мають піки імовірностей відмов. Для кількісного оцінювання ризику прорахунку функціональної безпеки (недооцінювання/переоцінювання) проведемо більш ретельний теоретичний аналіз.

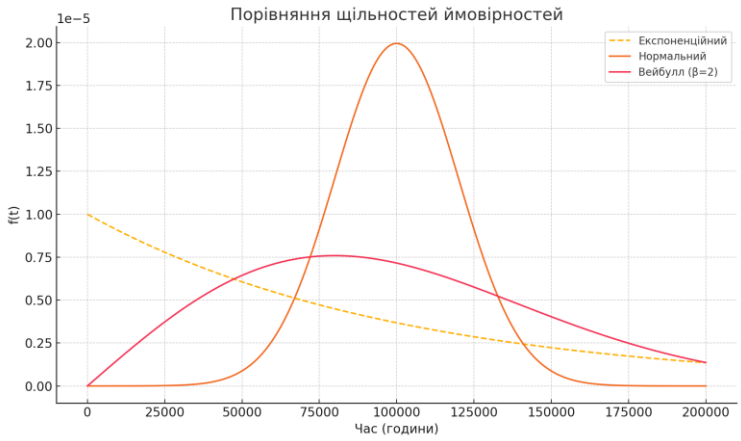


Рис. 1. Порівняння щільностей розподілу небезпечних відмов

2. Визначення коефіцієнтів недооцінювання ризику прорахунку функціональної безпеки для різних законів розподілу небезпечних відмов

Для кількісного аналізу для кожної моделі визначено ймовірність небезпечних відмов на рівних інтервалах часу та обчислено коефіцієнт недооцінювання ризику (Ratio), яке дорівнює відношенню значень щільності небезпечних відмов «істинних» розподілів до експоненціального закону: Ratio(t) = f_true(t) / f_exp(t). Відповідні графіки наведено на рис. 2.

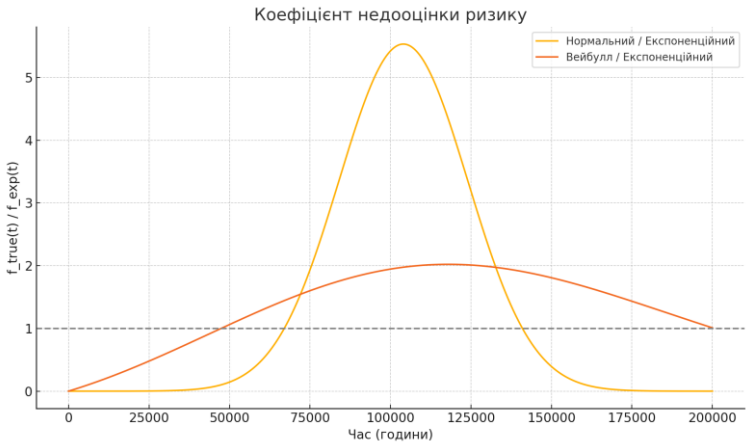


Рис. 2. Коефіцієнти недооцінювання ризику (Ratio) заміни існуючих законів розподілів небезпечних відмов на експоненціальний закон

Коефіцієнт відношення ймовірностей небезпечної відмови, отриманих за різними законами розподілу, до значень, розрахованих за експоненціальним законом (із припущенням сталої інтенсивності відмов), дає змогу кількісно оцінити ступінь спрощення та пов’язану з ним похибку у визначенні ризику. Це дає змогу виявити кратність недооцінювання, що виникає внаслідок застосування базового експоненціального припущення.

Аналіз графіків на рис. 2 показує, що найбільше недооцінювання ризику – чотиришість разів – спостерігають для «істинного» нормального закону розподілу в середній частині інтервалу експлуатації системи. Це означає, що практично протягом третини терміну служби виникає суттєвий прорахунок у визначенні ймовірності небезпечної відмови. Для розподілу Вейбулла така похибка є меншою, але все ж таки значною – до двох разів – у проміжку до 75 % часу експлуатації (тобто переважну частину життєвого циклу системи).

З огляду на значну кратність недооцінювання ризику (від двох до шести разів), було проведено додаткові розрахунки для ширшого діапазону параметрів і розглянуто інші реально застосовувані закони розподілу небезпечних відмов у системах автоматизації:

- експоненціальний розподіл – для компонентів зі сталою інтенсивністю відмов;
- розподіл Вейбулла – для моделювання зростаючого або спадного ризику з часом;
- гамма-розподіл – для складних сценаріїв із кількома стадіями зношування (використовуваний рідше);
- нормальний розподіл – застосовують у випадках оцінювання середнього часу безвідмовної роботи. Однак у контексті моделювання часу до небезпечних відмов він є менш реалістичним. Відповідно до центральної граничної теореми, за великої кількості незалежних факторів впливу загальний розподіл наближатиметься до нормального. Проте, за рекомендаціями [12], використання нормального розподілу для оцінювання рівнів SIL (SIL1–SIL4) є недоцільним.

Дослідження проводили для типового терміну служби систем автоматизації — 10–20 років, із середнім часом до небезпечної відмови в межах 100 000 – 150 000 годин. Було порівняно:

- розподіли Вейбулла з параметрами $\beta = 1.5; 2.0; 3.0$ (що моделюють зростання ризику з часом);
- гамма-розподіли з параметрами $\alpha = 2; 3$ і відповідними значеннями β;
- нормальні розподіли з різними стандартними відхиленнями σ = 10 000; 20 000; 30 000 год.

На рис. 3 наведено узагальнені коефіцієнти недооцінювання або переоцінювання ризику для різних законів розподілу, подані у вигляді графіків відносних значень (Ratio).

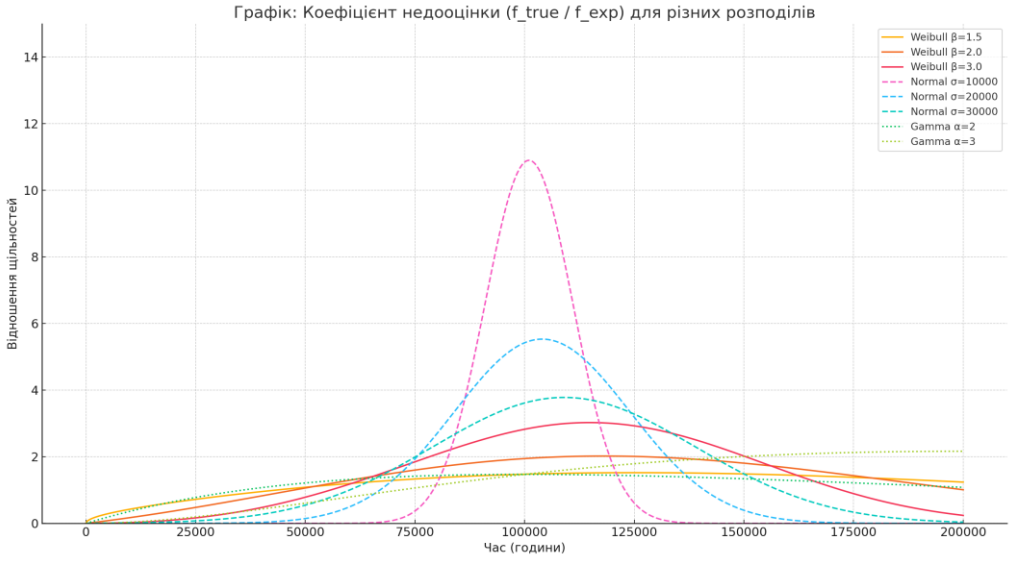


Рис. 3. Коефіцієнти недооцінювання ризику заміни різних («істинних») законів розподілів небезпечних відмов на експоненціальний закон

Для аналізу недооцінювання ймовірностей небезпечних відмов використовуємо відношення ймовірностей небезпечних відмов «істинного» закону розподілу до експоненціального (інтервальні коефіцієнти недооцінювання). Результати досліджень наведено на рис. 4.

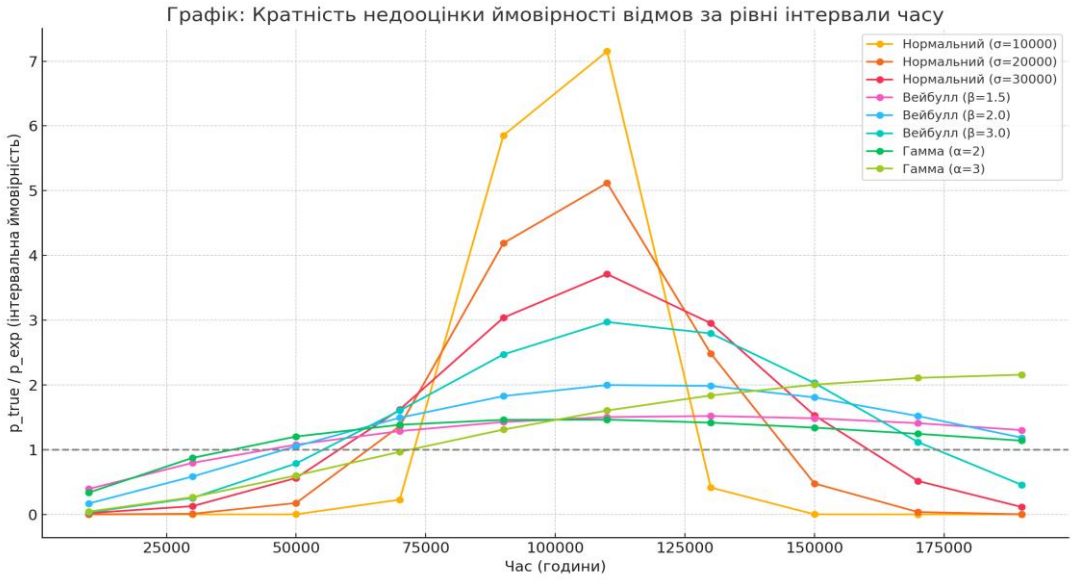


Рис. 4. Залежність недооцінювання ймовірностей небезпечних відмов для різних законів розподілу

3. Аналіз похибок оцінювання функціональної безпеки з використанням експоненціального закону

Результати дослідження показали таке:

- нормальний розподіл: за ширших розподілів (σ > 20 000 год) недооцінювання ризику за експоненціальною моделлю поширюється на довший інтервал експлуатації. Водночас максимальне недооцінювання ризику спостерігають у випадку вузьких нормальних розподілів із малим стандартним відхиленням (до п’яти-семи разів);
- розподіл Вейбулла, який є найбільш придатним для опису процесів деградації в системах залізничної автоматики, – недооцінювання імовірності небезпечної відмови за експоненціальним законом проявляється вже після першої третини життєвого циклу;
- гамма-розподіл з α = 3, що моделює багатофазне зношування, демонструє зсув піку ризику до завершальної фази експлуатації, унаслідок чого критичне недооцінювання ризику виникає саме в передаварійній зоні;
- середня похибка в розрахунку функціональної безпеки протягом 20-річного життєвого циклу з помилковим використанням експоненціального закону замість розподілу Вейбулла або гамма-розподілу може перевищувати нормативний рівень майже на порядок.

У табл. 1 подано характерні приклади похибок оцінювання ризику, що виникають з некоректним застосуванням експоненціального закону розподілу небезпечних відмов.

Таблиця 1

Оцінювання ризику з хибним застосуванням експоненціального закону розподілу небезпечних відмов

Реальний розподіл	**Поведінка ризику**	**Помилка з заміною на експоненціальний**
Нормальний	Пік у середині	Недооцінювання в чотири-шість разів у центрі
Вейбулла (β > 1)	Старіння	Недооцінювання в середині і наприкінці ресурсу
Вейбулла (β < 1)	«Дитячі хвороби»	Переоцінювання на початку
Експоненціальний	Сталий ризик	-

Отже, навіть використовуючи моделі, які формально дозволені чинними стандартами з функціональної безпеки, надзвичайно важливим є обґрунтований вибір адекватного закону розподілу. Експоненціальний закон є лише окремим випадком розподілу Вейбулла за умови β = 1, тому будь-яке спрощення моделі до припущення постійної інтенсивності без належної валідації є методологічно помилковим.

Проведене моделювання показало, що найбільшу похибку серед усіх розглянутих випадків дає невиправдана заміна нормального розподілу експоненціальним. У таких випадках імовірність небезпечної відмови може бути недооцінена майже на порядок, особливо зі зменшенням стандартного відхилення, що призводить до втрати достовірності розрахунків.

Окремо було проаналізовано сценарій із дуже малим стандартним відхиленням (σ = 1000 год), який відповідає високій повторюваності терміну служби – типовій для чітко контрольованих і масово протестованих систем. У цьому випадку ймовірність відмови різко концентрується поблизу середнього значення, що ще раз підтверджує невідповідність експоненціальної моделі реальним характеристикам.

На рис. 5 подано графік порівняння щільностей імовірностей відмов f_true (нормальний розподіл) і f_exp (експоненціальний розподіл) для вузького нормального випадку. На рис. 6 наведено графік інтервального відношення p_true / p_exp (оцінювання кратності недооцінювання) для нормального розподілу зі σ = 1000 год.

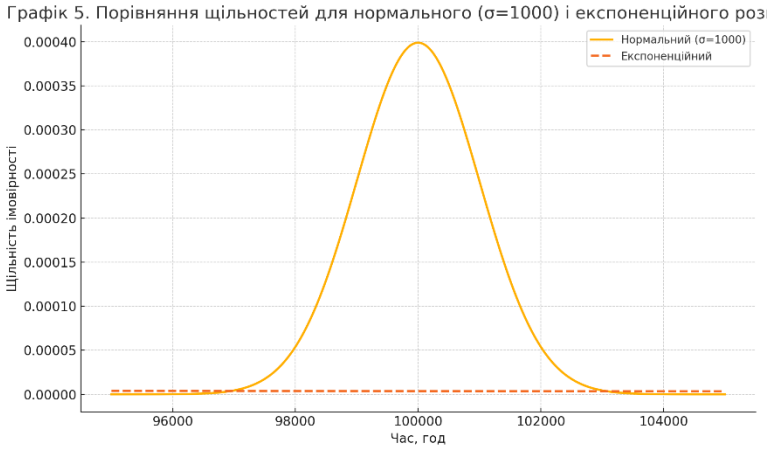


Рис. 5. Недооцінювання експоненціального розподілу у випадку нормального закону зі σ = 1000

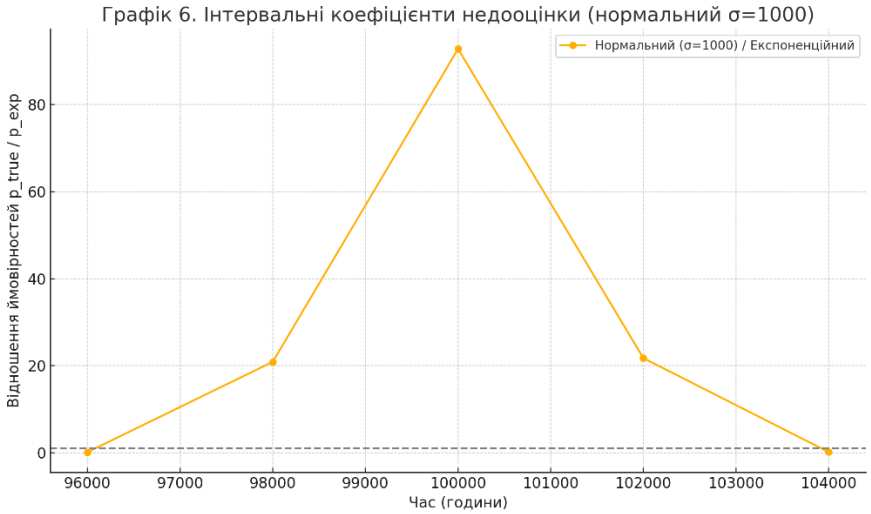


Рис. 6. Інтервальні коефіцієнти недооцінювання імовірностей небезпечних відмов (нормальний закон розподілу з параметром σ = 1000)

4. Аналіз законів розподілу небезпечних відмов у залізничній автоматиці

Для систем залізничної автоматики рекомендовано використовувати такі закони розподілу небезпечних відмов:

- експоненціальний;
- Вейбулла;
- гамма-розподіл;
- нормальний.

4.1. Експоненціальний розподіл

Цей розподіл характерний для випадків із постійною інтенсивністю небезпечних відмов. Імовірність відмови в одиницю часу (PFH) залишається сталою протягом усього терміну експлуатації, тобто ризик не змінюється з часом. За стандартами [10, 11], експоненціальний закон рекомендовано застосовувати для елементів без вираженого зношування, зокрема електронних компонентів, що працюють у межах заявленого ресурсу.

У стандарті EN 50129 прямо зазначено, що PFH для електронної апаратури може бути визначено за експоненціальним розподілом, якщо немає достовірних даних щодо старіння. Аналогічно, у ДСТУ EN 50129 [9] випадкові (random) відмови в електронних компонентах також передбачено моделювати експоненціально. Отже, у практиці функціональної безпеки залізничної автоматики експоненціальну модель трактують як допустиму і консервативну за відсутності підтвердженого впливу старіння або деградації.

У стандарті EN 50126 / ДСТУ EN 50126 [9] вказано, що для систем, у яких переважають випадкові відмови, дозволено використовувати постійну інтенсивність, тобто експоненціальний розподіл. У разі наявності явних ознак старіння (наприклад через знос або термічну деградацію) дозволено застосування розподілу Вейбулла, але використання експоненціального підходу при цьому не заборонено.

Щодо практики, то спрощеність експоненціального моделювання і його відповідність мінімальним вимогам стандартів призводить до його поширення в сертифікаційних процедурах для систем залізничної автоматики [8–10].

Міжнародний стандарт IEC 61508 також дає змогу використовувати експоненціальний розподіл для оцінювання PFH, якщо відсутня верифікована інформація про зношення компонентів (частина 6, додаток B). У розділі B.3.2 цієї частини стандарту експоненціальна модель наведена як базова для прикладів оцінювання PFH та PFDavg [11].

Очікують, що результати цього дослідження можуть бути враховані під час доопрацювання проєкту нової редакції prEN IEC 61508-6:2025, публікацію якої заплановано на 2026 рік.

У разі ж виявлення ознак фізичного зношування або отримання експлуатаційних даних, що свідчать про зміну інтенсивності відмов із часом, необхідно переходити до більш адекватної моделі – розподілу Вейбулла.

4.2. Розподіл Вейбулла

Розподіл Вейбулла є універсальною та гнучкою моделлю, яка дає змогу враховувати зростання або зменшення ризику з часом:

$\beta < 1$ — висока ймовірність початкових відмов («дитячі хвороби»);

$\beta = 1$ — експоненціальна поведінка (постійна інтенсивність);

$\beta > 1$ — зростаюча інтенсивність відмов (ефекти старіння та зношення).

Цей розподіл є особливо цінним для моделювання складних систем, у яких протягом життєвого циклу відбуваються фізичні зміни, що впливають на надійність. Системи залізничної автоматики, які працюють у складних умовах і схильні до зношення, найбільш адекватно описує саме закон Вейбулла.

Фізичні прояви старіння (wear-out) електронних компонентів — це, зокрема, зміни електричних і теплових характеристик, зниження електричної міцності ізоляцій, деградація паяння, електроміграція тощо. Усе це призводить до підвищення ймовірності небезпечних відмов на пізніх етапах експлуатації. Ці ефекти часто не виявлені під час періодичних функціональних тестів, але критично впливають на динаміку $\lambda(t)$ і коректність визначення рівня функціональної безпеки (SIL).

У табл. 2 наведено приклади фізичних ознак старіння основних компонентів систем залізничної автоматики, які мають бути враховані під час вибору закону розподілу небезпечних відмов.

Таблиця 2

Основні фізичні ознаки старіння компонентів систем залізничної автоматики

Компонент	**Фізичні ознаки старіння (wear-out)**
1	2
Мікропроцесори / Контролери	Деградація діелектриків, збої пам’яті, тимчасові збої (SEU), які можуть призвести до спотворення даних, збоїв у виконанні програми, помилкових спрацювань, спричинених частинкою високої енергії, наприклад нейтроном або іоном, яка влучає в мікросхему та викликає зміну збереженого біта (наприклад з 1 на 0), порушення шин I/O, що включає збільшення опору ліній, що погіршує сигнал; зміну логічних рівнів, через що пристрій перестає розпізнавати команди або реагує помилково; інтерференцію або електромагнітний шум, що викликає помилкові сигнали; втрату цілісності сигналу через мікротріщини, пошкодження доріжок чи корозію контактів; відмову драйверів I/O у мікросхемі, що робить шину повністю нефункціональною (система може виглядати працездатною, але не реагувати на сигнали або видавати некоректні команди); зниження тактової частоти, що може спричинити недопустимі затримки або помилки в синхронізації, що критично для залізничних систем реального часу, старіння комплектувальних елементів
Промислові ЕОМ	Накопичення пилу, деградація живлення, перегрів, зниження стабільності інтерфейсів, старіння комплектувальних елементів

Продовження табл. 2

1	2
Монітори / HMI	Вигорання матриці, деградація підсвітки, зниження контрасту, несправність сенсорів, старіння комплектувальних елементів
Батареї, джерела живлення	Втрата ємності, зростання внутрішнього опору, деградація елементів живлення
Мікросхеми	Зміна порогів напруг, деградація структури кремнію, електроміграція
Транзистори	Електроміграція в структурах, зростання струмів витоку, зміна порогу відкривання, деградація оксидного шару
Тиристори	Зниження стійкості до перенапруг, деградація PN-переходів, зростання часу перемикання
Оптрони	Зниження яскравості випромінювання світлодіода, зменшення чутливості фотоприймача, деградація оптичного каналу
Резистори	Зміна номіналу, нестабільність опору за високих температур, деградація контактів, мікротріщини
Конденсатори (неелектролітичні)	Зміна ємності через деградацію діелектрика (наприклад керамічного або плівкового), тріщини, втрати на витік, погіршення стабільності за температурних циклів
Конденсатори (електролітичні)	Втрата ємності, зростання ESR (еквівалентного послідовного опору), висихання електроліту, роздування або протікання
Дроселі / котушки індуктивності	Нагрів і деградація ізоляції, зменшення індуктивності, механічна вібрація обмоток, насичення магнітного сердечника
Трансформатори	Пересихання або деградація ізоляції, локальний перегрів, зниження ефективності магнітопроводу
Реле (електромагнітні)	Зношення або підгоряння контактів, деградація пружинного механізму, зростання часу спрацювання, втрата контактного тиску
TVS-діоди (супресори)	Погіршення швидкодії, підвищення залишкової напруги, деградація p-n переходів, зниження ефективності за повторних імпульсів, утворення мікротріщин у корпусі або виводах
Розрядники	Зношення електродів, втрата герметичності, зростання напруги пробою, погіршення реакції на імпульсні перенапруги, втрата відновлюваності після багаторазового спрацювання
Варистори	Зміна характеристики напруга-струм, зростання залишкової напруги, зменшення енергії поглинання, деградація зернистої структури, втрата чутливості до імпульсів
Електричні з’єднання	Окиснення, корозія, зростання контактного опору
Роз’єми	Окиснення контактів, механічне зношення, нестабільне з'єднання, чутливість до вібрацій
Кабелі	Мікротріщини в ізоляції, підвищення опору, волога, УФ-старіння, корозія провідників

Аналіз даних таблиці підтверджує реальність старіння і зносу у процесі експлуатації систем керування рухом поїздів, а також актуальність використання реальних розподілів небезпечних відмов для SIL-розрахунків функціональної безпеки систем залізничної автоматики.

4.3. Гамма-розподіл у контексті оцінювання функціональної безпеки

Гамма-розподіл застосовують як альтернативу експоненціальному та вейбуллівському розподілам для моделювання часу до небезпечних відмов у системах, де спостерігають:

- ненульову початкову затримку у виникненні відмов;
- багатоетапну деградацію компонентів;
- посилене старіння після певного періоду експлуатації.

Такий розподіл є доцільним для складних систем, що мають інерційний період на початку життєвого циклу або поступовий перехід між стадіями зносу. Це може бути характерно, зокрема, для окремих типів контролерів, датчиків і перетворювачів, які застосовувані в залізничній автоматизації. Попри обмежене поширення в інженерній практиці, гамма-розподіл є універсальнішим за експоненціальний, оскільки дає змогу моделювати змінну інтенсивність відмов з урахуванням початкового «затишшя» і подальшого зростання ризику.

4.4. Нормальний розподіл

Для нормального розподілу характерна симетрична, дзвоноподібна функція щільності ймовірності з максимумом у середньому значенні μ. Найвища ймовірність відмови припадає на середню частину ресурсу, що відповідає технічним системам із симетричним зносом.

Попри його застосування в ряді статистичних задач, нормальний розподіл не є адекватним для моделювання часу до небезпечної відмови в системах функціональної безпеки з таких причин:

- симетрія розподілу: нормальний закон припускає, що ймовірність «ранньої» і «пізньої» відмов однакова. Проте реальні системи зазвичай демонструють асиметричну поведінку з поступовим зростанням ризику через старіння, деградацію та накопичення дефектів;

- визначеність у від'ємній області часу: нормальний розподіл математично визначений і для $t < 0$, що суперечить фізичній суті часу до відмови. Наприклад, за середнього наробітку 100 000 год існує (хоч і дуже мала) імовірність відмови до початку роботи, що є неприйнятним у розрахунках безпеки;

- неможливість моделювання фаз життєвого циклу: нормальний розподіл не розрізняє періоди: початкового етапу («дитячі хвороби»), випадкових відмов, відмов через старіння.

На відміну від нього, вейбуллівський розподіл дає змогу змінювати параметр форми β для відображення кожної з цих фаз.

Отже, нормальний розподіл може бути прийнятним лише для статистичного аналізу результатів лабораторного тестування однорідних вибірок або аналізу розподілу середніх значень наробітку між окремими зразками (наприклад 100 однакових пристроїв). Для оцінювання PFH або ймовірності відмови в конкретний момент часу нормальний розподіл не придатний.

4.5. Логнормальний розподіл

Логнормальний розподіл має зростаючу інтенсивність відмов $\lambda(t)$ після певного моменту часу. Як і розподіл Вейбулла, він відображує процес старіння, але не входить до переліку рекомендованих у стандартах IEC 61508 чи EN 50129 для моделювання функціональної безпеки. Його застосування можливе в дослідницьких задачах або в умовах наявності емпіричних даних, що підтверджують логнормальний характер розподілу.

4.6. Узагальнена характеристика розподілів небезпечних відмов

Особливості розподілів небезпечних відмов наведено в табл. 3.

На рис. 7 наведено графіки миттєвої інтенсивності відмов $\lambda(t)$ для різних розподілів:

- Вейбулла ($\beta = 2$) – демонструє типовий сценарій старіння з монотонним зростанням $\lambda(t)$;

• експоненціальний — лінія з постійним значенням λ(t), без урахування змін у часі;

• нормальний — максимум інтенсивності в середній частині терміну служби;

• гамма-розподіл – гнучка форма, яка дає змогу врахувати затримку та зростання ризику.

Таблиця 3

Особливості розподілів небезпечних відмов

Розподіл	Поведінка λ(t)	Особливості застосування
Експоненціальний	λ(t) = const	Не враховує старіння; рекомендований за відсутності даних
Вейбулла	λ(t) змінюється залежно від β	β < 1 — «дитячі хвороби»; β > 1 — старіння
Гамма-розподіл	λ(t) зростає за умови k > 1	Моделює багатостадійну деградацію, враховує інерцію
Нормальний	λ(t) має максимум біля μ	Симетричний; не враховує фаз життєвого циклу, непридатний для PFH
Логнормальний	λ(t) зростає асиметрично	Не рекомендований стандартами, але може враховувати старіння

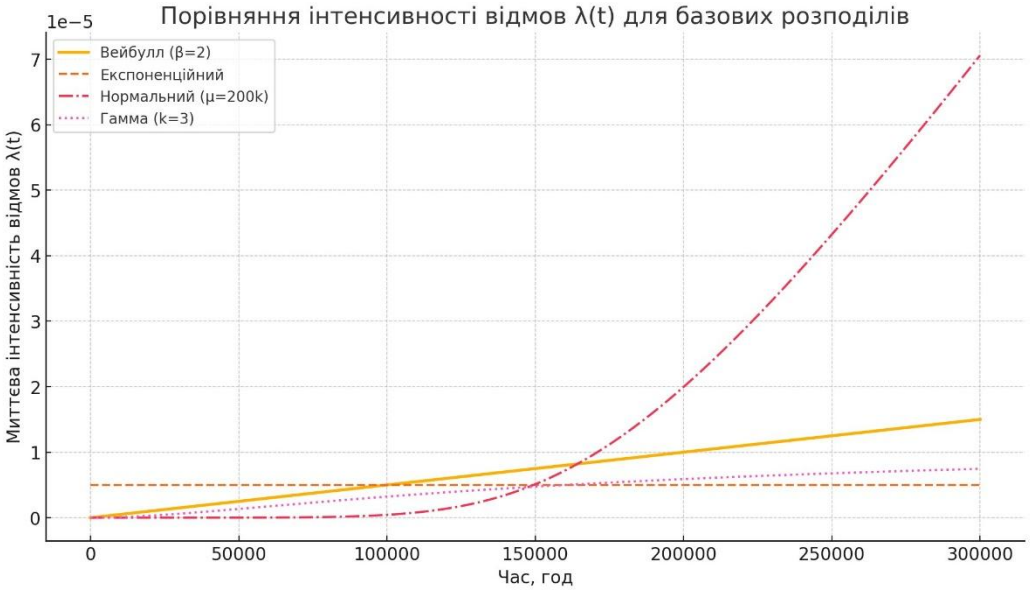


Рис. 7. Графік миттєвої інтенсивності відмов λ(t) для різних розподілів

Усі ці графіки побудовано для приблизно однакового середнього часу до відмови (~200 000 год). Цього досягають налаштуванням параметрів кожного розподілу так, щоб їхнє математичне сподівання Tcp (mean time to failure, MTTF) було подібним:

• експоненціальний розподіл: Tcp (MTTF) = 1/λ ≈ 200 000 год;

• вейбуллівський розподіл: $\eta = 200\,000$ за умови $\beta = 2$ середній наробіток $T_{ср}$ (MTTF) $= \eta \cdot \Gamma(1 + 1/\beta) \approx 177\,000$ год;

• гамма-розподіл: $T_{ср}$ (MTTF) $k = 3$, $\lambda = 1/80\,000$; $k/\lambda = 3 \times 80\,000 = 240\,000$ год;

• нормальний: $\mu = 200\,000$, σ – змінюється.

Попри те, що точні значення MTTF трохи відрізняються (у межах ±20 % цільового значення), така параметризація дає змогу валідно порівнювати $\lambda(t)$ для візуалізації ефекту старіння та потенційного недооцінювання PFH. Водночас саме характер змін $\lambda(t)$ демонструє суттєву відмінність у ризику, що підкреслює обмеженість експоненціального розподілу як універсального нормативного підходу до оцінювання безпеки в реальних системах керування рухом поїздів.

Висновки

1. Графіки коефіцієнтів Ratio(t) та інтервальних відношень імовірностей небезпечних відмов є ефективними інструментами для виявлення критичних інтервалів ризику, зокрема у випадках недооцінювання або переоцінювання функціональної безпеки залежно від вибраного закону розподілу.

2. Протягом більшості життєвого циклу систем залізничної автоматики спостерігають суттєве недооцінювання ймовірностей небезпечних відмов з використанням експоненціального закону:

- п’ять-сім разів — для нормального розподілу;

- 1,5–3,5 раза — для інших «істинних» (неекспоненціальних) моделей.

3. У випадку дуже вузького нормального розподілу ($\sigma = 1000$ год), що моделює високостабільні, масово протестовані системи, недооцінювання ризику може сягати 80 разів у піковій зоні. Проте через фізичну неприйнятність нормального закону для часу до відмов його не слід застосовувати для нормативного оцінювання PFH.

4. У першій чверті життєвого циклу експоненціальна модель може демонструвати переоцінювання ризику, що створює ілюзію додаткового запасу безпеки. Однак ця ситуація триває лише 20–25 % терміну експлуатації, після чого ризик стрімко зростає, і експоненціальний підхід починає критично недооцінювати ризик.

5. Якщо реальний розподіл має змінну (зростаючу) інтенсивність відмов $\lambda(t)$, як у випадку старіння, використання сталої λ призводить до суттєвих помилок у визначенні нормативних показників функціональної безпеки PFH та PFD.

6. Для систем, де максимальна ймовірність відмови припадає на середню частину ресурсу (нормальний, вейбуллівський із $\beta \approx 2$), застосування експоненціального розподілу веде до критичного недооцінювання ризику.

7. Експоненціальний розподіл, хоча і зручний для обчислювання, слід застосовувати лише після перевірки відповідності реальному розподілу відмов. Його беззастережне використання без валідації може призвести до хибних рішень у контексті SIL-аналізу та сертифікації.

8. У разі неможливості використання реальних розподілів відмов для визначення функціональної безпеки рекомендовано з урахуванням проведеного дослідження вводити коефіцієнт запасу (підвищеної жорсткості вимог) для рівнів SIL1-SIL4 на старіння і знос пристроїв автоматизації.

Список використаних джерел

1. Sergii Panchenko, Anatolij Bojnik, Viktor Kustov, Vasyl Sotnyk. Ensuring railroad’s digital automation systems resistance to dangerous states. *ICTE in Transportation and Logistics*. 2019. IC Tol 2019. LNITI. P. 120-128. 2020. https://doi.org/10.1007/978-3-030-39688-6_17.

2. Кустов В. Ф. Разработка требований функциональной безопасности для устройств железнодорожной автоматики. *Вестник Белорусского государственного университета железнодорожного транспорта. Наука и транспорт*. 2020. Вып. 2(41). С. 28-30. http://lib.kart.edu.ua/handle/123456789/21030.

3. Удосконалення якості оцінки функціональної безпеки систем залізничної автоматики за наявності кратних небезпечних відмов у каналах резервування / О. А. Бунчуков, В. Ф. Кустов, С. В. Панченко, В. О. Сотник. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті.* 2023. 28(2). С. 55-62. https://doi.org/10.18664/ikszt.v28i2.283281.

4. Кустов В. Ф. Математические модели функциональной безопасности микропроцессорных систем железнодорожной автоматики. *Зб. наук. праць УкрДАЗТ*. Харків: УкрДАЗТ, 2010. Вип. 116. С. 65-71.

5. Кустов В. Ф. Математичні моделі функційної безпечності та безвідмовності відновлюваних технічних засобів у разі використання мажоритарного резервування «2» із «3». *Збірник наук. праць Донецького інституту залізничного транспорту*. 2010. № 3. С. 5-14. http://lib.kart.edu.ua/handle/123456789/20832.

6. ДСТУ 4178-2003. Комплекси технічних засобів систем керування та регулювання руху поїздів. Функційна безпечність і надійність. Вимоги та методи випробовування. Київ: Держспоживстандарт України, 2003. 32 с.

7. ДСТУ EN 50126-1:2015 uk. Залізничний транспорт. Специфікація та демонстрація надійності, доступності, безпеки і ремонтопридатності (РАМН). Ч. 1. Основні вимоги та загальний процес (EN 50126-1:1999, IDT).

8. ДСТУ EN 50129:2015 uk. Залізничний транспорт. Системи зв'язку сигналізації та оброблення даних. Електронні сигналізаційні системи безпеки (EN 50129:2003, IDT).

9. IEC 61508-2:2000. Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems.

10. CENELEC - EN 50129. Railway applications – Communication, signalling and processing systems – Safety related electronic systems for signalling. 2018.

11. Кустов В. Ф. Особенности обеспечения функциональной безопасности микропроцессорных систем управления и контроля на железнодорожном транспорте. *Залізничний транспорт України*. 2015. № 1. С.22- 30.

12. Кустов В. Ф. Основи теорії надійності та функційної безпечності систем залізничної автоматики: навч. посіб. Харків: УкрДАЗТ, 2008. 217 с. URL: http://lib.kart.edu.ua/handle/123456789/8481.

Кустов Віктор Федорович, кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматики та комп'ютерного телекерування рухом поїздів, Український державний університет залізничного транспорту.
ORCID iD: 0000-0002-9773-5470. Тел.: +38(057) 730-10-32. E-mail: kustov.vf@kart.edu.ua.

Kustov Viktor, PhD (Tech). Associate professor, department of automation and computer telecontrol of trains, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0002-9773-5470. Tel.: +38(057) 730-10-32. E-mail: kustov.vf@kart.edu.ua.

Статтю прийнято 30.06.2025 р.

ТРАНСПОРТНІ ТЕХНОЛОГІЇ (275)

UDC 621.314:517.5

DYNAMICS OF A PULSE-WIDTH CONVERTER USING THE THEORY OF GENERALIZED FUNCTIONS

Dr. Sc. (Tech.) Y. V. Shcherbak, Candidates of Technical Sciences K. Y. Ivakina, V. P. Nerubatskyi

ДИНАМІКА ШИРОТНО-ІМПУЛЬСНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ТЕОРІЇ УЗАГАЛЬНЕНИХ ФУНКЦІЙ

Д-р техн. наук Я. В. Щербак, кандидати техн. наук К. Я. Івакіна, В. П. Нерубацький

DOI: https://doi.org/10.18664/1994-7852.212.2025.336550

Abstract. *The aim of the paper is an accurate description of the dynamic processes of a pulsed DC voltage converter with pulse-width modulation of the second kind in the mode of continuous load current using the theory of generalized functions of one argument for a one-sided and two-sided reference signal and checking the adequacy of the obtained pulse models of the converter by simulating in the MATLAB environment of a high-speed system for regulating the output current of the converter. The novelty of the proposed work consists in the application of the theory of generalized functions of one argument to describe the dynamic processes of a pulse converter of direct voltage with pulse-width modulation of the second kind. The practical value of the work consists in the fact that the application of the analytical dependencies is obtained in the article in the process of developing an automatic control system for the output coordinates of a pulse converter makes it possible to calculate the system parameters for a given dynamic process.*

Keywords: *pulse converter, direct voltage, pulse-width modulation of the second kind, one-sided and two-sided reference signal, generalized derivative, pulse model, transient process.*

Анотація. *Метою роботи є точний опис динамічних процесів імпульсного перетворювача постійної напруги з широтно-імпульсною модуляцією другого роду в режимі безперервного струму навантаження із застосуванням теорії узагальнених функцій одного аргументу для одностороннього і двостороннього опорного сигналу і перевірка адекватності отриманих імпульсних моделей перетворювача за рахунок імітаційного моделювання в середовищі MATLAB швидкодіючої системи регулювання вихідного струму перетворювача. Показано ефективність застосування методу узагальненої похідної для отримання імпульсних моделей імпульсного перетворювача постійної напруги з широтно-імпульсною модуляцією в режимі безперервного струму. Новизна запропонованої роботи полягає в застосуванні теорії узагальнених функцій одного аргументу для опису динамічних процесів імпульсного перетворювача постійної напруги з широтно-імпульсною модуляцією другого роду. Отримані імпульсні моделі дають змогу точно описати динамічні процеси в системах автоматичного регулювання з імпульсним перетворювачем постійної напруги, розрахувати параметри регулятора для отримання граничної швидкодії. Аналіз отриманих осцилограм показує, що перехідний процес закінчується за два тактові інтервали імпульсного перетворювача напруги, що відповідає порядку системи. Аналіз динамічних процесів розглянутої системи підтверджує коректність аналітичних результатів, одержаних під час*

проведення дослідження. Практична цінність роботи полягає в тому, що застосування отриманих у роботі аналітичних залежностей у процесі розроблення системи автоматичного регулювання вихідних координат імпульсного перетворювача дає змогу розрахувати параметри системи заданого динамічного процесу.

Ключові слова: *імпульсний перетворювач, постійна напруга, широтно-імпульсна модуляція другого роду, односторонній і двосторонній опорний сигнал, узагальнена похідна, імпульсна модель, перехідний процес.*

Introduction. Pulsed DC voltage converter with pulse-width modulation are widely used in automated electromechanical systems [1, 2] and for the construction of stabilized power supply system's [3, 4]. Such converters allow the creation of systems with high dynamic characteristics [5–8]. To implement their properties, it is necessary to use precise mathematical models and a special mathematical apparatus.

Differences in the dynamic processes of impulse converters are caused by different forms of reference signals in control systems [9]. Such converters are abused by the forms of support signals of control systems: in converters from one-sided pulse-width modulation – this is a one-sided saw tooth signal, and in converters with double-sided modulation – this is a double-sided support signal. Also, due to the fact that the output voltage is a sequence of rectangular pulses, at the output of the above continuous part, a variable component is formed, which falls on the input of the control system. The presence of a variable component, differences in the forms of reference signals and the need to strictly describe mathematical models affects the accuracy of calculation of dynamic processes of pulsed DC voltage converter with pulse-width modulation, which is formed in the research of performed in this paper.

Literature review and problem statement. The study of dynamic processes in pulsed buck DC converters is presented in works [10, 11]. References [12–14] provide research results on the dynamic proper-ties of automatic control systems with one-sided pulse-width modulation. There are significantly fewer research paper dedicated to systems with two-sided modulation. It should be noted that the known research results obtained from the study of electro-magnetic processes without strict mathematical descriptions do not provide a complete understanding of the adequacy of the dynamic models used for converters. The complexity of describing dynamic processes arises from the pulsed nature of electrical energy conversion, which leads to the presence of discontinuous functions.

The aim and objectives of the study. The purpose of this work is to study the dynamic models of a pulsed DC voltage converter with pulse-width modulation operating in continuous current mode. To achieve this purpose, the following tasks are set:

– to justify the applicability of the mathematical apparatus of generalized functions for studying the dynamic characteristics of pulsed buck DC converters operating in continuous current mode in the load circuit;

– to investigate the dynamic characteristics of control systems using the obtained pulsed models.

The main part of the study. ***Dynamics of a pulsed dc converter with one-sided modulation.*** The dynamic processes of the pulsed converter are considered for the continuous current mode in the load circuit. The converter is powered by an ideal voltage source, in this case, a sequence of rectangular pulses is formed at its output $e_v = \gamma \cdot U_m$.

Fig. 1 shows a generalized equivalent circuit of a pulse-width converter with pulse-width modulation (PWM).

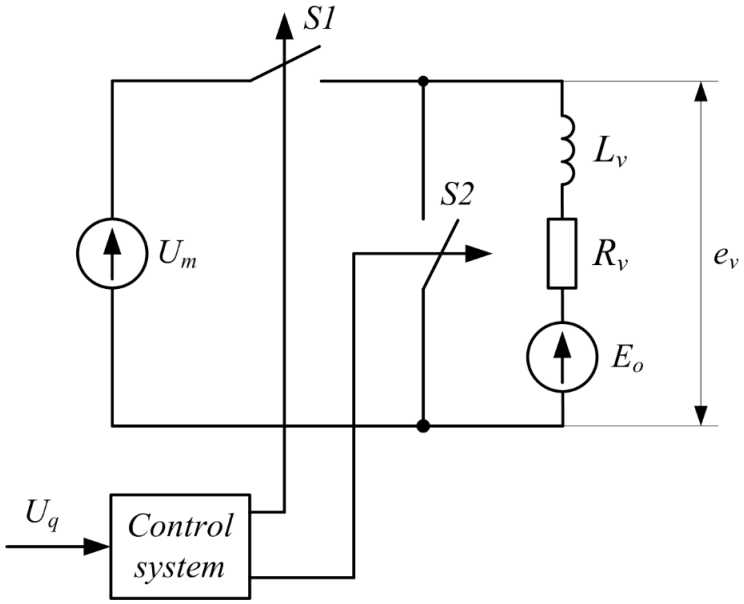


Fig. 1. Generalized equivalent circuit of a pulse-width modulated converter with pulse-width modulation

The process of current flow in the load is described by a system of differential equations:

$$\begin{aligned} L_v \frac{dI_v^{'}}{dt} + I_v^{'} R_v &= U_m - E_o; \\ L_v \frac{dI_v^{''}}{dt} + I_v^{''} R_v &= -E_o. \end{aligned} \tag{1}$$

The dynamic processes in the converter are determined by the properties of the informational component of the transient process. To obtain this component, a perturbation ΔU_q is applied to the control signal of the converter (Fig. 2). As a result, variations in the output pulses with a duration of $\Delta\gamma_n T$ are observed.

The following notations are used in Fig. 2: T – the switching period of the pulse-width modulated converter; $\gamma_n T$ – the duration of the PWM output pulse; $\Delta\gamma_n T$ – the variation in the duration of the PWM output pulse.

The process of converting the input voltage into a sequence of rectangular pulses is determined by two switching conditions of the power switch. The first switching condition is related to the operating principle of the control system. For a Inertia-free control system implementing the vertical control principle with a one-sided reference signal, this condition is expressed as follows

$$U_q(t_n) = U_s(t_n), \tag{2}$$

where $U_q(t_n)$ – control signal;

$U_s(t_n)$ – PWM reference signal;

t_n – time corresponding to the switching at the n-th PWM interval.

The first switching condition connects the magnitude of the control signal with the duration of the output pulse of the PWM in the interval of energy transfer by the rectifier from the input source to the load and determines the moment of transition from the first equation of the system (1) to the second. The second switching condition is functionally connected with the first and is fulfilled when the load current, during the open state of the power switch S1 (Fig. 1), decreases to zero.

$$I_v(t_n; t_n + \tau) = 0, \tag{3}$$

where τ – time for load current to fall to zero.

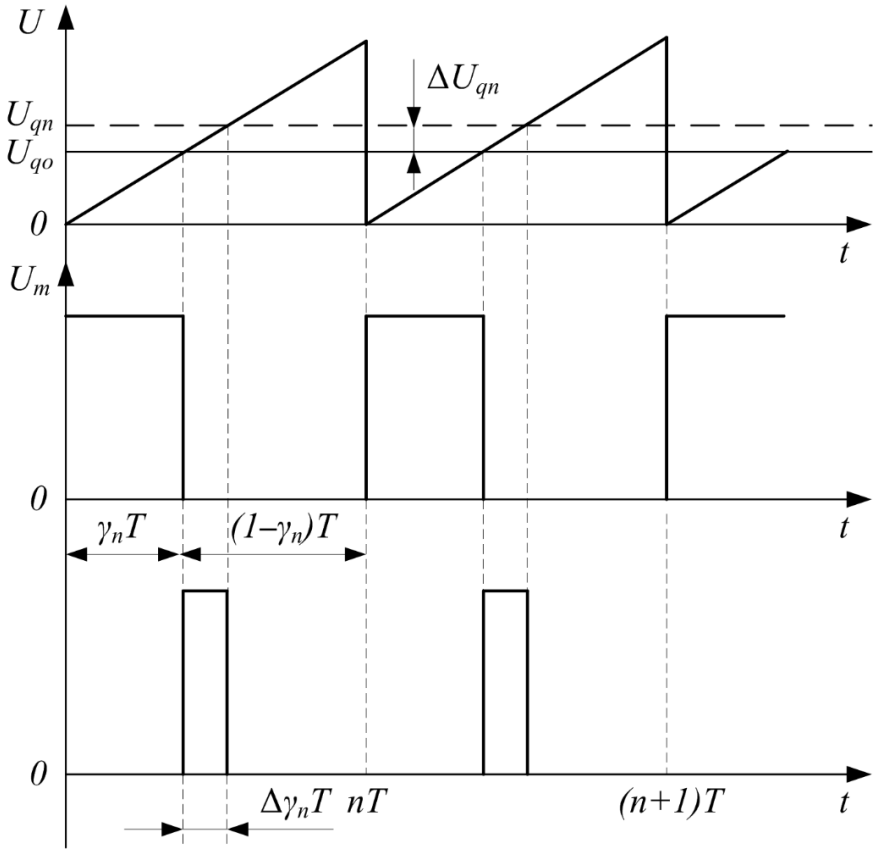


Fig. 2. Voltage diagrams of a pulse-width modulation converter with a one-sided reference signal

Condition (3) is satisfied when the PWM converter switches to the intermittent current mode, when

$$E_o > U_m. \tag{4}$$

The given system of piecewise linear equations (1) – (3) allows to describe electromagnetic and dynamic processes of a pulse converter with PWM.

The output voltage increment under the action of ΔU_q in a closed structure is determined by a transcendental equation with respect to the control signal.

$$\Delta e_v\left[\Delta U_q(t_n)\right] = e_v\left(U_q + \Delta U_q\right) - e_v\left(U_q\right). \tag{5}$$

The dynamic relationship between the input ΔU_q and output Δe_v coordinates is determined by linearizing equation (5) relative to the new state of the system ΔU_{qn}. Having expanded equation (5) into a generalized Taylor series and limited to the first two terms of the expansion, we obtain

$$\Delta e_v = \frac{De_v\left(t_{\gamma n}\right)}{dU_q} \cdot \frac{\Delta U_q}{1!}, \tag{6}$$

where $\frac{De_v(t_{\gamma n})}{dU_q} = \frac{\partial e_v}{\partial U_q} - \Delta E_n(t_{\gamma n})\frac{dt_{\gamma n}}{dU_q}\cdot\delta(t - t_{\gamma n})$ – generalized derivative of a function that has a discontinuity of the first kind and depends on a parameter [11];

$\Delta E_n(t_{\gamma n}) = U_m$ – the magnitude of the jump in the output electromotive force at the break point at each PWM discreteness interval.

At the intervals of the output pulse action, the output electromotive force is invariant to changes in the controlled parameter γ, and therefore

$$\frac{de_v}{\partial U_q} = 0. \qquad (7)$$

Taking into account (7), expression (6), written for the n-th discrete interval of the pulse-width modulated converter, takes the following form:

$$\Delta e_v(t_n) = -\frac{\Delta U_q(t_n)}{1!}\cdot U_m \cdot \frac{dt_n}{dU_q}\cdot\sum_{n=0}^{k_o}\delta(t - t_n). \qquad (8)$$

The relationship between the increments of the control input ΔU_q and the increments of the time coordinate t_n is determined by the solution of a transcendental equation derived from the first switching condition in the n-th PWM switching interval.

$$U_q(t_o + \Delta t_{\gamma n}) = U_s(t_{\gamma n}). \qquad (9)$$

For small increments ΔU_q, the equation can be approximated with respect to the system's initial state using the first two terms of the Taylor series. In this case, the left-hand and right-hand sides of the equation take the following form:

$$\begin{aligned} U_q(t_o + \Delta t_{\gamma n}) &= U_q(t_o) + \Delta U_q(t_o) + \frac{dU_q(t_o)}{dt}\cdot\Delta t_{\gamma n}; \\ U_s(t) &= U_s(t_o) + \frac{dU_s(t_o)}{dt}\cdot\Delta t_{\gamma n}. \end{aligned} \qquad (10)$$

In a closed structure, the control action U_q of a PWM converter contains two components

$$U_q(t_n) = U_{qo}(t_n) + U_p(t_n). \qquad (11)$$

The first component is a reference input proportional to the smoothed component, while the second is proportional to the pulsating component contained in the output signal of the equivalent continuous part of the system.

Substituting expression (10), which accounts for the components of the control input defined in (11), into the first switching condition (2), we obtain the following:

$$U_{qo}(t_o)+\Delta U_{qo}(t_o)+\frac{dU_{qo}(t_o)}{dt}\Delta t_{\gamma n}+U_p(t_o)+\frac{dU_p(t_o)}{dt}=U_s(t_o)+\frac{dU_s(t_o)}{dt}\Delta U_{qn}. \quad (12)$$

From expression (12) we obtain

$$\Delta t_{\gamma n}=\frac{U_{qo}(t_o)+U_p(t_o)-U_s(t_o)+\Delta U_q(t_o)}{\frac{dU_{qo}(t_o)}{dt}+\frac{dU_p(t_o)}{dt}-\frac{dU_s(t_o)}{dt}}. \quad (13)$$

In expression (13) for deviations of the angular coordinate $\Delta t_{\gamma n}$, the sum of the components $U_q(t_o)$ and $U_s(t_o)$ determines the value of the control action $U_q(t_o)$ at the moment of system equilibrium t_o. From the switching condition (3) it follows that

$$U_{qo}(t_o)+U_p(t_o)-U_s(t_o)=0. \quad (14)$$

Let us perform the limit transition in expression (13) taking into account (14)

$$\frac{dt_{\gamma n}}{dU_q}=\frac{1}{\frac{dU_{qo}(t_o)}{dt}+\frac{dU_p(t_o)}{dt}-\frac{dU_s(t_o)}{dt}}. \quad (15)$$

When the transfer function $W(p)$ of the equivalent continuous part of the closed-loop automatic control system with PWM has a difference between the orders of the denominator and numerator polynomials less than two, then the control input U_q has discontinuities at the switching moments $t_{\gamma n}$. In this case, the derivative of $U_q(t_{\gamma n})$ in equation (15) is equal to its left-hand value.

Introducing the ripple factor notation into equation (15) yields the following expression [15]:

$$F^{-1}=1-\frac{\frac{dU_{qo}(t_o)}{dt}}{\frac{dU_s(t_o)}{dt}}-\frac{\frac{dU_p(t_o)}{dt}}{\frac{dU_s(t_o)}{dt}}. \quad (16)$$

Thus, we obtain the following expression

$$\frac{dt_{\gamma n}}{dU_q}=-F_n\cdot\frac{dt}{dU_s(t_o)}. \quad (17)$$

Based on expressions (16) and (17), it can be concluded that in pulse-width converter with PWM the pulsating component affects the pulsation factor.

Taking (17) into account, the expression for $\Delta e_v(t_n)$ can be written as follows.

$$\Delta e_v\left(t_n\right) = U_m \cdot \Delta U_q\left(t_{\gamma n}\right) \cdot F_n \cdot \frac{dt}{dU_s\left(t_o\right)} \cdot \sum_{n=0}^{k_o} \delta\left(t - t_n\right). \quad (18)$$

Analyzing expression (18), it can be stated that for small values of $\Delta U_q(t_{\gamma n})$, the pulse-width converter with PWM acts as a second-order amplitude-pulse modulator, where the gain is determined by the form of the reference signal. The reference signal $U_s(t)$ in the case of one-sided PWM is obtained by integrating the constant voltage U_o.

$$U_s\left(t\right) = \frac{1}{T_i} \cdot \int_{nT}^{nT+t} U_o \cdot dt, \quad (19)$$

where T_i – constant integrator time.

Transforming expression (19) and substituting $T_i = T$, we obtain

$$U_s\left(t\right) = U_o \cdot \frac{t_{\gamma n}}{T}, \quad (20)$$

where from

$$\frac{dt}{dU_s\left(t\right)} = \frac{T}{U_o}. \quad (21)$$

Substituting (21) into (18) and considering the repetition of processes over the pulse-width modulated converter discrete intervals, we obtain

$$\Delta e_v\left(t_{\gamma n}\right) = \Delta U_q\left(t_{\gamma n}\right) \cdot T \cdot \sum_{n=1}^{\infty} K \cdot F \cdot \delta\left(t - t_{\gamma n}\right), \quad (22)$$

where K – PWM transmission coefficient, $K = U_m / U_o$;

T – PWM discrete period.

Fig. 3 shows the pulse model of the converter with PWM constructed according to expression (22).

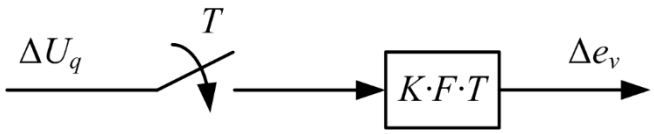


Fig. 3. Pulse model of a pulse-width modulated converter with a one-sided reference signal

This model contains an ideal pulse element with a quantization period T and a reduced part that carries information about the static K and dynamic F transfer coefficients.

Pulse model of a pulse converter with a two-way reference signal. Unlike a converter with one-sided modulation, in this system, two information components are formed at each clock interval, as shown in Fig. 4.

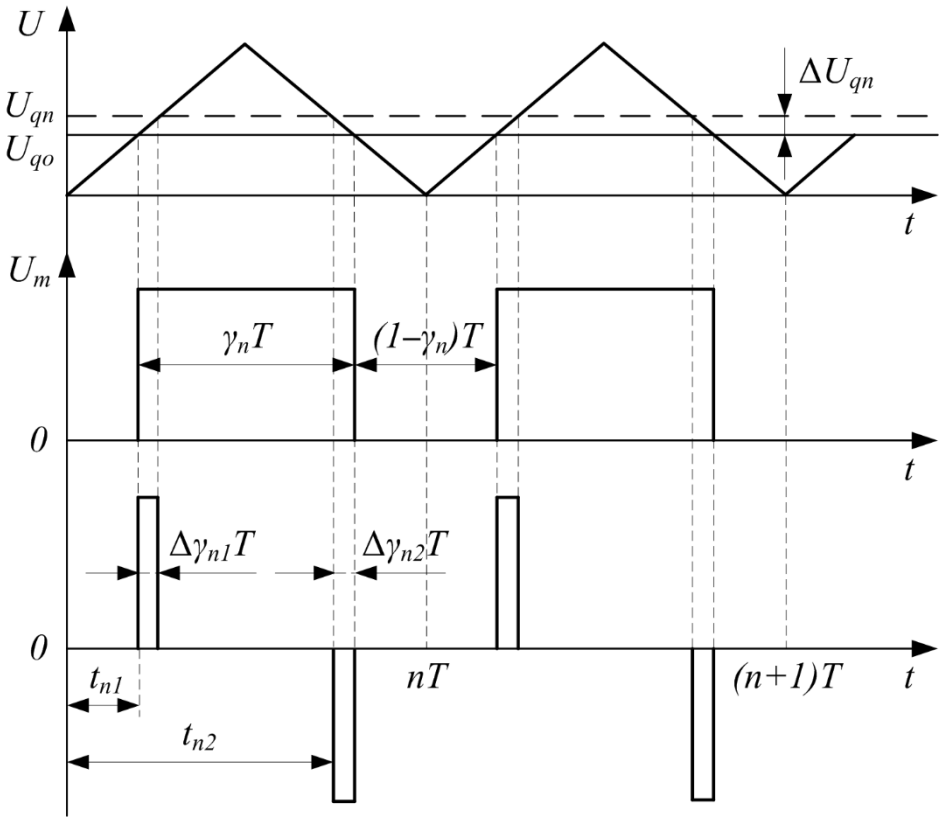


Fig. 4. Voltage diagrams of the pulse-width modulated converter with a two-sided reference signal

In the continuous current mode in the load circuit, the switching condition is determined by the system of equations

$$\begin{aligned} U_s\left(t_{n1}\right) &= U_q\left(t_{n1}\right); \\ U_s\left(t_{n2}\right) &= U_q\left(t_{n2}\right). \end{aligned} \tag{23}$$

When switching to intermittent current mode, the first and second conditions are supplemented by a third

$$I_v\left(t_n; t_n + \tau\right) = 0, \tag{24}$$

where τ – determines the moment when the load current drops to zero.

From expressions (23) and (24) follows a more complex nature of the flow of dynamic processes in a converter with two-way pulse-width modulation compared to one-way. This is explained by the presence of two meeting points of the control signal and the reference signal.

The increment of the converter output signal under the action of ΔU_q in a closed structure is determined by the transcendental equation with respect to the control signal

$$\Delta e_v\left[\Delta U_q\left(t_{n1}; t_{n2}\right)\right] = e_v\left(U_{qo} + \Delta U_q\right) - e_q\left(U_{qo}\right). \tag{25}$$

The resulting increment of the converter output signal is two periodically repeating sequences of pulses Δt_{n1} and Δt_{n2}.

The dynamic relationship between the input ΔU_q and output Δe_v quantities is determined by linearizing equation (25) relative to the new state of the system at $U_q = U_{qn}$.

$$\Delta e_v = \frac{De_v(t_{n1})}{dU_q} \cdot \frac{\Delta U_q}{1!} + \frac{De_v(t_{n2})}{dU_q} \cdot \frac{\Delta U_q}{1!}. \quad (26)$$

Taking into account the generalized derivative and the amplitudes of the jumps at the switching moments, we obtain

$$\Delta e_v(t_n) = -\frac{\Delta U_q(t_{n1})}{1!} \cdot U_m \cdot \frac{dt_{\gamma n1}}{dU_q} \cdot \sum_{n=o}^{k_o} \partial(t - t_{n1}) -$$

$$-\frac{\Delta U_q(t_{n2})}{1!} \cdot U_m \cdot \frac{dt_{\gamma n2}}{dU_q} \cdot \sum_{n=o}^{k_o} \partial(t - t_{n2}). \quad (27)$$

The time coordinates $t_{\gamma n1}$ and $t_{\gamma n2}$ are determined from the switching conditions (23). For a closed-loop structure containing a converter with two-sided pulse-width modulation, the switching conditions are as follows:

– for the first meeting point

$$\Delta U_q(t_{n1} + t_{\gamma n1}) = U_s(t_{n1}); \quad (28)$$

– for the second meeting point

$$\Delta U_q(t_{n2} + t_{\gamma n2}) = U_s(t_{n2}). \quad (29)$$

For small increments $\Delta t_{\gamma n1}$ and $\Delta t_{\gamma n2}$, transcendental equations (28) and (29) can be approximated relative to the initial state of the system by the first two terms of the Taylor series. In this case, the left and right parts of these equations, taking into account that in a closed structure the control signal contains information about the pulsating component of the output voltage, take the form:

– for the first meeting point

$$U_{qo}(t_{n1}) + \Delta U_{qo}(t_{n1}) + \frac{dU_{qo}(t_{n1})}{dt}\Delta t_{\gamma n1} + U_p(t_{n1}) + \frac{dU_p(t_{n1})}{dt}\Delta t_{\gamma n1} =$$

$$= U_s(t_{n1}) + \frac{dU_s(t_{n1})}{dt}\Delta t_{\gamma n1}; \quad (30)$$

– for the second meeting point

$$U_{qo}(t_{n2}) + \Delta U_{qo}(t_{n2}) + \frac{dU_{qo}(t_{n2})}{dt}\Delta t_{\gamma n2} + U_p(t_{n2}) + \frac{dU_p(t_{n2})}{dt}\Delta t_{\gamma n2} =$$

$$= U_s\left(t_{n2}\right) + \frac{dU_s\left(t_{n2}\right)}{dt}\Delta t_{\gamma n2}. \tag{31}$$

From expressions (30) and (31) it is easy to obtain expressions establishing the relationship between the increments of the reference signal ΔU_{qo} and the durations of the increments $\Delta t_{\gamma n}$ of the output pulse of the pulse-width controller for both meeting points:

$$\Delta t_{\gamma n1} = \frac{U_{qo}\left(t_{n1}\right) + U_p\left(t_{n1}\right) - U_s\left(t_{n1}\right) + U_{qo}\left(t_{n1}\right)}{\frac{dU_s\left(t_{n1}\right)}{dt} - \frac{dU_{qo}\left(t_{n1}\right)}{dt} - \frac{dU_p\left(t_{n1}\right)}{dt}}; \tag{32}$$

$$\Delta t_{\gamma n2} = \frac{U_{qo}\left(t_{n2}\right) + U_p\left(t_{n2}\right) - U_s\left(t_{n2}\right) + U_{qo}\left(t_{n2}\right)}{\frac{dU_s\left(t_{n2}\right)}{dt} - \frac{dU_{qo}\left(t_{n2}\right)}{dt} - \frac{dU_p\left(t_{n2}\right)}{dt}}. \tag{33}$$

In steady state, in accordance with the switching condition

$$U_{qo}\left(t_{n1}\right) + U_p\left(t_{n1}\right) - U_s\left(t_{n1}\right) = 0; \tag{34}$$

$$U_{qo}\left(t_{n2}\right) + U_p\left(t_{n2}\right) - U_s\left(t_{n2}\right) = 0. \tag{35}$$

As a result of limit transitions in expressions (32) and (33), taking into account (34) and (35), we obtain

$$\frac{\Delta t_{\gamma n1}}{dU_{qo}\left(t_{n1}\right)} = \frac{1}{\frac{dU_s\left(t_{n1}\right)}{dt} - \frac{dU_{qo}\left(t_{n1}\right)}{dt} - \frac{dU_p\left(t_{n1}\right)}{dt}}; \tag{36}$$

$$\frac{\Delta t_{\gamma n2}}{dU_{qo}\left(t_{n2}\right)} = \frac{1}{\frac{dU_s\left(t_{n2}\right)}{dt} - \frac{dU_{qo}\left(t_{n2}\right)}{dt} - \frac{dU_p\left(t_{n2}\right)}{dt}}. \tag{37}$$

By introducing the pulsation factor designation into expressions (36) and (37)

$$F_1^{-1} = 1 - \frac{\frac{dU_{qo}\left(t_{n1}\right)}{dt}}{\frac{dU_s\left(t_{n1}\right)}{dt}} - \frac{\frac{dU_p\left(t_{n1}\right)}{dt}}{\frac{dU_s\left(t_{n1}\right)}{dt}}; \tag{38}$$

$$F_2^{-1} = 1 - \frac{\dfrac{dU_{qo}(t_{n2})}{dt}}{\dfrac{dU_s(t_{n2})}{dt}} - \frac{\dfrac{dU_p(t_{n2})}{dt}}{\dfrac{dU_s(t_{n2})}{dt}}, \tag{39}$$

we get

$$\frac{dt_{\gamma n1}}{dU_{qo}(t_{n1})} = -F_1 \frac{dt}{dU_s(t_{n1})}; \tag{40}$$

$$\frac{dt_{\gamma n2}}{dU_{qo}(t_{n2})} = -F_2 \frac{dt}{dU_s(t_{n2})}. \tag{41}$$

Taking into account expressions (40), (41) and the static transfer coefficient *K*, the expression for the increment of the output signal of the pulse-width modulated converter takes the form

$$\Delta e_v(t_n) = \Delta U_q(t_{n1}) T \sum_{n=1}^{\infty} K F_1 \delta(t - t_{n1}) - \Delta U_q(t_{n2}) T \sum_{n=1}^{\infty} K F_2 \delta(t - t_{n2}). \tag{42}$$

From expression (42) it follows that for small values of the control signal increment, a pulse converter with two-way pulse-width modulation is a second-order amplitude-pulse modulator (Fig. 5), in which information is transmitted by two channels.

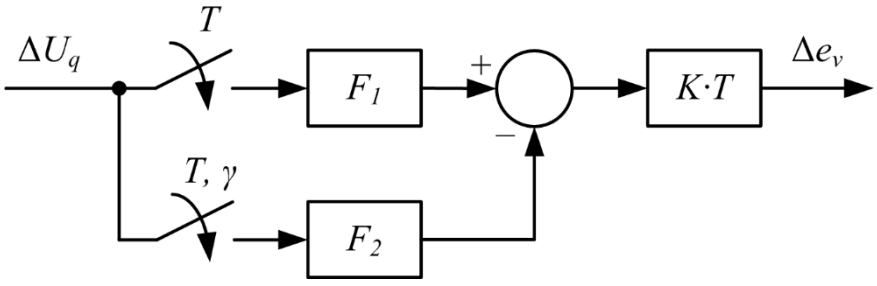


Fig. 5. Pulse model of a pulse-width modulated converter with a two-sided reference signal

The resulting model enables the study of dynamic processes in automatic control systems with a second-order PWM pulsed converter, taking into account discreteness in the continuous current mode.

Automatic voltage regulation system of a pulse-width converter with two-way PWM. To demonstrate the application of the developed pulse models, we will consider a system of automatic control of the anchor current of a

braked DC motor with independent excitation [12, 13]. This mode is used in the development of a system of subordinate control of the speed of an electric motor. Electric motor parameters: supply voltage U_D = 220 V, armature current I_a = 46 A, anchor chain resistance R_a = 0,29 Om, armature inductance $L_a = 3{,}5 \cdot 10^{-3}$ H, shunt resistance $R_1 = 1{,}5 \cdot 10^{-3}$ Om. Time constant of the anchor chain $T_a = 12 \cdot 10^{-3}$ s.

The structural diagram of the anchor current control system is shown in Fig. 6.

The transfer function of the reduced continuous part is determined by the transfer functions of the current regulator and the anchor part

$$W(p) = H_{Ia}(p) \cdot H_I(p). \qquad (43)$$

The transfer function of the anchor chain is determined by the expression

$$H_a(p) = \frac{R_1}{R_a} \cdot \frac{1}{T_a \cdot p + 1}. \qquad (44)$$

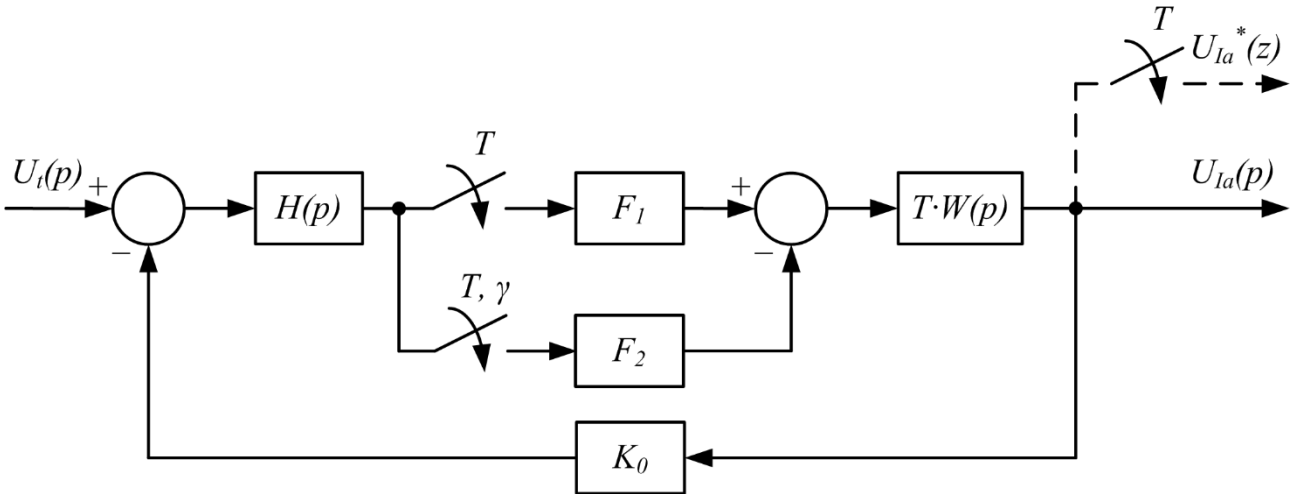


Fig. 6. Structural diagram of the automatic control system of the anchor current of the electric motor

In accordance with [11], to obtain physically feasible conditions for a process of finite duration and first-order astatism, the transfer function of the controller has the form

$$H_I(p) = \frac{K_1 \cdot (T_2 \cdot p + 1)}{T_3 \cdot p}, \qquad (45)$$

where $K_1 = \frac{R_a}{R_1}$.

Then, equation (43), taking into account (44) and (45), takes the form

$$W(p) = \frac{K_0 \cdot (T_2 \cdot p + 1)}{T_3 \cdot p \cdot (T_a \cdot p + 1)}, \qquad (46)$$

where K_0 - is the static transfer coefficient of the pulse converter.

In accordance with [14, 16] and taking into account that the delay of the pulse element *Tγ*, relative to the pulse element *T*, is less than one clock interval, the relationship between the input and output signals is determined by the expression

$$U_{Ia}^{*}(z,\varepsilon)\big|_{\varepsilon=0}=\frac{K_0\cdot T\cdot\left[U_t H^{*}(z,0)\cdot F_1+U_t H^{*}(z,1-\gamma)\cdot F_2\right]\cdot W^{*}(z)}{1+z^{-1}\cdot K_0\cdot T\cdot\left[W^{*}(z,1)\cdot F_1+W^{*}(z,1-\gamma)\cdot F_2\right]}. \quad (47)$$

By performing a modified Z-transformation of the transfer function (46) in accordance with [16], we obtain the characteristic equation

$$1+\frac{T}{T_3}\cdot\left\{\left[\frac{1}{z-1}-\left(1-\frac{T_3}{T_a}\right)\cdot\frac{e^{-\frac{T}{T_a}}}{z-e^{-\frac{T}{T_a}}}\right]\cdot F_1+\left[\frac{1}{z-1}-\left(1-\frac{T_3}{T_a}\right)\cdot\frac{e^{-(1-\gamma)\cdot\frac{T}{T_a}}}{z-e^{-\frac{T}{T_a}}}\right]\cdot F_2\right\}=0. \quad (48)$$

In accordance with [15, 17, 18], we write expressions for the pulsation factors

$$F_1^{-1}=1+\frac{T}{2\cdot T_3}\cdot\left[1-\gamma+\left(\frac{T_2}{T_a}-1\right)\cdot\frac{e^{-\gamma\cdot\frac{T}{T_a}}-e^{-\frac{T}{T_a}}}{1-e^{-\frac{T}{T_a}}}\right]; \quad (49)$$

$$F_2^{-1}=1+\frac{T}{2\cdot T_3}\cdot\left[\gamma+\left(\frac{T_2}{T_a}-1\right)\cdot\frac{e^{-(1-\gamma)\cdot\frac{T}{T_a}}-e^{-\frac{T}{T_a}}}{1-e^{-\frac{T}{T_a}}}\right]. \quad (50)$$

Analysis of expressions (49) and (50) shows that at $\gamma = 0{,}5$ the pulsation factors are equal to each other. Then the conditions for adjusting the control system to a finite duration process have the form [13, 14]

$$T_2=T_a\cdot\frac{e^{-\frac{T}{T_a}}\cdot\left(2-e^{-\frac{T}{T_a}}\right)+e^{-\frac{T}{2\cdot T_a}}}{e^{-\frac{T}{T_a}}+e^{-\frac{T}{2\cdot T_a}}}; \quad (51)$$

$$T_3=T\cdot\left(2-e^{-\frac{T}{T_a}}\right)\cdot\left[\frac{1}{2}+\left(\frac{T_2}{T_a}-1\right)\cdot\frac{e^{-\frac{T}{2\cdot T_a}}-e^{-\frac{T}{T_a}}}{1-e^{-\frac{T}{T_a}}}\right]. \quad (52)$$

For the given parameters of the anchor circuit of the electric motor, the values of the time constants of the current regulator are obtained: the differentiating part – $T_2 = 12{,}45\cdot10^{-3}$ s; integrating part – $T_3=0{,}56\cdot10^{-3}$ s.

For experimental studies of the considered system of automatic regulation of

the anchor current of a braked electric motor, a simulation model was created in the MATLAB environment, presented in Fig. 7.

The input circuit of the model consists of a voltage source DCV, its internal resistance R1 and capacitor C. The converter contains a power key, implemented on the IGBT1 transistor, and a return diode Diode. The anchor circuit of the electric motor on the model is presented as a series RL connection, designated as R, and a current shunt on the resistor R2. The converter control system contains a reference signal generator GPN and a comparator. The automatic anchor current control system has a source of the reference signal $U_q = U_y$, a source of input action Stap1 current regulator Transfer Fcn1 and a feedback link Transfer Fcn2. For visual study of transient processes, an oscilloscope Skope1 is used.

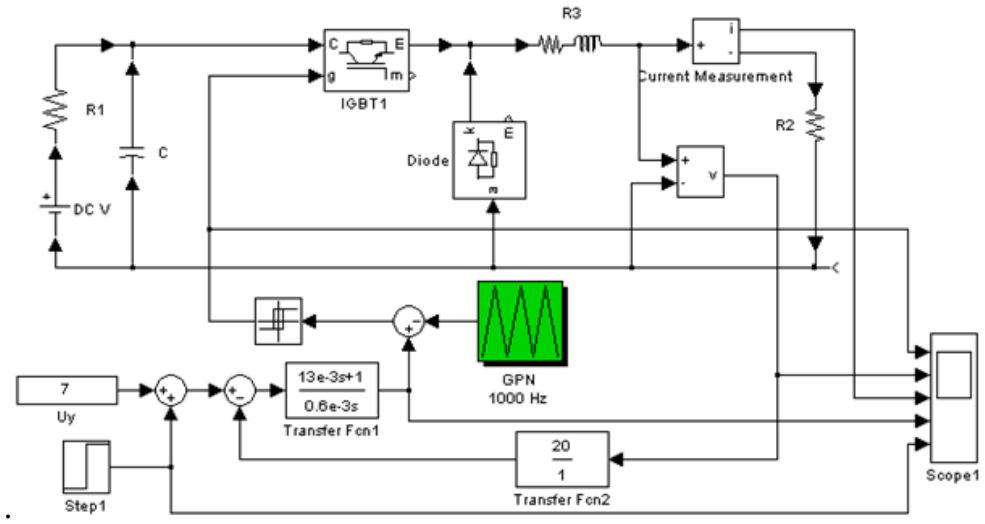


Fig. 7. Simulation model of the automatic control system of anchor current

Fig. 8 shows oscillograms of transient processes of the anchor current control system configured for the conditions of a finite duration process.

Analysis of oscillograms shows that the transient process ends in two clock intervals of the pulse voltage converter, which corresponds to the order of the system.

Analysis of the dynamic processes of the considered system confirms the correctness of the analytical results obtained in the article.

Conclusions. On the basis of the conducted research, the following conclusions can be drawn:

– the effectiveness of using the generalized derivative method for obtaining pulse models of a pulsed DC voltage converter with pulse-width modulation in continuous current mode has been demonstrated;

– the obtained pulse models make it possible to: accurately describe the dynamic processes in automatic control systems with a pulsed DC voltage convert-er; calculate regulator parameters to achieve maximum response speed;

– the practical significance of the theoretical principles presented in the article is confirmed by the results of a study conducted using a simulation model in the MATLAB environment, representing an automatic armature current control system of an electric motor configured for a finite-duration process.

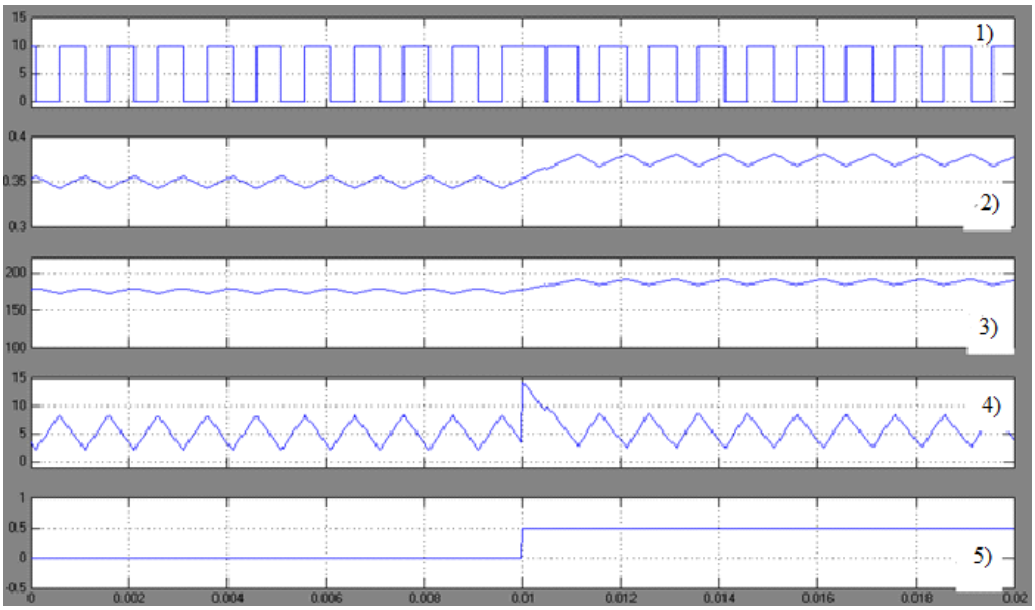


Fig. 8. Oscillograms of transient processes:
1 – IGBT transistor control signal; *2* – shunt voltage R3; *3* – armature current of the electric motor;
4 – output signal of the current regulator Transfer Fcn1; *5* – external disturbance

Reference

1. Patkar F., Jidin A., Levi E., Jones M. Performance comparison of symmetrical and asymmetrical six-phase open-end winding drives with carrier-based PWM. *2017 6th International Conference on Electrical Engineering and Informatics (ICEEI).* 2017. P. 1–6. DOI: 10.1109/ICEEI.2017.8312446.

2. Sivarani T. S., Joseph Jawhar S. Sawtooth carrier based Random PWM technique for AC drives. *2015 International Conference on Control, Instrumentation, Communication and Computational Technologies (ICCICCT).* 2015. P. 818–820. DOI: 10.1109/ICCICCT.2015.7475391.

3. Fahad A. H., Reza M. S. Single-phase shunt active power filter using parabolic PWM for current control. *2019 IEEE 7th International Conference on Smart Energy Grid Engineering (SEGE).* 2019. P. 134–138. DOI: 10.1109/SEGE.2019.8859868.

4. Wang X., Liu S., Li Q. Research on control strategy of PWM rectifier technology based on DSP. *2017 IEEE International Conference on Information and Automation (ICIA).* 2017. P. 1050–1053. DOI: 10.1109/ICInfA.2017.8079057.

5. Yingchao Z., Zhengming Z., Ting L., Liping J. An integrated control method for three-level NPC based PWM rectifier-inverter. *The 2nd International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems.* 2010. P. 616–620. DOI: 10.1109/PEDG.2010.5545876.

6. Lee J.-S., Lee K.-B. Carrier-based discontinuous PWM method for Vienna rectifiers. *IEEE Transactions on Power Electronics.* 2015. Vol. 30, Iss. 6. P. 2896–2900. DOI: 10.1109/TPEL.2014.2365014.

7. Han P., Wang Y., Peng X., He X., Shu Z., Gao S. Current-sharing performance of an advanced co-phase traction power substation system based on cascade-parallel converter. *2017 IEEE 3rd International Future Energy Electronics Conference and ECCE Asia (IFEEC 2017 - ECCE Asia).* 2017. P. 1932–1937. DOI: 10.1109/IFEEC.2017.7992345.

8. Messina A., Giannoccaro N. I., Gentile A. Experimenting and modelling the dynamics of pneumatic actuators controlled by the pulse width modulation (PWM) technique. *Mechatronics.* 2005. Vol. 15, Iss. 7. P. 859–881. DOI: 10.1016/j.mechatronics.2005.01.003.

9. Venkataramanan G., Wang B. Dynamic modeling and control of three phase pulse width modulated power converters using phasors. *2004 IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference.* 2004. P. 2822–2828. DOI: 10.1109/PESC.2004.1355281.

10. Suraj G. O., Trivedi N. Comparative analysis of PWM based front end rectifier with different modulation techniques. *2019 IEEE 5th International Conference for Convergence in Technology (I2CT).* 2019. P. 1–6. DOI: 10.1109/I2CT45611.2019.9033862.

11. Shcherbak Y. V., Ivakina E. Y. Dynamic characteristics of a rectifier with pulse-width modulation. *Technical Electrodynamics.* 2014. Iss. 3. P. 47–51.

12. Shcherbak Y. V., Ivakina K. Y. Fundamentals of the theory of automatic regulation of electromechanical systems. Kharkiv: O. M. Beketov NUUEKh. 222 p.

13. Ivakina K. Y. Analysis of dynamic processes of the automatic voltage regulation system of the converter with PWM. *Collected scientific works of Ukrainian state academy of railway transport.* 2013. Iss. 142. P. 151–156. DOI: 10.18664/1994-7852.142.2013.84611.

14. Shcherbak Y. V., Ivakina K. Y. Features of dynamic characteristics of regulation systems with one-sided and two-sided pulse-width modulations. *Technical Electrodynamics.* 2023. Iss. 2. P. 9–20. DOI: 10.15407/techned2023.02.009.

15. Shcherbak Y. V., Ivakina K. Y., Panchenko V. V. Pulsation factor of the automatic control system with two-way pulse-width modulation. *Collected scientific works of Ukrainian state academy of railway transport.* 2015. Iss. 153. P. 113–120. DOI: 10.18664/1994-7852.153.2015.64336.

16. Juri I. E., Eliahu I. Sampled – Data control systems. New York: John Wiley &Sons, INS, 1963. 453 p.

17. Saini D. K., Reatti A., Kazimierczuk M. K. Average current-mode control of buck dc-dc converter with reduced control voltage ripple. *IECON 2016 – 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society.* 2016. P. 3270–3275. DOI: 10.1109/IECON.2016.7793204.

18. Wu H. Stability analysis and control of DC-DC converters using nonlinear methodologies. UK: School of Electrical and Electronic Engineering, Newcastle University, 2016. 171 p. URL: https://core.ac.uk/download/pdf/153780662.pdf.

Shcherbak Yakiv Vasyl′ovych, Doctor of Science (Tech.), Professor, Professor of Department of Automated Electromechanical Systems, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute».
E-mail: yvsh47@gmail.com. ORCID ID: 0000-0002-5609-2528.
Ivakina Kateryna Yakivna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Department of Power Supply Systems and Urban Power Consumption, O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. E-mail: ivakina.kat@gmail.com. ORCID ID: 0000-0002-4315-6406.
Nerubatskyi Volodymyr Pavlovych, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Department of Electrical Energetics, Electrical Engineering and Electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: +38 (095) 045-78-01. E-mail: NVP9@i.ua. ORCID ID: 0000-0002-4309-601X.
Щербак Яків Васильович, доктор технічних наук, професор, професор кафедри автоматизованих електромеханічних систем, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут».
E-mail: yvsh47@gmail.com. ORCID ID: 0000-0002-5609-2528.
Івакіна Катерина Яківна, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри систем електропостачання та електроспоживання міст, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова.
E-mail: ivakina.kat@gmail.com. ORCID ID: 0000-0002-4315-6406.
Нерубацький Володимир Павлович, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Український державний університет залізничного транспорту.
Тел.: +38 (095) 045-78-01. E-mail: NVP9@i.ua. ORCID ID: 0000-0002-4309-601X.

Статтю прийнято 13.06.2025 р.

УДК 656.13:004.9

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ОПЕРАЦІЙ КРОС-ДОКІНГУ ДЛЯ МІЖНАРОДНИХ АВТОМОБІЛЬНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ НА ОСНОВІ РОЗРОБЛЕННЯ СПІЛЬНИХ ОПЕРАЦІЙНИХ ГРАФІКІВ

Канд. техн. наук О. П. Калініченко, асп. В. В. Севідова

IMPROVING THE EFFICIENCY OF CROSS-DOCKING OPERATIONS IN INTERNATIONAL ROAD TRANSPORTATION BASED ON THE DEVELOPMENT OF JOINT OPERATIONAL SCHEDULES

PhD (Tech.) O. P. Kalinichenko, postgraduate student V. V. Sevidova

DOI: https://doi.org/10.18664/1994-7852.212.2025.336554

Анотація. *У статті досліджено проблему підвищення ефективності міжнародних автомобільних вантажних перевезень через удосконалення процесів управління на логістичних центрах (ЛЦ), що працюють за технологією крос-докінг. Проаналізовано основні проблемні аспекти, що виникають з обробленням дрібних партій вантажів, зокрема необхідність жорсткої синхронізації матеріальних потоків, обмеженість часових та інфраструктурних ресурсів, а також інформаційну непрозорість між учасниками ланцюга постачання.*

Запропоновано підхід для розв'язання цих проблем, базований на розробленні та впровадженні спільних операційних графіків одночасної роботи транспортних засобів і навантажувально-розвантажувальних постів. Метою розроблення таких графіків є мінімізація непродуктивних простоїв усіх залучених ресурсів, скорочення загального циклу обробки вантажу та підвищення пропускної спроможності логістичного центру.

Описано інформаційну систему, реалізовану у вигляді програмного продукту, для автоматизованої побудови та оптимізації спільних операційних графіків. Продемонстровано основні функціональні можливості розробленого інструментарію: моделювання на основі дискретно-подієвого підходу, динамічне призначення завдань на ресурси, візуалізація розкладів у вигляді діаграм Ганта і розрахунок головних показників ефективності.

Ключові слова*: транспортні технології, міжнародні перевезення, крос-докінг, спільний операційний графік, оптимізація.*

Abstract. *This article examines the important task of improving the operational efficiency of international road freight transport by optimising complex processes in cross-docking logistics centres. It provides an in-depth analysis of the inherent difficulties in handling less-than-truckload shipments, focusing on three main obstacles: the need for precise coordination between incoming and outgoing freight flows, significant constraints imposed by available time and physical infrastructure (such as docking areas), and the widespread problem of information silos that hinder transparency in the supply chain. To overcome these obstacles, the study presents and validates a new methodological approach focused on the creation and execution of integrated joint operational schedules. This system is designed to coordinate the joint actions of all key resources, namely delivery vehicles and loading/unloading docks (LUB). The main goal of implementing this synchronised planning system is to significantly reduce unproductive downtime for both vehicles and terminal resources, significantly reduce the end-to-end cargo handling cycle, and significantly increase the overall throughput of the logistics centre. The developed software uses discrete event simulation to*

model the dynamic environment of the logistics centre, allowing for dynamic resource and task allocation. Its main functions include the automatic creation of optimised schedules, the visualisation of these plans using dynamic Gantt charts for intuitive management, and the reliable calculation of key performance indicators such as vehicle downtime, LUB utilisation rate and total cargo handling time. This research provides a valuable practical tool to support decision-making for logistics managers, giving them advanced planning and control capabilities to build more sustainable, efficient and competitive international supply chains.

Keywords: *transport technologies, international transportation, cross-docking, joint operational schedule, optimisation.*

Вступ. В умовах глобалізації економіки та інтенсифікації міжнародної торгівлі ефективність управління ланцюгами постачання стає головним фактором конкурентоспроможності підприємств. Для міжнародних перевезень вантажів, як невід'ємна складова цих ланцюгів, характерна значна складність, зумовлена великими відстанями, необхідністю перетину державних кордонів, відмінностями в транспортній інфраструктурі та нормативно-правовому регулюванні різних країн. Автомобільний транспорт, незважаючи на свою гнучкість і можливість доставлення «від дверей до дверей», особливо чутливий до цих факторів.

Одним із найпрогресивніших методів оптимізації в логістиці є технологія крос-докінгу, яка передбачає швидке переміщення товарів через складський термінал із мінімальним або нульовим часом зберігання [1]. Ця стратегія особливо актуальна для міжнародних перевезень, де логістичні центри (ЛЦ) є основними вузлами для консолідації дрібних партій вантажів для подальшого відправлення магістральним транспортом або, навпаки, для деконсолідації великих партій для доставлення кінцевим споживачам.

Однак практична реалізація крос-докінгових операцій стикається з низкою суттєвих викликів. Необхідність жорсткої синхронізації вхідних і вихідних матеріальних потоків, обмеженість ресурсів (навантажувально-розвантажувальні пости, персонал, техніка) і вплив стохастичних факторів (затримки на митниці, зміни в дорожній обстановці) часто призводять до виникнення «вузьких місць», простоїв транспортних засобів і, як наслідок, зниження ефективності та зростання витрат. У зв'язку з цим розроблення науково обґрунтованих методів та інструментів для координації і планування крос-докінгових операцій є надзвичайно актуальним завданням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Ефективне функціонування логістичних центрів є критично важливим для забезпечення стійкості та конкурентоспроможності міжнародних ланцюгів постачань. Основним елементом операційної діяльності таких центрів є організація роботи навантажувально-розвантажувальних постів (НРП), де відбувається фізичне передавання вантажів між різними видами транспорту. Розроблення оптимальних графіків спільної роботи НРП дає змогу мінімізувати час простою транспортних засобів, скоротити операційні витрати, підвищити пропускну спроможність термінала і, як наслідок, забезпечити своєчасність доставлення в рамках міжнародних перевезень.

Основою для розроблення ефективних графіків є математичне моделювання. Дослідники активно застосовують методи дослідження операцій для формалізації завдання. Часто проблема зведена до варіацій задачі планування для паралельних машин, де навантажувальні пости виступають у ролі «машин», а вантажівки, що прибувають, — у ролі «робіт», які необхідно виконати.

У роботах, присвячених оптимізації роботи крос-докінгових терміналів, що є невід'ємною складовою багатьох логістичних центрів для міжнародних перевезень, завдання ускладнено необхідністю синхронізації вхідних і вихідних потоків. Наприклад, автори досліджень [2, 3] пропонують моделі змішаного цілочисельного лінійного програмування (MILP), спрямовані на мінімізацію не лише часу, але й енергоспоживання та операційних витрат.

Інші дослідження [4, 5] сконцентровані на мінімізації загального часу завершення всіх операцій. Розглядають моделі, що враховують часові вікна прибуття і відправлення транспортних засобів, наявність різних типів постів (для різних видів вантажів або транспорту) та обмеження на ресурси (навантажувачі, персонал).

Більшість досліджень присвячена так званим системам попереднього запису для вантажівок (Truck Appointment Systems, TAS). Ці системи дають змогу транспортним компаніям заздалегідь бронювати часові слоти для прибуття на термінал. Це перетворює стохастичний процес прибуття транспорту на детермінований, що значно спрощує планування роботи НРП. Як зазначено в роботі [6], TAS є основним інструментом для згладжування пікових навантажень, зменшення заторів біля логістичних хабів і підвищення точності операційного планування. Ефективність таких систем безпосередньо залежить від алгоритмів, що розподіляють доступні слоти, ураховуючи пропускну спроможність постів і пріоритетність вантажів.

Для аналізу та оптимізації систем, де неможливо повністю уникнути випадковості, застосовують теорію масового обслуговування. Моделювання НРП як систем масового обслуговування дає змогу оцінити такі параметри, як середній час очікування в черзі, коефіцієнт завантаження постів та ймовірність відмови в обслуговуванні.

Новітнім трендом у логістиці є горизонтальна співпраця [7], коли кілька логістичних операторів або перевізників об'єднують ресурси для підвищення загальної ефективності. У контексті роботи НРП це може виражено у спільному використанні постів або координації графіків прибуття для оптимізації завантаження. Дослідження показують, що така співпраця, підкріплена симуляційним моделюванням, значно скорочує порожні пробіги та час простою. Упровадження спільних інформаційних платформ для обміну даними про заплановані перевезення в режимі реального часу є технологічною основою для такої координації. Це особливо актуально для міжнародних перевезень, де задіяно багато стейкхолдерів.

Ураховуючи складність і динамічність процесів у логістичних центрах, аналітичні методи не завжди здатні адекватно описати систему. Тому широкого розповсюдження набуло імітаційне моделювання [8, 9]. Створення цифрових моделей (або «цифрових двійників») термінала дає змогу тестувати різні сценарії та правила розроблення графіків без втручання в реальні операції [10]. Можна варіювати кількість задіяних постів, змінювати пріоритети обслуговування, тестувати різні політики реагування на збої (наприклад запізнення транспортного засобу). Роботи з імітаційного моделювання часто спрямовані на оптимізацію процесів навантаження шляхом зменшення часу очікування та підвищення пропускної спроможності.

Визначення мети та завдання дослідження. Головною метою дослідження є підвищення ефективності виконання міжнародних автомобільних перевезень вантажів шляхом вдосконалення процесів управління крос-докінговими операціями на логістичних центрах за рахунок розроблення та застосування інформаційної технології побудови спільних операційних графіків роботи.

Основна частина дослідження. Ефективна реалізація крос-докінгу як

складового елемента загального процесу міжнародної доставки вантажів (рис. 1) потребує злагодженості усіх учасників процесу від постачальників до кінцевих отримувачів. Центральним елементом такої координації є логістичний центр, а основним інструментом управління – спільний операційний графік. На противагу хаотичній роботі (рис. 2), розроблення узгоджених графіків (рис. 3) передбачає призначення кожному транспортному засобу конкретного часового вікна («тайм-слоту») для прибуття і виконання операцій, що дає змогу синхронізувати прибуття перевізників дрібних партій вантажу з наявністю вільних НРП і графіком підготовки магістральних автомобілів.

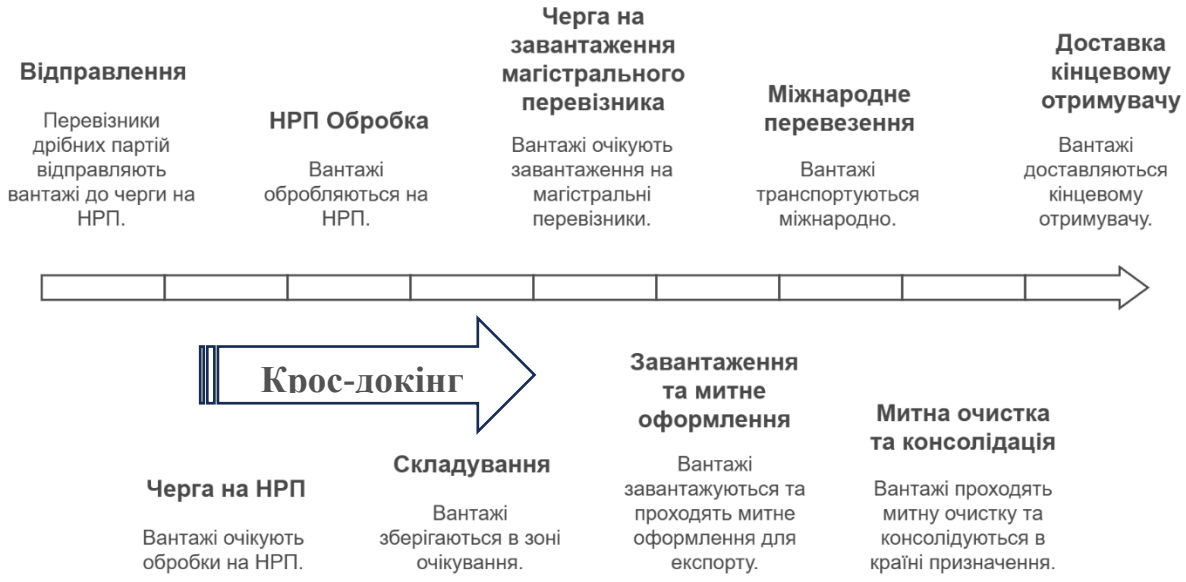


Рис. 1. Місце крос-докінгу в загальній системі міжнародного доставлення вантажів

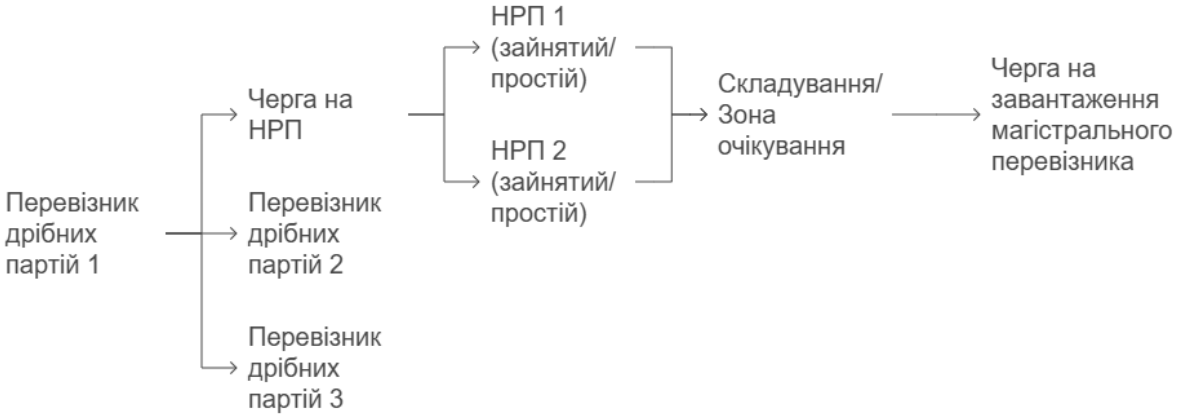


Рис. 2. Схема незлагодженої роботи ЛЦ у разі крос-докінгу

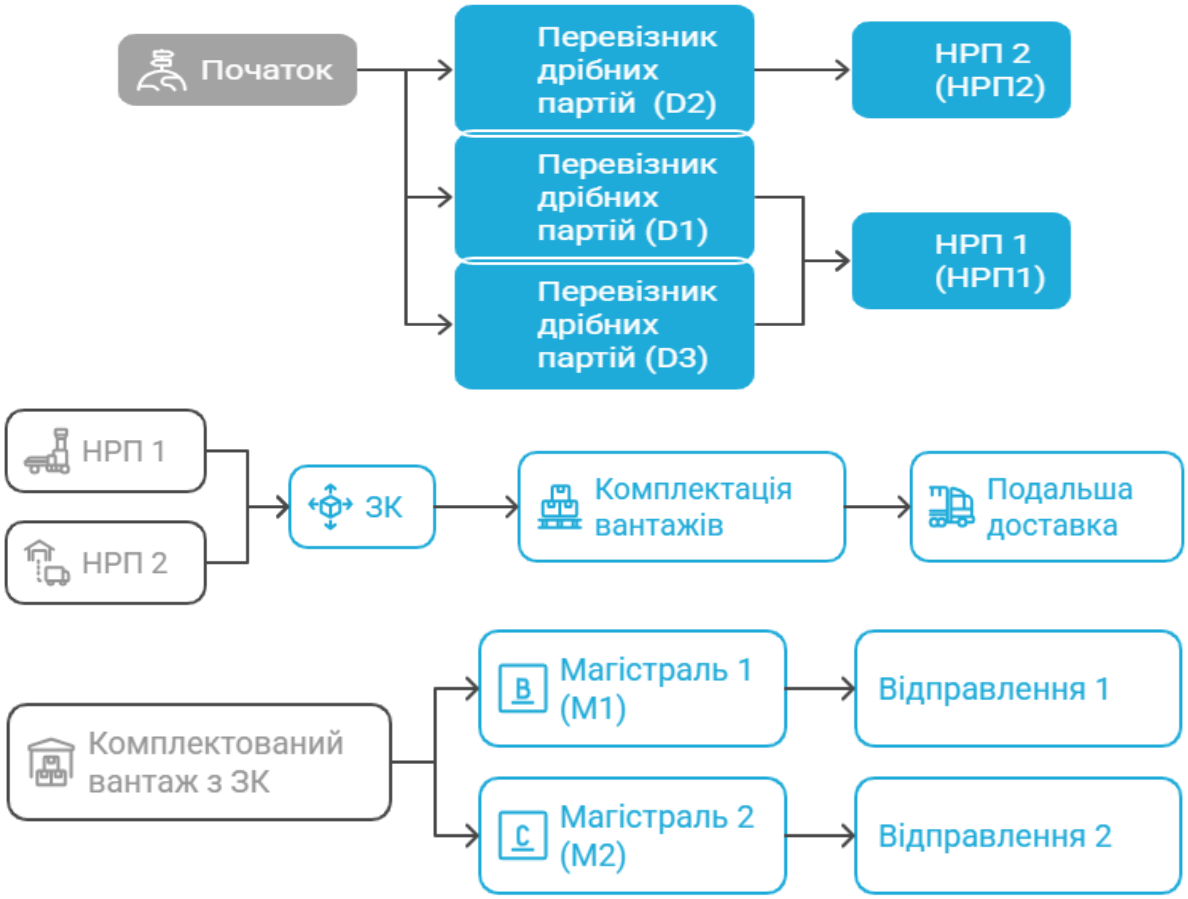


Рис. 3. Схема роботи за узгодженими операційними графіками

Переваги такого переходу від хаосу до порядку є комплексними та вимірними. Насамперед усунено довгі черги та простої транспорту, оскільки водії прибувають у точно визначений час, чим можна оптимізувати використання внутрішніх ресурсів хабу: персонал, навантажувачі та НРП не простоюють і не працюють в авральному режимі, а завантажені рівномірно протягом дня. Як наслідок, значно прискорено обробку вантажів, що критично для дотримання жорстких графіків відправлення магістрального транспорту. Такий підхід дає змогу розв'язати головні проблеми, виявлені під час аналізу (табл. 1).

Для управління складними та динамічними процесами крос-докінгу потрібні високоточні інструменти координації. Узгоджені операційні графіки є тим центральним механізмом, що гармонізує роботу всіх елементів системи: від прибуття автомобілів, що доставляють дрібні партії, до своєчасного відправлення консолідованих вантажів магістральним транспортом.

Таблиця 1

Проблемні аспекти крос-докінгу та ІТ-орієнтовані напрями їх вирішення

Проблемний аспект крос-докінгу	Характеристика та потенційні негативні наслідки	Аспекти діяльності, що зазнають негативного впливу	Потенційні напрями вирішення за допомогою розроблюваної ІТ
Необхідність жорсткої синхронізації вхідних і вихідних матеріальних потоків	Потреба в чіткому часовому узгодженні прибуття ТЗ, що доставляють дрібні партії, і графіків підготовки/відправлення магістральних ТЗ	Час виконання операцій, ефективність використання транспорту, завантаженість ресурсів ЛЦ, вартість логістики	Розроблення модуля динамічного планування та оптимізації спільних операційних графіків; система автоматичних сповіщень про статус прибуття/відправлення ТЗ
	Простої ТЗ, зрив графіків відправлення, зниження пропускної спроможності ЛЦ, ризик накопичення вантажу		
Обмежений часовий ресурс на виконання операцій	Високі вимоги до швидкості виконання всіх технологічних операцій (розвантаження, ідентифікація, сортування, комплектація, завантаження) в умовах мінімального буферного часу	Продуктивність праці, пропускна спроможність НРП, якість обслуговування (швидкість), операційні витрати (персонал, обладнання)	Модуль оптимального розподілу завдань між НРП; інструменти моніторингу продуктивності в реальному часі; підтримка ухвалення рішень для диспетчера щодо пріоритезації операцій
	Необхідність високої продуктивності НРП і персоналу, ризик затримок за пікових навантажень		
Висока точність операцій сортування та комплектації	Необхідність безпомилкової ідентифікації, сортування та переміщення численних дрібних партій від різних відправників для різних одержувачів	Якість логістичного сервісу, репутація ЛЦ, фінансові втрати (компенсації, повернення), ефективність використання складського простору (зони сортування)	Інтеграція з системами автоматичної ідентифікації (штрих-коди, RFID); модуль контролю відповідності вантажу та документації; ведення електронного обліку всіх операцій
	Висока вартість помилки (неправильне відправлення, втрати), потреба в надійних системах контролю		

Принцип функціонування полягає в переході від реактивного управління («обслуговування за фактом прибуття») до проактивного планування. Замість

формування стихійних черг система на основі вхідних даних про плановані поставки та відправлення розраховує оптимальну послідовність дій для кожного ресурсу (автомобіля та НРП) і резервує для них часові слоти. Основні переваги впровадження графіків:

– мінімізація простоїв – це найбільш очевидний і значущий ефект. Графік усуває ситуацію, коли автомобіль прибув, але всі НРП зайняті, або НРП вільний, але ще нема автомобіля для обслуговування. Скорочення простоїв призводить до прямої економії пального, зменшення витрат на амортизацію та оплату праці водіїв за час очікування;

– рівномірне завантаження ресурсів. Хаотичне прибуття вантажів призводить до періодів пікового навантаження, що чергуються з періодами простою. Графіки дають змогу «вирівняти» це навантаження протягом робочої зміни, забезпечуючи ритмічність виконання операцій і підвищуючи коефіцієнт використання обладнання та персоналу. Це наочно демонструє порівняльний графік завантаження НРП (рис. 4). Запровадження графіка підвищує середнє завантаження постів з 53.1 до 76.2 %, що визначено як відношення часу роботи до загального часу, що включає час простою НРП (в ідеальних умовах рівень завантаження складає 100 %) та усуває екстремальні піки і провали;

– скорочення загального циклу обробки вантажу. Загальний час обробки на ЛЦ складається з послідовно-паралельних операцій. Розроблення узгоджених графіків спрямовано на мінімізацію часу очікування магістральним автомобілем та оптимізацію паралельності виконання операцій, що призводить до скорочення загального часу;

– підвищення пропускної спроможності ЛЦ є інтегральним результатом попередніх переваг. Із підвищенням коефіцієнта використання НРП і зниження середнього часу обробки логістичний центр може обробити більший обсяг вантажу за ту саму одиницю часу, що безпосередньо впливає на його прибутковість.

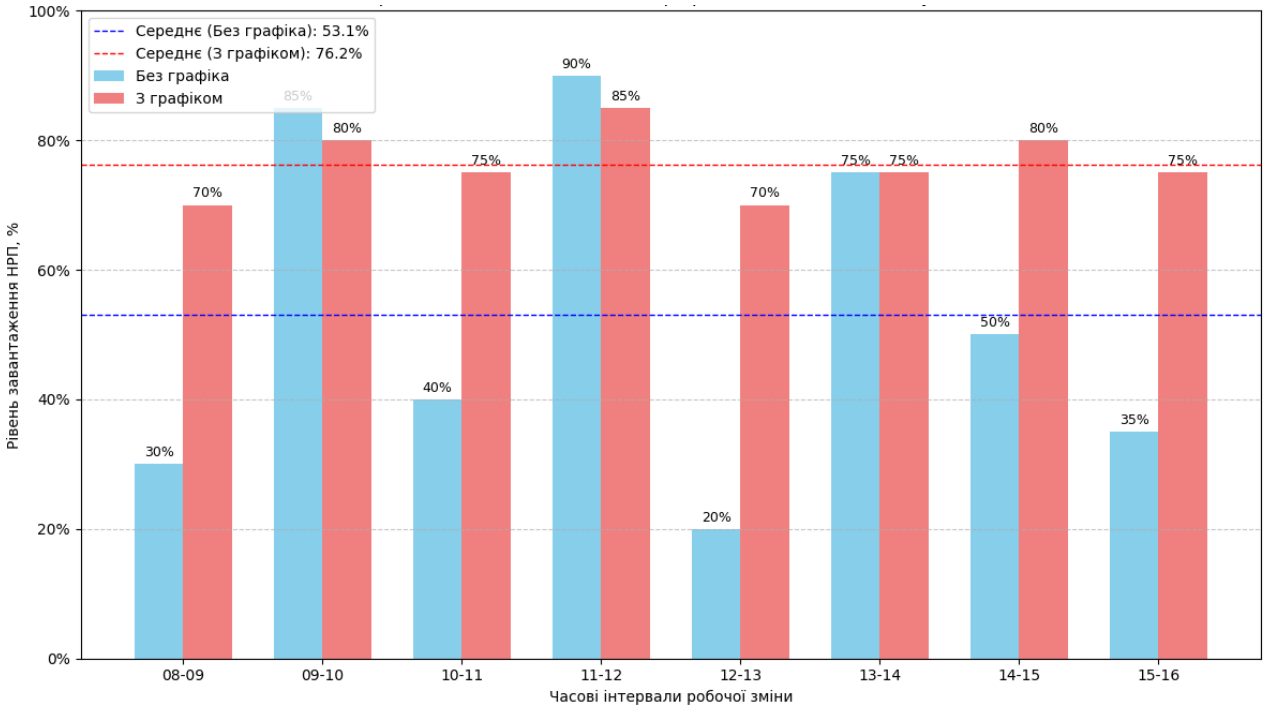


Рис. 4. Порівняння завантаження НРП за різних підходів для планування

Для автоматизації процесу планування було розроблено програмний продукт для координації роботи учасників транспортного процесу. Він є цифровим ядром, що дає змогу реалізувати узгоджену роботу всіх учасників транспортного процесу – від дрібних перевізників до персоналу складу та магістральних перевізників. Мета розробленої програми – надати логістам і диспетчерам інструмент для моделювання, складання та аналізу ефективності операційних графіків спільної роботи учасників транспортного процесу. Програма реалізована мовою Python і має графічний інтерфейс користувача (рис. 5).

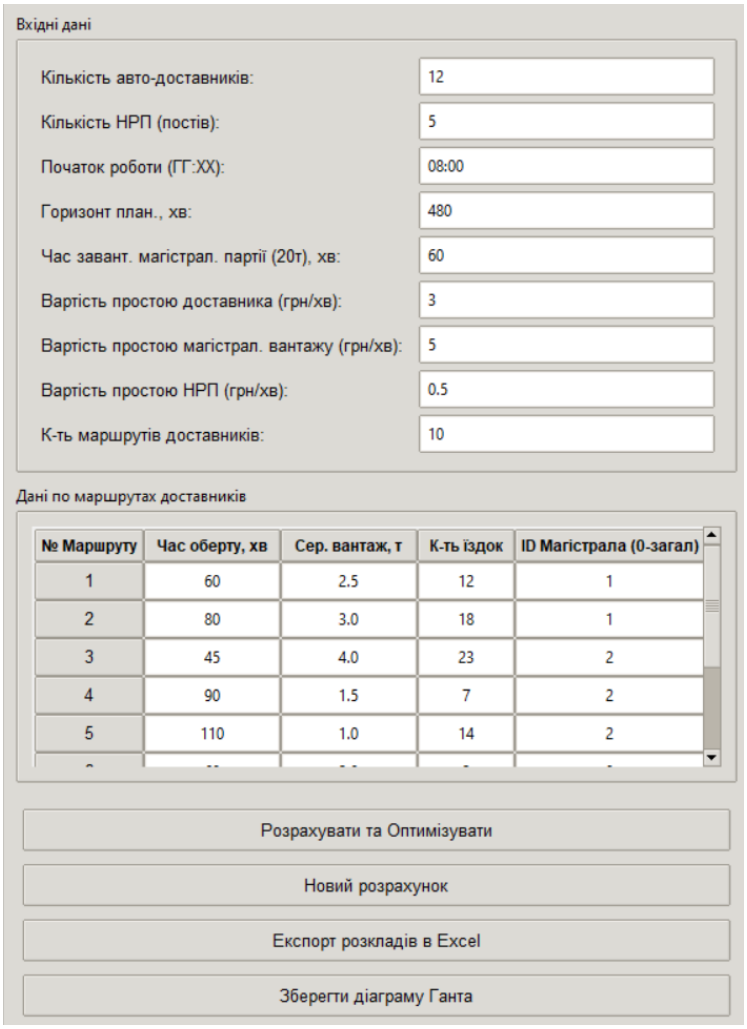


Рис. 5. Інтерфейс запропонованого цифрового рішення для введення вхідних даних

Основні функціональні можливості:

– введення та управління вхідними даними. Користувач вводить параметри системи: кількість автомобілів-доставників, кількість НРП, час початку і тривалість зміни, нормативи часу на операції, вартісні показники простоїв, а також детальні дані з кожного маршруту доставлення (час оберту, середня вага, кількість рейсів, прив'язка до магістрального відправлення);

– побудова та оптимізація розкладів. В основі лежить алгоритм дискретно-

подієвого моделювання. Система моделює послідовність подій на ЛЦ (прибуття автомобілів, звільнення НРП, завершення операцій) і динамічно призначає завдання на вільні ресурси, мінімізуючи час очікування;

– візуалізація та аналіз результатів. Програма генерує детальні текстові розклади для кожного ресурсу (автомобілів, НРП) і візуалізує загальний графік спільної роботи у вигляді діаграми Ганта (рис. 6). Це дає змогу наочно побачити періоди зайнятості та простою, виявити конфлікти і «вузькі місця»;

– розрахунок показників ефективності. Автоматично розраховано сумарний час і вартість простоїв для кожної категорії ресурсів, а також загальну вартість невиробничих втрат.

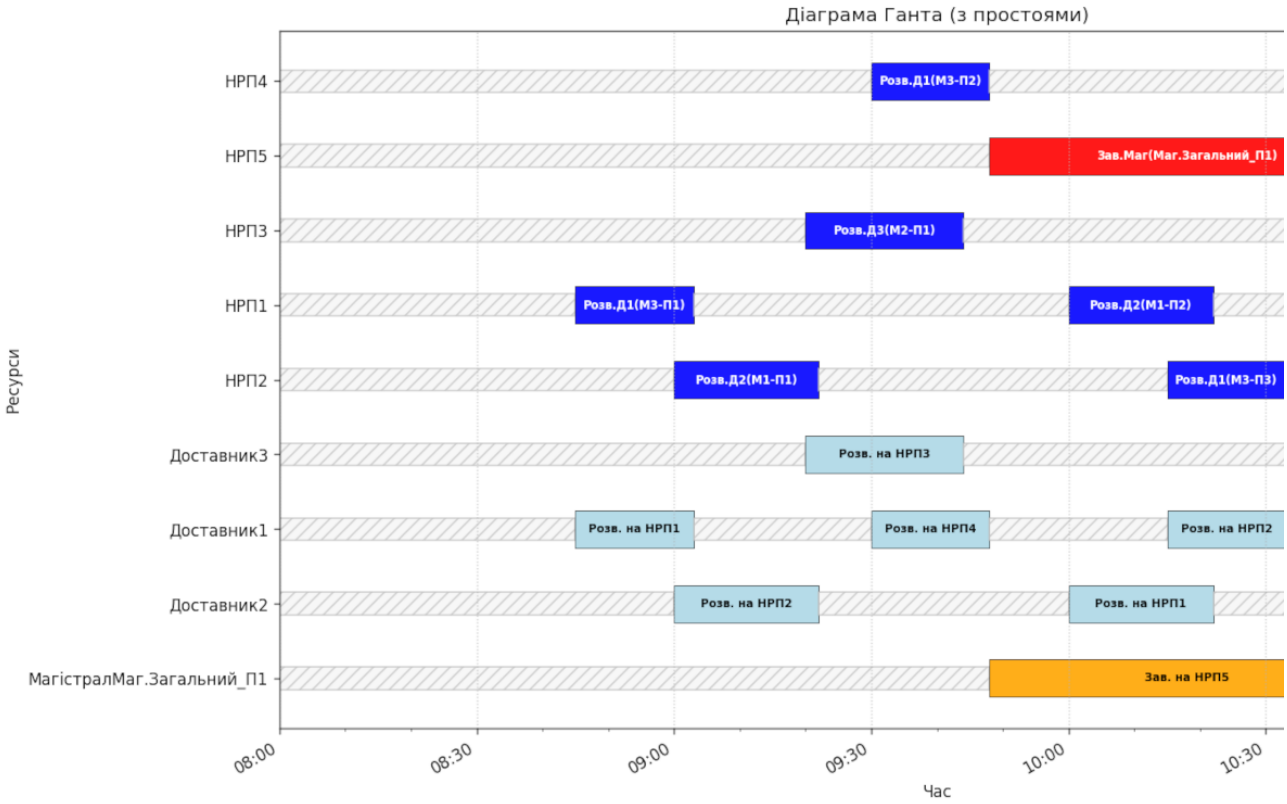


Рис. 6. Фрагмент згенерованої діаграми Ганта

Діаграма Ганта (рис. 6) є основним інструментом візуалізації. На ній по осі ординат відкладені ресурси (НРП1, НРП2, магістральні автомобілі М1, автомобілі-доставники Д2, Д3), а по осі абсцис – час. Кольорові блоки показують виконання певних операцій (бірюзовий – прибуття, сірий – очікування, синій – розвантаження, помаранчевий – завантаження, зелений – відправлення). Це дає змогу диспетчеру миттєво оцінити поточний стан і динаміку роботи всього логістичного центру.

Застосування розробленої інформаційної технології дає змогу перейти від інтуїтивного, реактивного управління до проактивного планування, що базовано на об'єктивних розрахунках і моделюванні.

Висновки. Проведене дослідження підтверджує, що головною проблемою для організації міжнародних перевезень із

використанням технології крос-докінг є недостатня координація та синхронізація роботи численних учасників і ресурсів логістичного центру. Це призводить до значних непродуктивних простоїв, зниження пропускної спроможності та збільшення операційних витрат.

1. Запропоновано ефективний підхід для розв'язання цієї проблеми, що полягає в розробленні та впровадженні спільних операційних графіків роботи. Доведено, що такий підхід дає змогу суттєво підвищити коефіцієнт використання навантажувально-розвантажувальних постів, скоротити загальний цикл обробки вантажу та мінімізувати простої транспортних засобів.

2. Розроблено програмний продукт для автоматизації процесу побудови та оптимізації таких графіків. Інструментарій, базований на методі дискретно-подієвого моделювання, дає змогу враховувати динаміку процесів, обмеженість ресурсів і технологічні залежності між операціями.

3. Наочна візуалізація розкладів у вигляді діаграм Ганта і автоматичний розрахунок основних показників ефективності перетворюють розроблений продукт на дієву систему підтримки ухвалення рішень для диспетчерів і логістів.

4. Упровадження запропонованого підходу на практиці дасть змогу логістичним центрам досягти значного економічного та операційного ефекту: знизити собівартість обробки вантажів, підвищити надійність і своєчасність доставлення і, як наслідок, зміцнити свої конкурентні позиції на ринку міжнародних транспортних послуг.

Список використаних джерел

1. Kalinichenko O., Sevidova V. Determining the number of vehicles for cross-docking in condi-tions of uncertainty and limited resources. *Municipal economy of cities*. 2025. Vol. 1, no. 189. P. 475–481. URL: https://doi.org/10.33042/2522-1809-2025-1-189-475-481.

2. Scheduling trucks and storage operations in a multiple-door cross-docking terminal considering multiple storage zones / T. Chargui et al. *International Journal of Production Research*. 2020. P. 1–25. URL: https://doi.org/10.1080/00207543.2020.1853843.

3. Shahmardan A., Sajadieh M. S. Truck scheduling in a multi-door cross-docking center with partial unloading – Reinforcement learning-based simulated annealing approaches. *Computers & Industrial Engineering*. 2020. Vol. 139. P. 106134. URL: https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.106134.

4. Methodology for the early analysis and evaluation of the resource efficiency of process chains for manufacturing hybrid structures / C. Symmank et al. *Procedia Manufacturing*. 2019. Vol. 33. P. 430–437. URL: https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.04.053.

5. A modified particle swarm optimization algorithm for a batch-processing machine scheduling problem with arbitrary release times and non-identical job sizes / H. Zhou et al. *Computers & Industrial Engineering*. 2018. Vol. 123. P. 67–81. URL: https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.06.018

6. Optimization for a Multi-Constraint Truck Appointment System Considering Morning and Evening Peak Congestion / B. Xu et al. *Sustainability*. 2021. Vol. 13, no. 3. P. 1181. URL: https://doi.org/10.3390/su13031181.

7. Abdelmagid A. M., Gheith M., Eltawil A. Scheduling External Trucks Appointments in Container Terminals to Minimize Cost and Truck Turnaround Times. *Logistics*. 2022. Vol. 6, no. 3. P. 45. URL: https://doi.org/10.3390/logistics6030045.

8. Захаров Д. С. Економічні переваги імітаційного моделювання транспортних коридорів в системах VISSIM та VISUM. *Український економічний часопис*. 2024. № 3. С. 38–41. URL: https://doi.org/10.32782/2786-8273/2023-3-6.

9. Імітаційне моделювання процесів логістичного забезпечення на основі транспортної задачі / D. Kotov та ін. *Journal of Scientific Papers «Social Development and Security»*. 2024. Т. 14, № 1. С. 218–228. URL: https://doi.org/10.33445/sds.2024.14.1.18.

10. Самостян В. Ефективне використання підходів для імітаційного моделювання логістичних процесів. *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті*. 2020. Т. 2, № 15. С. 127–133. URL: https://doi.org/10.36910/automash.v2i15.400.

Калініченко Олександр Петрович, кандидат технічних наук, доцент кафедри транспортних технологій, Харківський національний автомобільно-дорожній університет. ORCID iD: 0000-0002-9024-3668. Тел.: +38 (099) 046-55-95. E-mail: kttkap@gmail.com.
Севідова Вікторія Віталіївна, аспірант кафедри транспортних технологій, Харківський національний автомобільно-дорожній університет. ORCID iD: 0000-0003-4806-4743. Тел.: +38(050)605-07-13. E-mail: v.i.k.y.s.y.a067@gmail.com.

Kalinichenko Oleksandr, PhD (Tech). Associate Professor, department of transport technologies, Kharkiv National Automobile and Highway University. ORCID iD: 0000-0002-9024-3668. Tel.: +38 (099) 046-55-95. E-mail: kttkap@gmail.com.
Sevidova Viktoriia, postgraduate student, department of transport technologies, Kharkiv National Automobile and Highway University. ORCID iD: 0000-0003-4806-4743. Tel.: +38(050)605-07-13. E-mail: v.i.k.y.s.y.a067@gmail.com.

Статтю прийнято 19.06.2025 р.

ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ УКРАЇНСЬКОГО ДЕРЖАВНОГО УНІВЕРСИТЕТУ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

COLLECTION OF SCIENTIFIC WORKS OF THE UKRAINIAN STATE UNIVERSITY OF RAILWAY TRANSPORT

Випуск 212

«Збірник наукових праць УкрДУЗТ» включено до списку друкованих (електронних) періодичних видань, що внесені до Переліку наукових фахових видань України, у яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук (Наказ МОН України від 15.10.2019 р. № 1301).

Статті друкуються в авторській редакції мовою оригіналу.
Усі статті пройшли подвійне сліпе наукове рецензування.

Відповідальний за випуск Кальченко С. А.

Редактор Ібрагімова Н. В.

R30-06150 від 01.05.2025 р. Підписано до друку 01.07.2025 р.
Формат паперу А4. Папір писальний.
Умовн. друк. арк. 39,75. Тираж 50. Замовлення № .

Видавець Український державний університет залізничного транспорту,
61050, Харків-50, майдан Феєрбаха, 7.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 6100 від 21.03.2018 р.