



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 213

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 профіль: <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 № 8 від 22 вересня 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)
Мартинів І. Е., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Bureika G., dsc, professor (VG TU, 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 ХП)
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)
Тимофеев С. С., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Тимофеева 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)
Шарій 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 (НАУ ХАІ)
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)

- Князєв С. А., Князєва Г. О., Погрібний М. А., Терлецький О. С.* Спікання порошків із боруванням і силіціюванням на конструкційній вуглецевій сталі 7
- Воронін С. В., Мазєпа В. О., Афанасов Г. М., Орлюк Ю. К., Воронін М. О.* Оптимізація підбору моторних оливи до ДВЗ із застосуванням критерійного аналізу 15

Теплоенергетика (144)

- Burda Y. O., Pivnenko Y. O., Tiutiunyk L. I., Shepitchak V., Redko I. O.* Thermodynamic analysis of energy-efficient solutions in boiler plants and heat pumps considering quality control and energy certification in construction 24

Будівництво та цивільна інженерія (192)

- Тарадай О. М., Дяченко С. В.* Сучасні водяні системи опалення з двома джерелами теплопостачання 32
- Панкєєва А. М., Завальний О. В.* Регулювання просторового розвитку територій у рамках зони впливу агломерації 43
- Казімагомедов Ф. І., Вяткін К. І., Мороз Н. В., Селезньов М. М.* Використання трубобетонних конструкцій у реконструкції зруйнованих перекриттів великопанельних будинків 51
- Плугін А. А., Муригін М. А., Мусієнко С. М., Редько І. О., Геворкян Е. С.* Порівняльні дослідження впливу електричних потенціалів на корозійні процеси в залізничних шпалах із бетону зі сталевую та композитною арматурою 61

Геодезія та землеустрій (193)

- Шарий Г. І., Щепак В. В., Одарюк Т. С.* Організація та еколого-економічні особливості органічного вуглецевого землеробства на землях сільськогосподарського призначення 83
- Мамонов К. А., Гой В. В., Харів В. В.* ГІС у системі геопросторового моніторингу використання земель житлової та громадської забудови регіонів 92
- Хайнус Д. Д., Могильний С. Г., Винограденко С. О., Капінос Н. О.* Сучасні методи вищої геодезії та їх застосування в моніторингу деформацій земної поверхні 101

Залізничний транспорт (273)

- Ягун В. Г., Ягун К. В., Нерубацький В. П.* Особливості моделювання електромагнітних процесів в електротехнічних системах із силовими трансформаторами 116

Прилипка А. А., Індик С. В., Щебликіна О. В., Сіроклин І. М. Розроблення складної системи обробки інформації для електродепо метрополітену з використанням об'єктно-орієнтованого аналізу 129

Крашенінін О. С., Шапатіна О. О., Обозний О. М., Анацький О. О. Формування стратегії заміни ремонтного обладнання локомотивного депо в разі його зносу 139

Транспортні технології (275)

Сторчак О. О., Мельник О. М. Оптимізація контрольованого пуску турбомашини з урахуванням теплових і вібраційних обмежень 149

Хітров І. О. Сучасні тенденції автомобілізації та їхній вплив на розвиток транспортної інфраструктури 160

Подригало М. А., Абрамов Д. В., Коробко А. І. Оптимізація складських процесів у міжнародних логістичних хабах за рахунок використання багатовісних навантажувачів 171

МЕХАНІЧНА ІНЖЕНЕРІЯ (131, 132, 133)

УДК 539.23+621.793.79

**СПІКАННЯ ПОРОШКІВ ІЗ БОРУВАННЯМ І СИЛІЦІЮВАННЯМ
НА КОНСТРУКЦІЙНІЙ ВУГЛЕЦЕВІЙ СТАЛІ**

Канд. техн. наук С. А. Князєв, PhD Г. О. Князєва,
канд. техн. наук М. А. Погрібний, канд. фіз.-мат. наук О. С. Терлецький

**SINTERING OF POWDERS FOR BORONIZING AND SILICONIZATION
ON STRUCTURAL CARBON STEEL**

PhD (Tech.), doctoral student S. Kniaziev, PhD (Tech.) H. Kniazieva,
PhD (Tech.) M. Pohribnyi, PhD (in Physics and Mathematics) O. Terletskyi

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.213.2025.341817>

Анотація. У статті розглянуто аспекти підвищення ефективності борування та силіціювання в контексті скорочення тривалості процесу, зменшення пористості. Показано перспективні склади паст для насичення бором і кремнієм. Продемонстровано мікроструктури однофазного борованого шару та силіцидного шару на низьколегованій сталі. Шляхом інструментального інденування встановлено твердість $H_1 = 14,57$ ГПа, модуль Юнга $E = 293$ ГПа і показники тріщиностійкості $K_{1c} = 10,75$ МПа*м^{1/2} однофазного борованого шару. Реалізоване силіціювання, отримане з насиченням технічним кремнієм із додаванням 5 % (ваг.) хлористого амонію і 20 % інертного наповнювача (мертелі), дає змогу отримати товстий (200 мкм) низькопористий шар протягом п'яти годин обробки з мікротвердістю силіциду на поверхні H_{100} 25185 МПа.

Ключові слова: борування, силіціювання, наноінденування, мікротвердість, спікання, пористість.

Abstract. The article deals with aspects of improving the efficiency of boron and siliconization in the context of reducing the process duration and porosity. Promising compositions of pastes for saturation with boron and silicon are shown. The microstructures of a single-phase boron layer and a silicide layer on low-alloy steel are demonstrated. The highest porosity with signs of delamination is observed in the sample of boron from the paste 75 % B₄C + 9.75 % NaF + 10 % B + 3.5 % Cu₂O + + 1.5 % NH₄Cl, to a lesser extent, porosity is characteristic of layers on samples of boron from 65 % B₄C + 35 % CuCl₂; 75 % B₄C + 10 % NaF + 5 % Cu₂O + 10 % NH₄Cl; 75 % B₄C + + 10 % NaF + 5 % CuCl₂ + 10 % Al(OH)₃. The thickness of the diffusion layer on the boron sample from the paste of 5 % B₄C + 9.75 % NaF + 10 % B + 3.5 % Cu₂O + 1.5 % NH₄Cl is approximately 200 μm. On the sample of boron from 65 % B₄C + 35 % CuCl₂ paste, the layer thickness ranges from 100 to 150 microns, the layer thickness obtained by boron from 75 % B₄C + 10 % NaF + 5 % Cu₂O + + 10 % NH₄Cl paste is 100 microns with the exit of individual needles into the main structure of the metal by another 50 microns. The thickness of the layer obtained by boronizing from a paste of 75 % B₄C + 10 % NaF + 5 % CuCl₂ + 10 % Al(OH)₃ ranged from 200 to 150 microns. By instrumental indentation, the hardness, $H_1 = 14.57$ GPa, Young's modulus $E = 293$ GPa and crack resistance $K_{1c} = 10.75$ MPa*m^{1/2} of the single-phase boron layer were determined. The implemented siliconization, obtained at saturation from industrial silicon, with the addition of 5 % (w/w)

ammonium chloride and 20 % inert filler (merlins), allows to obtain a thick (200 μm) low-porous layer within 5 hours of processing with a microhardness of silicide on the surface of H_{100} of 25185 MPa. When using a fine fraction of silicon (30 μm), sintering of the crust on the surface was observed due to the intense silicon chloride transfer reaction and the accumulation of atomic silicon on the surface. The diffusion outflow of silicon deep into the material decreases, which also contributes to the formation of a sintered crust. Increasing the silicon grain size to 150 microns eliminates the problem of crusting, but some sintered silicon grains are still present on the surface.

Keywords: boronizing, siliconizing, nanoindentation, microhardness, sintering, porosity.

Вступ. У сучасному світі постійно зростають потреби щодо підвищення стійкості до зношування в екстремальних умовах, термостійкості, жаростійкості, жароміцності та хімічної стійкості матеріалів. Сталі займають міцні позиції в сегменті конструкційних матеріалів. У той же час нікель, ніобій, молібден, вольфрам, ванадій і кобальт є дорогими або навіть дефіцитними елементами, у тому числі і для легування. Тому актуальною залишається проблема модифікування поверхні, яка дає змогу використовувати технологічні і недорогі матеріали. Відомо, що технології хіміко-термічного дифузійного насичення є простими в реалізації. У статті розглянуто отримання боридних і силіцидних дифузійних шарів, а саме вплив процесів спікання порошку, що насичує.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Боридні і силіцидні шари тверді, крихкі і пористі (особливо пористими є силіцидні шари) [1, 2]. Існує безліч технологічних варіацій борування, основна роль яких пов'язана з інтенсифікацією процесу, що є логічним в аспекті підвищення енергоефективності методів обробки матеріалів [3-5]. Отримання силіцидних покриттів на сталях узагалі слабо відображено в сучасних публікаціях [6]. Тому метою роботи є подальший розвиток ефективності технологій насичення: розкриття впливу зернистості порошоків на процеси спікання, що ускладнюють процес насичення, скорочення часу обробки з 8 год до 5 – 1,5 год, боротьба з пористістю, особливо на силіцидних шарах.

Матеріали та методика. Дослідження проводились на сталі 40X (0,43 % C; 0,17 % Si; 0,53 % Mn; 0,8 % Cr; 0,01 % Ni; 0,011 % Cu; 0,013 % Al; 0,0011 % S; 0,0025 % P визначено оптико-емісійним спектрометром SPECTRO LAB LAVM11) ферито-перлітного класу з початковим дрібним ферито-перлітним зерном.

Перед насиченням усі зразки шліфували наждаковим папером зернистістю P100 і P320.

Борування проводили за температури 1000 °C протягом 1,5 год із пасти на основі порошку B_4C , аморфного бору, NaF, NH_4Cl , CuCl_2 , Cu_2O та $\text{Al}(\text{OH})_3$ у негерметичному контейнері. В окремих експериментах карбід бору використовували з різною зернистістю 50-60 мкм.

Силіцидне покриття отримано насиченням технічним кремнієм із додаванням 5 % (ваг.) хлористого амонію і 20 % інертного наповнювача (мертелі). Зразки з порошковою сумішшю поміщали в подвійний контейнер і витримували протягом 5 год за температури 900 °C.

Металографічні дослідження зразків проводили на металографічному мікроскопі ІЕ-200. Стан поверхні зразків після насичення фіксували на інструментальному мікроскопі МБС-9 з цифровою камерою. Для досліджень зразки заливали у холоднотвердіючу пластмасу марки Latacril із наступним виготовленням поперечних шліфів. Шліфи виготовляли так: шліфування на верстаті, послідовне шліфування на водостійкому папері зернистістю P100, P320, P600, P800, P1000, P1500, P2500, P3000, P5000, полірування на

вологій повсті. Травлення проводили в розчині 4 % азотної кислоти у спирті.

Вимірювали твердість на твердомірі ПМТ-3, інструментальну твердість – на приладі Nanoscan – 4D (індентор – пірамідка Берковича, навантаження 500 мН, витримка з максимальним навантаженням 15 с).

Результати досліджень та їх обговорення. Експерименти проводили на зразках зі сталі 40Х за умови $t = 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ протягом 1,5 год. Використовували чотири насичуючих пасти, склад яких: А – 65 % V_4C + 35 % CuCl_2 ; Б – 75 % V_4C + 10 % NaF + 5 % Cu_2O + 10 % NH_4Cl ; В – 75 % V_4C + 10 % NaF + 5 % CuCl_2 + 10 % $\text{Al}(\text{OH})_3$; Г – 75 % V_4C + 9,75 % NaF + 10 % В + 3,5 % Cu_2O + 1,5% NH_4Cl .

Дослідження дисперсності порошків засвідчили такі дані: середні розміри порошинок V_4C становлять 50 – 60 мкм, частинки NaF досягали розмірів до 30 мкм. Конгломерати $\text{Al}(\text{OH})_3$ досягали розмірів 400 мкм. Найбільші розміри частинок CuCl_2 по перетину досягали 20 мкм, а по довжині до 500 мкм. Порівнюючи температури

дисоціації згаданих речовин, можна дійти висновку, що в процесі насичення, за температури $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$, дисперсність порошків буде помітно впливати на процес насичення. Дисперсність інших речовин не є критичним параметром.

Після процесу борування і охолодження на повітрі на всіх чотирьох зразках було отримано зміцнений борований шар.

На рис. 1, 2 зображені фрагменти поверхонь зразків після борування.

Як видно з рис. 1, стан поверхонь зразків, борованих із паст А, Б, Г, схожий, слаборозвинений і в цілому за шорсткістю відповідає стану поверхні зразків до насичення. На поверхні зразка, борованого з пасти Г, видно червоні проміжки міді та недорозчинені частинки V_2O_3 , які залишились із захисної засипки. Поверхня зразка, борованого з пасти Б, нагадує бруківку з більш розвинутою поверхнею, ніж попередні зразки. Стан поверхні того самого зразка з залишками пасти зображено на рис. 3.

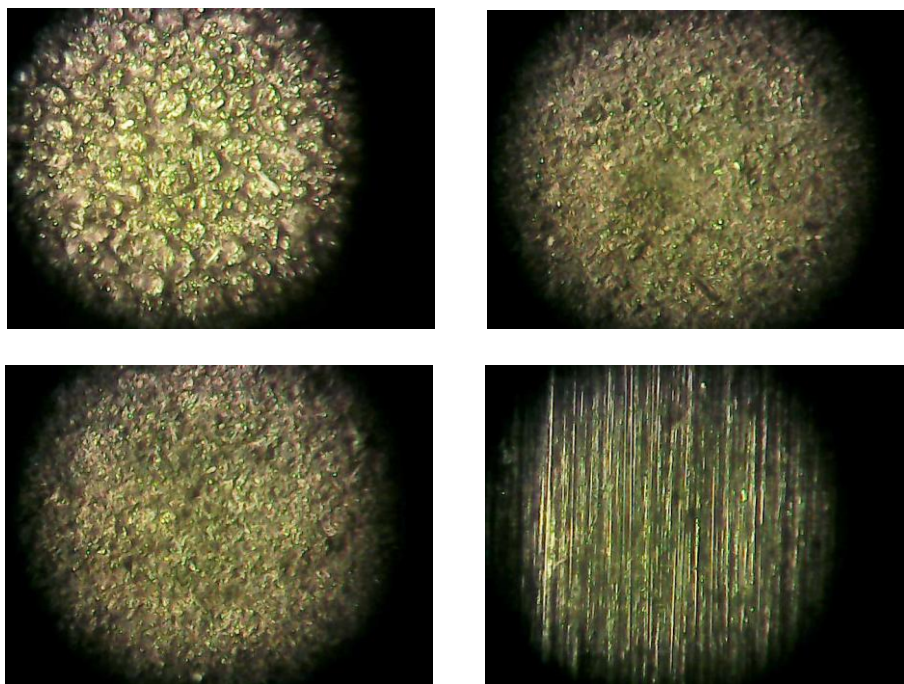


Рис. 1. Стан поверхонь після насичення на зразках, борованих із паст А, Б, В, і шорсткість зразків до насичення (х 90)

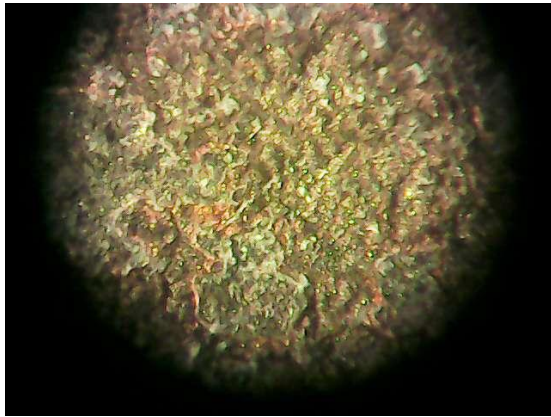


Рис. 2. Стан поверхонь після насичення на зразку, борованого з пасти Г.
Видно червоні проміжки міді та недорозчинені частинки B_2O_3 (х 90)

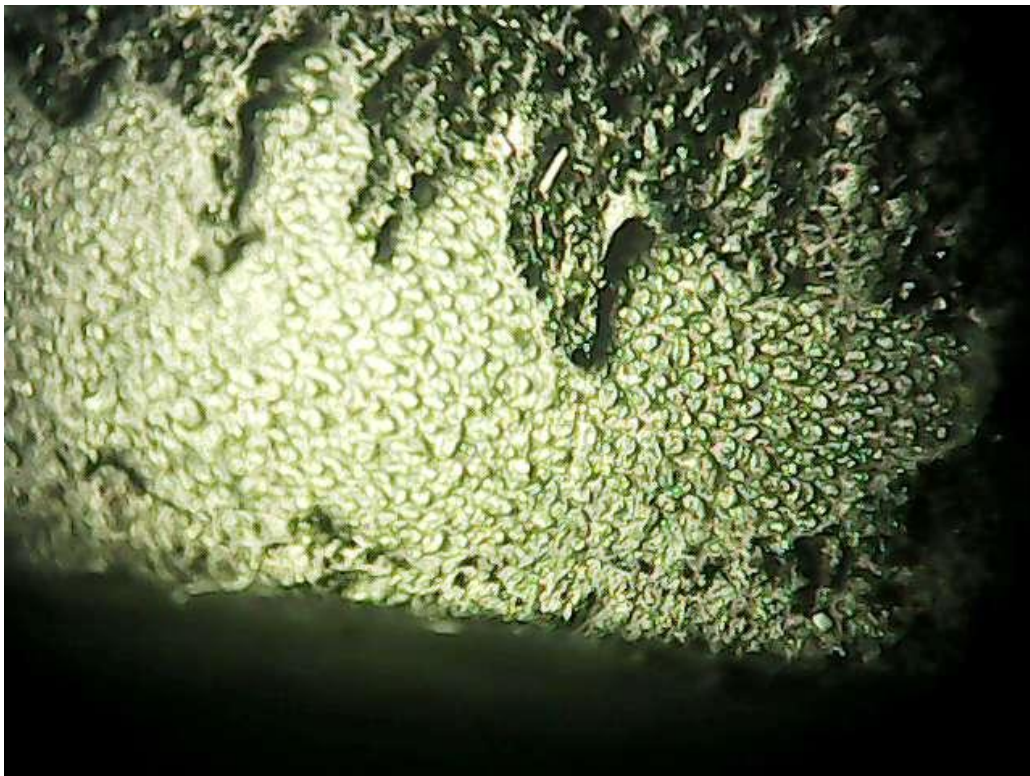


Рис. 3. Стан поверхні після насичення на зразку, борованого з пасти Б, одразу після
вилучення зразку з лотка. Видно ще незняті залишки спеченої пасти (х 90)

На рис. 4-7 подані панорами мікро-структур поверхонь зразків, борованих із паст А, Б, В, Г. Аналіз цих панорам свідчить про те, що у всіх дифузійних шарах присутня голкоподібна структура боридів із різним ступенем розвиненості. Найбільшу

розвиненість голкоподібної структури спостерігають на зразку, борованому з пасти В, менш розвинені голки спостерігають на зразку, борованому з пасти Б. Майже непомітну голкову структуру спостерігають на зразках, борованих із паст А і Г.

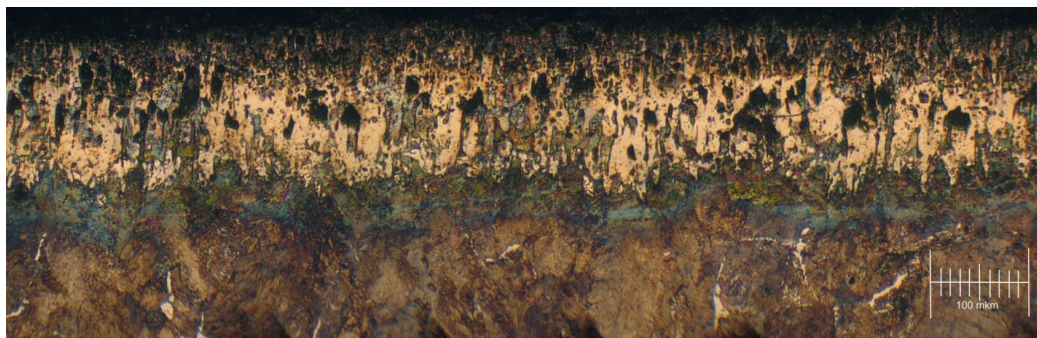


Рис. 4. Панорама мікроструктури поверхні зразка, борованого з пасти А

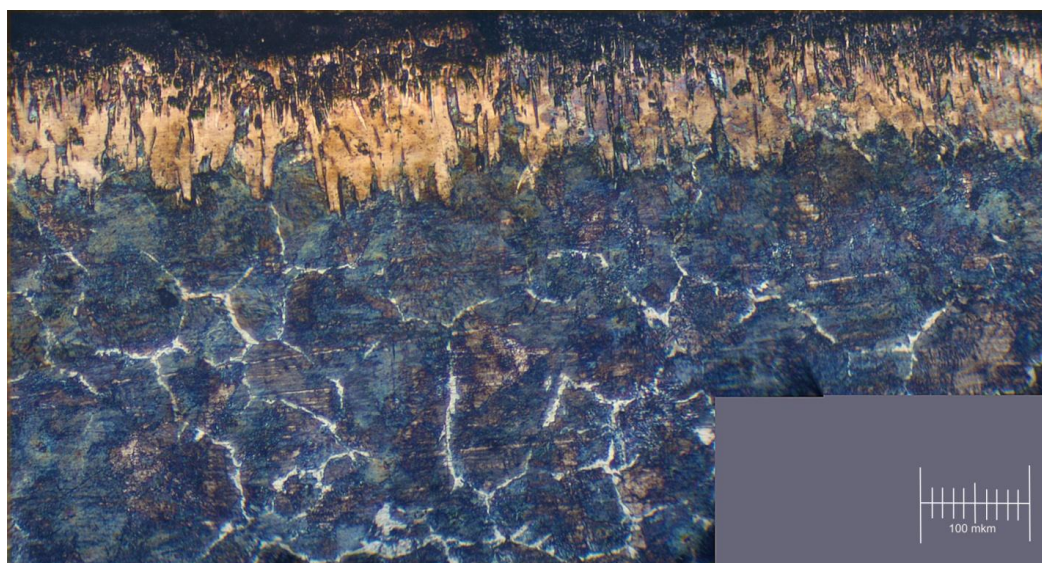


Рис. 5. Панорама мікроструктури поверхні зразка, борованого з пасти Б

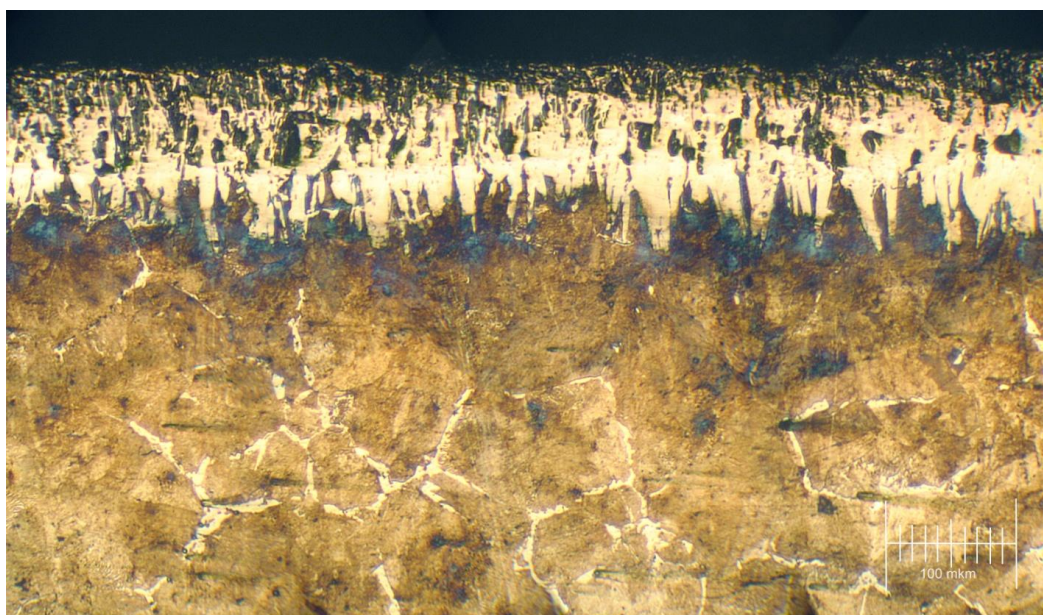


Рис. 6. Панорама мікроструктури поверхні зразка, борованого з пасти В

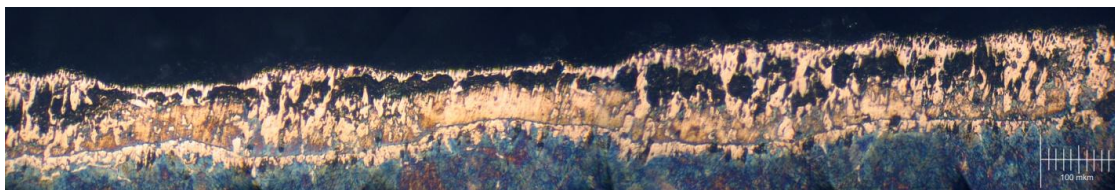


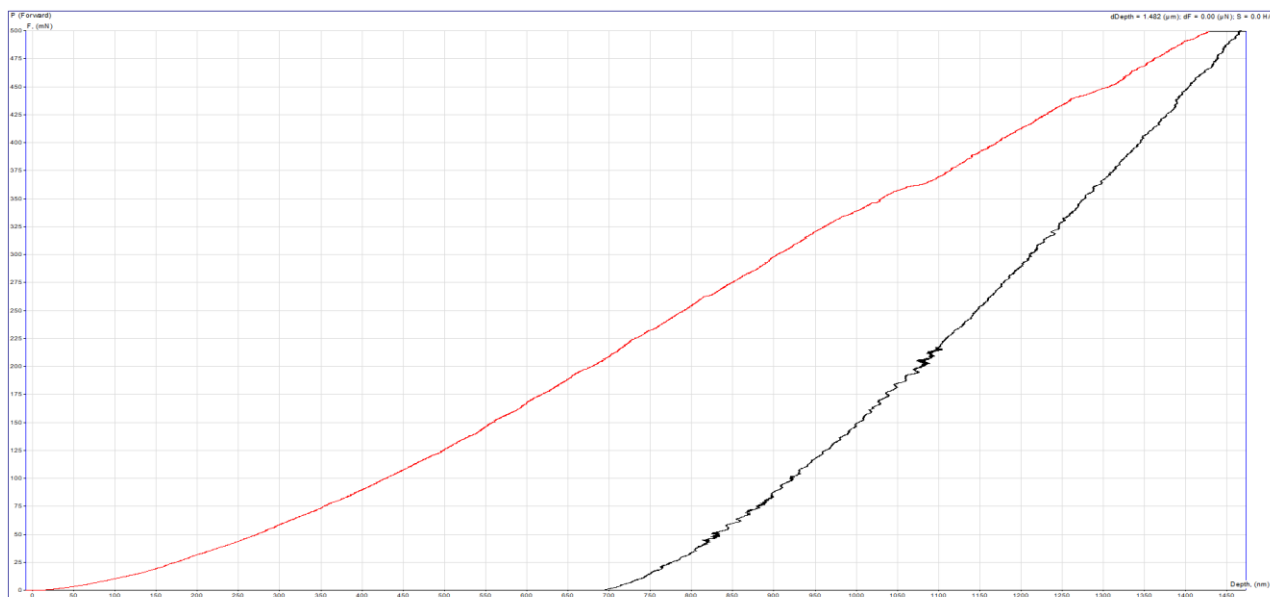
Рис. 7. Панорама мікроструктури поверхні зразка, борованого з пасти Г

Найбільшу пористість з ознаками відшарування мав зразок, борований із пасти Г, менша пористість характерна для шарів на зразках, борованих із паст А, Б, В.

Товщина дифузійного шару на зразку, борованому з пасти А, становить приблизно 200 мкм. На зразку, борованому з пасти Б, товщина шару коливається від 100 до 150 мкм, товщина шару, отриманого боруванням із пасти В, становить 100 мкм з виходом окремих голок в основну структуру металу ще на 50 мкм. Товщина шару, отриманого боруванням із пасти Г, коливалась від 200 до 150 мкм.

Для визначення механічних характеристик однофазного борованого шару проведено ряд випробувань на зразках із боридом Fe_2B , інструментальне індентування з визначенням інструментальної твердості, модуля Юнга.

За результатами індентування (прилад Nanoscan – 4D, індентор – пірамідка Берковича, навантаження 500 мН, витримка з максимальним навантаженням 15 с) $H_1 = 14,57$ ГПа; $E = 293$ ГПа. Одна з кривих навантаження – розвантаження показана на рис. 8.

Рис. 8. Крива навантаження – розвантаження боридного шару Fe_2B у поперечному напрямку

Визначення властивостей з індентуванням поперечного шліфа є важливим, оскільки більша частка

механічного впливу на мікрооб'ємі йде під кутом до нормалі (наприклад абразивні частинки). Сходінки на кривій

навантаження (червона на рис. 8) говорять про релаксацію напруги за концентрованої дії навантаження. Певною мірою це показник тріщиностійкості бориду. Ознаки появи мікротріщин з'являються з навантаженням 360 мН і глибиною втілення індентора 1075 нм. Приблизна протяжність мікротріщин 30 нм. Знаючи навантаження, за якого утворилася мікротріщина, і її розмір, можна розрахувати показники тріщиностійкості за формулами

$$G_{1c} = \pi l \sigma^2 / E,$$

де l – довжина мікротріщини;

σ – навантаження, за якого вона утворилася;

E – модуль Юнга (визначають з індентуванням);

$$K_{1c} = (G_{1c} E / 1 - \mu)^{1/2},$$

де μ – коефіцієнт Пуассона.

Для Fe_2B $G_{1c} = 0,000417$ Н/м,
 $K_{1c} = 10,75$ МПа*м^{1/2}. Ці показники говорять

про високі характеристики тріщиностійкості і можливість зберігати цілісність мікрооб'ємів із залученням гострих, твердих частинок під високим питомим навантаженням.

Силіцидне покриття отримано з насиченням технічним кремнієм із додаванням 5 % (ваг.) хлористого амонію і 20 % інертного наповнювача (мертелі). Зразки з порошковою сумішшю поміщали в подвійний контейнер і витримували протягом 5 год за температури 900 °С. Із застосуванням дрібної фракції кремнію (30 мкм) спостерігали спікання корки на поверхні внаслідок інтенсивної реакції перенесення хлориду кремнію і накопичення атомарного кремнію на поверхні. Дифузійний відтік кремнію вглиб матеріалу при цьому зменшується, що також сприяє утворенню спеченої корки. Збільшення зернистості кремнію до 150 мкм усуває проблему корки, однак на поверхні все ще присутні окремі впечені зерна кремнію. На рис. 9 подано мікроструктуру силіцьованого шару на сталі 40.

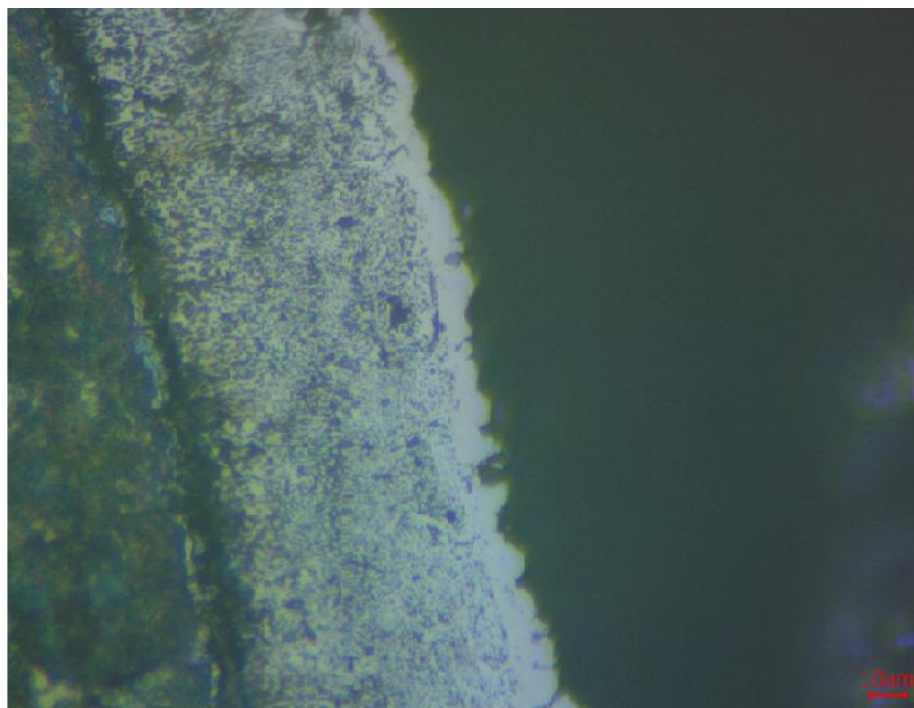


Рис. 9. Шар силіциду по периметру зразка (x500)

Шар силіциду достатньо щільний, зберігається на кутах переходу 90° без сколювань, навіть після процедури виготовлення шліфа, що говорить про непогану адгезійну міцність покриття. Саме покриття має товщину 100–200 мкм із мікротвердістю на поверхні H_{100} 25185 МПа.

Висновки. 1. Найкращі з розглянутих результатів за однофазного борування, з точки зору товщини та пористості з обробкою протягом 1,5 год, дають склади

паст 65 % B_4C + 35 % $CuCl_2$ і 75 % B_4C + 10 % NaF + 5 % $CuCl_2$ + 10 % $Al(OH)_3$ із зернистістю карбіду бору 50–60 мкм.

2. Однофазний борований шар має підвищену стійкість до сколювання.

3. Реалізоване силіціювання, отримане з насиченням технічним кремнієм із додаванням 5 % (ваг.) хлористого амонію і 20 % інертного наповнювача (мертелі), дає змогу отримати товстий (200 мкм) низькопористий шар протягом 5 год обробки.

Робота виконана в рамках Project EU #3055 EURIZON «Combined technologies of metallic surface modification by micro-arc oxidation and boriding for critical machine parts with high contact loads» і проекту Національного фонду досліджень України «Дослідження та розробка установки для відновлення елементів військової техніки шляхом дискретно-континуального зміцнення конструкцій» за реєстраційним номером № 2023.04/0036.

Список використаних джерел

1. Martínez-Trinidad J., Marquez-Cortés R., Moreno-Pacheco L.A., Alonso-Cruz F., Wong-Angel W.D., García-Leon R.A. Effect of the impact angles on the erosion wear resistance of borided AISI 4140 steel. *Results in Engineering*. 2025. Vol. 26. 104962. URL: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.104962> (last access: 15.06.2025).
2. Guo T., Chen Y., He Ch., Liang Zh., Zhao Q. Effects of boriding and nitriding on the corrosion and erosion behavior of martensitic heat-resistant steels in the supercritical CO_2 at 600 °C. *Corrosion Science*. 2025. Vol. 252. 112966. URL: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2025.112966> (last access: 15.06.2025).
3. Milinovi A., Stojšić J., Kladari I., Matijević B. Evaluation of boride layers on $C_{70}W_2$ steel using a new approach to characterization of boride layers. *Materials*. 2022. Vol. 15. 3891. URL: <https://doi.org/10.3390/ma15113891> (last access: 15.06.2025).
4. Yoon J.-K., Byun J.-Y., Kim G.-H., Lee J.-K., Yoon H.-S., Hong K.-T. Formation process and microstructural evolution of Ni-silicide layers grown by chemical vapor deposition of Si on Ni substrates. *Surface and Coatings Technology*. 2003. Vol. 168. P. 241–248. URL: [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(03\)00269-X](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(03)00269-X) (last access: 15.06.2025).
5. Knyazev S., Rebrova R., Riumin V., Nikichanov V., Rebrova A. Establishment of structure and operational properties of borated layers on 40X steel obtained from paste by induction heating. *Functional Materials*. 2021. Vol. 28(1). P. 76–83. URL: <https://doi.org/10.15407/fm28.01.76> (last access: 15.06.2025).
6. Liu Z., Guo T., Jia J., Nan X., Zhang R., Yi X. Effect of siliconizing temperature on microstructure and performance of alloy silicide layer on 347H stainless steel surface by melting salt non-electrolysis method. *Surface and Coatings Technology*. 2025. Vol. 502. 131937. URL: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2025.131937> (last access: 15.06.2025).

Князев Сергій Анатолійович, кандидат технічних наук, докторант кафедри матеріалознавства, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». ORCID iD: 0000-0001-6422-3658. Тел.: +380988699114. E-mail: obmeninfoserg@ukr.net.

Князєва Ганна Олександрівна, PhD, доцент кафедри матеріалознавства, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». ORCID iD: 0000-0002-5290-7566. Тел.: +380963790108. E-mail: annapostelnik@ukr.net.

Погрібний Микола Андрійович, кандидат технічних наук, професор кафедри матеріалознавства, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». ORCID iD: 0000-0002-1689-3830. Тел.: +380972179856. E-mail: pohrebnoy1950@gmail.com.

Терлецький Олександр Семенович, кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри матеріалознавства, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». ORCID iD: 0009-0001-0617-180X. Тел.: +380675709554. E-mail: terletskg@gmail.com.

Kniaziev Sergey, candidate of technical sciences, doctoral student of the Department of Materials Science of the National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute». ORCID iD: 0000-0001-6422-3658. Тел.: +380988699114. E-mail: obmeninfo@ukr.net.

Kniazieva Hanna, PhD, Associate Professor of the Department of Materials Science of the National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute». ORCID iD: 0000-0002-5290-7566. Тел.: +380963790108. E-mail: annapostelnik@ukr.net.

Pohribnyi Mykola, candidate of technical sciences, professor of the Department of Materials Science of the National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute». ORCID iD: 0000-0002-1689-3830. Тел.: +380972179856. E-mail: pohrebnoy1950@gmail.com.

Terletskyi Oleksandr, candidate of physical and mathematical sciences, associate professor of the Department of Materials Science of the National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute». ORCID iD: 0009-0001-0617-180X. Тел.: +380675709554. E-mail: terletskg@gmail.com.

Статтю прийнято 22.08.2025 р.

УДК 621.89

ОПТИМІЗАЦІЯ ПІДБОРУ МОТОРНИХ ОЛИВ ДО ДВЗ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ КРИТЕРІЙНОГО АНАЛІЗУ

Д-р техн. наук С. В. Воронін, кандидати техн. наук В. О. Мазепа, Г. М. Афанасов, асп. Ю. К. Орлюк, магістр М. О. Воронін

OPTIMIZATION OF ENGINE OIL SELECTION FOR INTERNAL COMBUSTION ENGINES USING CRITERIA ANALYSIS

Dr. Sc. (Tech.) S. Voronin, PhD (Tech.) V. Mazepa, PhD (Tech.) H. Afanasov, postgraduate student Y. Orliuk, master O. Voronin

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.213.2025.341832>

***Анотація.** У статті розглянуто актуальну науково-практичну проблему – підбір моторних олив для двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ) в умовах насиченого та неоднорідного споживчого ринку України. Показано, що традиційні підходи щодо підбору моторної оливи, базовані виключно на класифікаціях і рекламних характеристиках, не дають змогу забезпечити оптимальні умови роботи ДВЗ відносно зносу та надійності. Зазначено, що навіть оливи, які формально належать до однієї експлуатаційної групи, можуть демонструвати кардинально різні результати залежно від конструктивних особливостей і ступеня форсування конкретного двигуна.*

Запропоновано використовувати критеріальний підхід для підбору моторної оливи, що враховує фізичні параметри трибосистеми ДВЗ і складність умов експлуатації моторної

оливи. Методологічною основою дослідження є π -теорема теорії подібності та моделювання, що дає змогу сформулювати безрозмірний критерій подібності, який адекватно відображує взаємозв'язки між основними впливаючими параметрами. Запропонований критерій формують на таких величинах, як літрова потужність двигуна (N_L), питомі витрати палива (g_e), сумарна площа циліндрів ($F_{\text{ц}}$) і параметр «жорсткості» режиму експлуатації моторної оливи (n/G_M), який характеризує інтенсивність забруднення моторної оливи та її деградацію в процесі роботи.

У результаті аналізу розмірностей із застосуванням базисних змінних системи СІ (метр, кілограм, секунда) було теоретично обґрунтовано безрозмірність критерію подібності $\pi_{\text{ДВЗ}}$, що підтверджено відповідними математичними розрахунками. Проведено експертне опитування фахівців у галузі двигунобудування, хімотології та експлуатації машин, на основі якого верифіковано вибрані параметри. На основі аналізу понад 180 моделей двигунів внутрішнього згорання вітчизняного та зарубіжного виробництва здійснено практичну апробацію критерію $\pi_{\text{ДВЗ}}$, що дало змогу побудувати графічні залежності між значенням критерію подібності та групою експлуатації моторної оливи.

Запропонований критерій подібності має високу кореляцію з групою експлуатації моторної оливи, що дає змогу використовувати його як ефективний інструмент для обґрунтованого підбору моторних оливи для будь-якого типу ДВЗ на етапах конструювання, технічного обслуговування та експлуатації техніки.

Ключові слова: підбір моторних оливи, критеріальний підхід, критерій подібності, двигун внутрішнього згорання, група експлуатації, тип оливи, жорсткість роботи оливи, метод аналізу розмірностей, π -теорема, кореляція.

Abstract. This article addresses a topical scientific and practical issue—the selection of motor oils for internal combustion engines (ICEs) in the context of a saturated and heterogeneous consumer market in Ukraine. It is shown that traditional approaches to oil selection, based solely on classifications and advertising specifications, fail to ensure optimal operating conditions in terms of engine wear and reliability. Notably, even oils formally belonging to the same operational group can yield significantly different results depending on the engine's design features and performance characteristics.

We propose a criteria-based approach to motor oil selection that considers the physical parameters of the ICE tribosystem and the complexity of operating conditions. The methodological foundation of the study is the π -theorem of similarity theory and modeling, which enables the formulation of a dimensionless similarity criterion that accurately reflects the relationships among key influencing parameters. This proposed criterion is based on variables such as engine power per liter (N_L), specific fuel consumption (g_e), total cylinder area ($F_{\text{ц}}$), and the operational «rigidity» parameter (n/G_M), which characterizes the intensity of oil contamination and degradation during use.

Through dimensional analysis using SI base units (meter, kilogram, second), the dimensionlessness of the similarity criterion $\pi_{\text{ДВЗ}}$ was theoretically substantiated and confirmed through mathematical calculations. An expert survey involving professionals in engine design, tribology, and machine operation was conducted to validate the selected parameters. Based on the analysis of over 180 models of domestic and foreign ICEs, the $\pi_{\text{ДВЗ}}$ criterion was practically tested, enabling the construction of graphical relationships between the criterion value and motor oil operational groups.

The proposed similarity criterion demonstrates a high correlation with motor oil operational groups, making it an effective tool for the rational selection of motor oils for various ICE types at the design, maintenance, and operational stages.

Keywords: engine oil, selection of engine oils, criteria-based approach, similarity criterion, internal combustion engine, engine oil service group, engine oil type, engine oil rigidity, dimensional analysis method, π -theorem, correlation.

Вступ. На сучасному споживчому ринку моторних олив навіть продукти з однаковим маркуванням можуть істотно розрізнятися за триботехнічними характеристиками. Це обумовлено різними класами якості (ACEA, API), формулами базових олив і присадок, брендовою політикою тощо [1, 2].

Різноманітність хімічних складів і властивостей, дуже велика кількість комерційних видів продукції, безліч нормативних документів, виданих різними організаціями, і широкий спектр застосування роблять правильний підбір моторних олив для ДВЗ транспортних засобів, якими щодня користуються мільйони людей, складним завданням [3-5].

Нерідко дослідники робили спроби створити універсальний показник, за яким можна виконати адекватний підбір моторної оливи та який би відображував усю складність роботи ДВЗ. Однак ці спроби не дали бажаних результатів через індивідуальність і багатогранність процесів, що протікають у разі роботи ДВЗ. Більш правильним було б відмовитися від одного універсального критерію і розробити кілька критеріїв, кожен із яких оцінював би одну якусь експлуатаційну властивість. Математичні моделі оцінювання якості моторної оливи, необхідної для конкретного двигуна, не враховують увесь комплекс фізичних величин, що визначають процеси його експлуатації, мають неуніверсальний наближений характер. Тому, підбираючи моторну оливу для двигуна, необхідно використовувати критеріальний підхід, де параметр жорсткості роботи моторної оливи в ДВЗ математично описано безрозмірними критеріями подібності в будь-якому типі двигуна.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Багаторічний досвід експлуатації автомобільної техніки показує,

що одним з основних факторів, який визначає безвідмовність і довговічність двигуна, є надійна робота його вузлів тертя. Якщо прийняти зношування всіх спряжень двигуна за 100 %, то на зношування циліндро-поршневої групи (ЦПГ) і кривошипно-шатунного механізму (КШМ) припадає 70–80 %, а на інші спряження – 20–30 %.

Основними механізмами, що визначають «жорсткість» роботи оливи в двигуні, є ЦПГ і КШМ [6].

Проведений аналіз робіт, присвячених дослідженню трибохімічних процесів у контактній зоні під час тертя, показує, що з випробуванням малих об'ємів оливи в досить жорстких умовах, що характерно для ЦПГ, можна викликати прискорене фрикційне окиснення оливи, за якого досягають ефекту її старіння. Отримані при цьому закономірності зміни протизношувальних і протизадирних властивостей можна використовувати для розроблення діагностичного алгоритму оцінювання технічного стану моторної оливи [7, 8].

Процес тертя багато в чому залежить від властивостей змащувального елемента, тому що основне призначення моторної оливи – запобігання зносу і заїданню пар тертя.

Як показує практика, вибір моторної оливи насамперед має бути визначений її сумісністю з ДВЗ. Сумісність мастильного матеріалу як складового конструкційного елемента такої складної трибосистеми, як ДВЗ, визначає надійність і довговічність його деталей. Часто оливи вищої якості викликають більшу інтенсивність зношування вузлів тертя ДВЗ. Це пояснюють так: той запас хімічно активних присадок в оливі не реалізується в робочому процесі двигуна, і тому присадки починають поводитися хімічно агресивно відносно ущільнень двигуна і матеріалів

трибосполучень або викликати абразивне зношування в результаті великої зольності.

Щоб правильно підбирати і застосовувати оливи, необхідно насамперед знати основні закономірності процесів тертя і зношування деталей машин, умови, у яких працюють оливи, режими навантаження двигуна, для якого підбирають оливу, якість, склад і можливі зміни якості і складу оливи у двигунах [9].

Підбирають оливу для конкретного двигуна з урахуванням найбільш повної відповідності такому двигуну з урахуванням його конструктивних та експлуатаційних характеристик. Як правильно підібрати оливу для конкретного двигуна, як зміняться терміни заміни оливи з переходом від однієї групи експлуатації до іншої, як врахувати конструктивні та експлуатаційні особливості того чи іншого двигуна?

Властивості та якість мастильної речовини багато в чому залежать від властивостей сировини базової оливи, процесів виробництва та глибини очищення, а також компаундування та введення присадок [9].

Аналіз сучасних стандартних методів визначення якості моторних олив показав, що отримані експлуатаційні показники на еталонних двигунах відповідають тільки цим типам двигунів і не можуть дати повних підстав для рекомендації щодо застосування на інших двигунах, тому що вони можуть бути виконані з інших матеріалів.

Визначення мети та завдання дослідження. Зважаючи на відсутність універсального показника для підбору моторної оливи до ДВЗ, нами була зроблена спроба розробити критерій ($\pi_{\text{ДВЗ}}$), що враховує ступінь форсування, вид виконаної роботи, ступінь зносу і конструктивні особливості двигуна, на основі системного підходу, фізичного моделювання і теорії подібності. Відповідно до цього метою дослідження є обґрунтування параметрів, що входять до критерію $\pi_{\text{ДВЗ}}$ та оцінювання кореляції цього критерію з групою експлуатації моторної оливи.

Основна частина дослідження. У процесі експертного опитування фахівців у галузі двигунобудування, хімотології та експлуатації ДВЗ і багатофакторного аналізу параметрів, що впливають на умови роботи оливи (жорсткість роботи), були вибрані такі величини:

1) $N_{\text{л}}$ – літрова потужність двигуна, $\text{кг/м} \cdot \text{с}^3$, що характеризує відношення ефективної потужності двигуна до робочого об'єму циліндрів;

2) $g_{\text{е}}$ – питомі витрати палива, $\text{с}^2/\text{м}^2$, що характеризують експлуатаційні особливості та знос двигуна;

3) $F_{\text{ц}}$ – сумарна площа циліндрів, м^2 , що характеризує конструктивні особливості двигуна;

4) $n/G_{\text{м}}$ – параметр, що характеризує «жорсткість» роботи оливи в двигуні.

За другою теоремою подібності (π -теореми) теорії подібності та моделювання, будь-яке рівняння фізичного процесу, записане в певній системі одиниць вимірювання, може бути подано у вигляді функціональної залежності між критеріями подібності [6]

$$F(\pi_i) = 0, \quad (1)$$

де π_i – критерій подібності, що характеризує фізичний процес.

Причому кількість критеріїв подібності (i) менше кількості параметрів, що характеризують процес, на кількість незалежних змінних. Кількість незалежних змінних визначають на основі аналізу розмірностей величин.

Отримання критеріїв подібності методом аналізу розмірностей із використанням π -теореми обумовлено тим фактом, що параметри, які впливають на роботу ДВЗ будь-якого типу, і властивості застосовуваних моторних олив ще не описані системою рівнянь у замкнутій формі, а той математичний опис, який є, дуже наближений і не враховує весь

комплекс фізичних величин, що визначають цей фізичний процес.

За правилами отримання критеріїв подібності методом аналізу розмірностей як одиниці вимірювання вибрано довжину – L , m ; масу – M , kg ; час – T , s . Як базисні змінні у вибраній системі одиниць вимірювання можна використовувати такі поєднання параметрів ДВЗ: F_{Π} , m^2 ; n/G_M , $\frac{1}{kg \cdot s}$; g_e , s^2/m^2 .

До базисних параметрів не включають вихідні параметри трибосистеми, за якими відбувається моделювання.

Для зменшення кількості факторів були об'єднані в один параметр (n/G_M) величини, що характеризують забруднення оливи, яка знаходиться в картері, продуктами окиснення, що скидаються зі стінок циліндра (тобто жорсткість умов роботи оливи у двигуні). Фізичний зміст цієї величини полягає в тому, що чим більша кількість оливи G_M у двигуні, тим менша

інтенсивність забруднення оливи (тобто менш жорсткі умови роботи оливи).

Про незалежність вибраних параметрів свідчить відмінність від нуля базисного визначника, складеного зі ступенів розмірностей зазначених величин:

$$D_0 = \begin{vmatrix} F_{\Pi} & L & M & T \\ n/G_M & 2 & 0 & 0 \\ g_e & 0 & -1 & -1 \\ & -2 & 0 & 2 \end{vmatrix} = -4. \quad (2)$$

Із базисними параметрами F_{Π} , n/G_M , g_e пов'язують параметр, що залишився і який входить в опис процесу N_L , отримавши критерій подібності. Критерій подібності має вигляд добутку степеневих комплексів. Для визначення форми запису критеріїв подібності необхідно знати значення визначників для критерію ДВЗ:

$$\begin{vmatrix} N_L & L & M & T \\ n/G_M & -1 & 1 & -3 \\ g_e & 0 & -1 & -1 \\ & -2 & 0 & 2 \end{vmatrix} = 10;$$

$$\begin{vmatrix} F_{\Pi} & L & M & T \\ N_L & 2 & 0 & 0 \\ g_e & -1 & 1 & -3 \\ & -2 & 0 & 2 \end{vmatrix} = 4;$$

$$\begin{vmatrix} F_{\Pi} & L & M & T \\ n/G_M & 2 & 0 & 0 \\ N_L & 0 & -1 & -1 \\ & -1 & 1 & -3 \end{vmatrix} = 8.$$

За правилами запису формул критеріїв подібності [10] отримуємо критерій ДВЗ

$$\pi_{ДВЗ} = \frac{N_L \cdot F_{\Pi}^{5/2} \cdot n \cdot g_e^2}{G_M}, \quad (3)$$

де N_L – літрова потужність двигуна, $kg/m \cdot s^3$;
 F_{Π} – сумарна площа циліндрів, m^2 ;
 n – частота обертання колінчастого вала, s^{-1} ;
 g_e – питомі витрати палива, s^2/m^2 ;
 G_M – об'єм системи змащення, kg .

Отже, на основі використання другої теореми теорії подібності та моделювання (π -теореми) методом аналізу розмірностей отримано критерій подібності досліджуваного процесу.

Отримуючи критерії подібності методом аналізу розмірностей або іншими методами, потрібно ретельно теоретично та експериментально перевірити коректність їх отримання.

Із метою перевірки правильності отримання критерію подібності фізичного моделювання було перевірено їхні безрозмірності. Підставивши в критерій

подібності замість величин формули їхні розмірності, отримуємо, що параметр $\pi_{\text{ДВЗ}}$ – безрозмірний. Отже, теоретично перевірено правильність виведення критерію подібності через перевірку його безрозмірності.

Наступним етапом для розроблення критерію $\pi_{\text{ДВЗ}}$ стало його практичне застосування. Під час практичної роботи проаналізовано літературу та оброблено дані більш ніж 180 двигунів як вітчизняних, так і імпортованих фірм-виробників. У результаті отримали графічні залежності $\pi_{\text{ДВЗ}}$ від групи експлуатації оливи. Дані розрахунку наведені в таблиці.

Таблиця

Результати розрахунку критерію подібності $\pi_{\text{ДВЗ}}$

Тип ДВЗ	Потужність двигуна N, Вт	Робочий об'єм двигуна V, м ³	Робоча площа циліндрів F, м ²	Літрова потужність двигуна N/V, Вт/м ³	Середні годинні витрати палива G, кг/год	Питомі витрати палива g, кг/Вт·с·3600	Тип моторної оливи	Об'єм системи змащення G, кг	Значення критерію подібності $\pi_{\text{ДВЗ}}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ЗИЛ-375	129000	0,007	0,025926	$1,84857 \cdot 10^7$	8,91424	$1,919517 \cdot 10^{-8}$	SE	9	$0,994174 \cdot 10^{-10}$
ЗМЗ-53-11	88300	0,00425	0,184782	$2,07747 \cdot 10^7$	8,91424	$1,639562 \cdot 10^{-8}$	SE	8	$1,380526 \cdot 10^{-10}$
ВАЗ 2131	6000	0,00169	0,0824	$3,55295 \cdot 10^7$	3,2752	$1,516296 \cdot 10^{-8}$	SF	6,2	$1,5001 \cdot 10^{-10}$
ЗМЗ-4022,10	74000	0,002446	0,1063	$3,02347 \cdot 10^7$	3,53152	$1,325645 \cdot 10^{-8}$	SF	6	$1,7525 \cdot 10^{-10}$
Alfa Romeo1551, 8 Twin	103000	0,001747	0,0852	$5,89824 \cdot 10^7$	2,24992	$0,606774 \cdot 10^{-8}$	SG	5,6	$2,9695 \cdot 10^{-10}$
Volvo 460 1,8i	66000	0,001783	0,0868	$3,70626 \cdot 10^7$	2,16448	$0,910976 \cdot 10^{-8}$	SG	5,3	$2,09463 \cdot 10^{-10}$
Nissan Sunny 1,6 LX Traveller	66000	0,001597	0,084	$4,13748 \cdot 10^7$	2,07904	$0,875016 \cdot 10^{-8}$	SG	3,4	$2,1396 \cdot 10^{-10}$
Mersedes-Benz S 600	290000	0,005987	0,2691	$4,84828 \cdot 10^7$	4,04416	$0,387376 \cdot 10^{-8}$	SH	8	$2,3310 \cdot 10^{-10}$
AudiA3 1,6	74000	0,001595	0,0788	$4,69498 \cdot 10^7$	2,05056	$0,769729 \cdot 10^{-8}$	SJ	3,5	$2,4364 \cdot 10^{-10}$
BMW 750 Li	240000	0,005379	0,2531	$4,46795 \cdot 10^7$	3,38912	$0,392259 \cdot 10^{-8}$	SL	7,5	$3,3637 \cdot 10^{-10}$
ЯМЗ-236	132000	0,01115	0,343077	$1,18856 \cdot 10^7$	6,88	$1,447811 \cdot 10^{-8}$	CE	24	$0,84337 \cdot 10^{-10}$
ЯМЗ-238 Л	220000	0,01486	0,457231	$1,48484 \cdot 10^7$	12,32	$1,555555 \cdot 10^{-8}$	CE	24	$0,98289 \cdot 10^{-10}$

Продовження таблиці

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
КамАЗ 740,10	154000	0,01085	0,361667	$1,41954 \cdot 10^7$	6,56	$1,183261 \cdot 10^{-8}$	CE	30,5	$1,15334 \cdot 10^{-10}$
Peugeot 505 GRD	95000	0,002446	0,1064	$3,88892 \cdot 10^7$	2,24	$0,654976 \cdot 10^{-8}$	CF-4	6	$1,4921 \cdot 10^{-10}$
Toyota Hilux 2GD-FTV	55000	0,001974	0,0934	$2,78228 \cdot 10^7$	1,92	$0,969696 \cdot 10^{-8}$	CF-4	5,3	$1,5472 \cdot 10^{-10}$
Toyota Avensis	66000	0,00187	0,0935	$3,52941 \cdot 10^7$	1,76	$0,740747 \cdot 10^{-8}$	CG-4	5	$1,7972 \cdot 10^{-10}$
Citroën Xantia	100000	0,002996	0,1378	$3,33783 \cdot 10^7$	2,368	$0,657778 \cdot 10^{-8}$	CG-4	8	$1,825 \cdot 10^{-10}$
Ford Ranger 2.5	85000	0,002498	0,1249	$3,40722 \cdot 10^7$	2,208	$0,721568 \cdot 10^{-8}$	CH-4	5,5	$1,8652 \cdot 10^{-10}$
Chevrolet Cruze Clean Diesel 2.0 Multijet	60000	0,001686	0,0852	$3,58718 \cdot 10^7$	2,016	$0,933333 \cdot 10^{-8}$	CI-4	3,5	$2,2261 \cdot 10^{-10}$
Skoda Octavia III 2.0 TDI	125000	0,004164	0,1772	$3,01921 \cdot 10^7$	3,584	$0,796444 \cdot 10^{-8}$	CJ-4	9,3	$2,4341 \cdot 10^{-10}$

Обговорення результатів. На основі отриманих даних були побудовані залежності критерію подібності від групи моторної оливи (рис. 1, 2). Із графічних

залежностей можна зробити висновок, що критерій подібності має хорошу кореляцію з групою експлуатації моторної оливи.

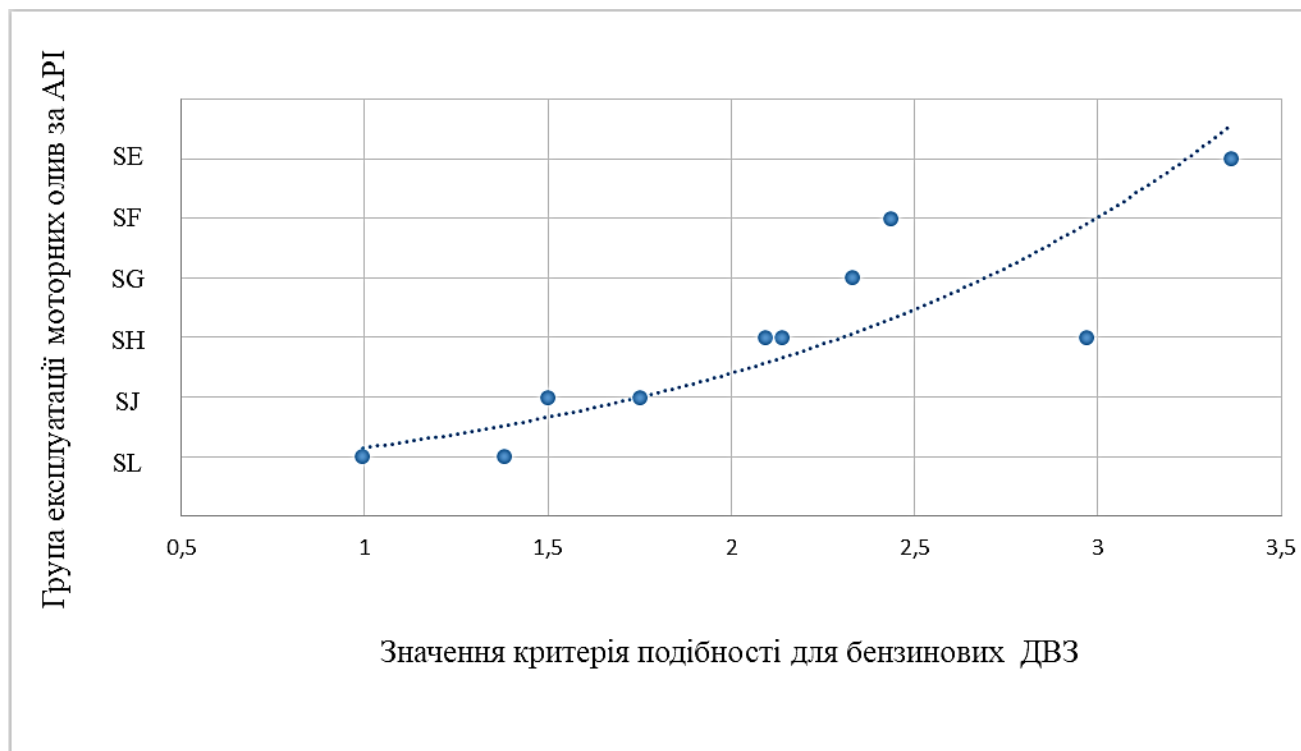


Рис. 1. Залежність критерію подібності від групи експлуатації моторних оливи (за API) для бензинових ДВЗ

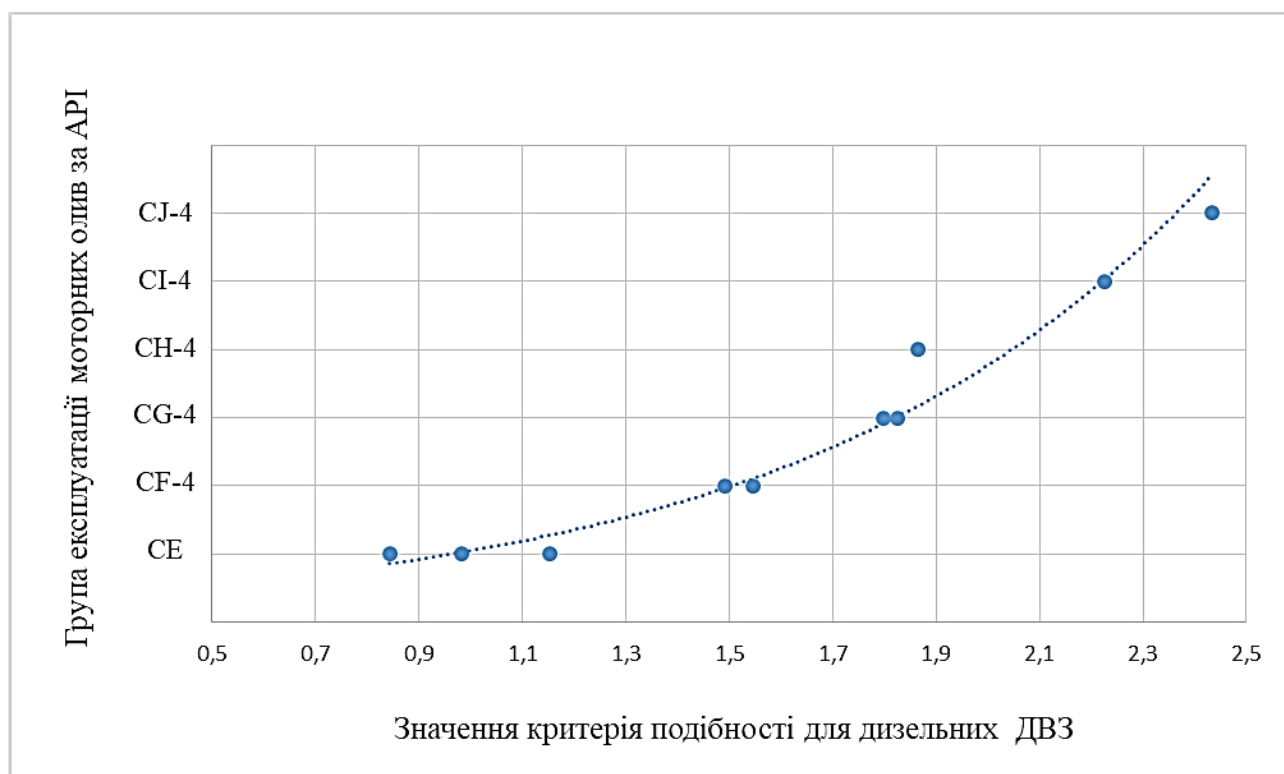


Рис. 2. Залежність критерію подібності від групи експлуатації моторних олив (за API) для дизельних ДВЗ

Висновки. В основу методичного підходу для вирішення поставлених завдань покладено системний аналіз, де об'єктом дослідження служив двигун внутрішнього згоряння – моторна олива. Вирішуючи це завдання, автори застосували основні теореми теорії подібності та моделювання.

На основі другої теореми теорії подібності та моделювання (π -теореми), у якій сказано, що будь-який складний фізичний процес можна подати у вигляді функціональних залежностей між критеріями подібності, було отримано критерій подібності ($\pi_{\text{ДВЗ}}$).

При цьому як критерій використано безрозмірні комплекси, до яких можуть входити N незалежних факторів.

Було отримано критерій подібності ($\pi_{\text{ДВЗ}}$) і побудовано залежності критерію подібності ($\pi_{\text{ДВЗ}}$) від групи експлуатації моторних олив (за API) для бензинових і дизельних ДВЗ.

Це дає змогу підбирати моторні оливи для будь-яких типів ДВЗ із повним урахуванням конструктивних особливостей двигуна, роду виконуваних робіт (завантаженості), ступеня зносу як на етапах проєктування, так і для технічного сервісу.

Список використаних джерел

1. Wolak A., Zajac G., Fijorek K. & Matwijczuk A. (2020). Experimental investigation of the viscosity parameters ranges—Case study of engine oils in the selected viscosity grade. *Energies*. 13(12). 3152. <https://doi.org/10.3390/en13123152>.
2. Исследование триботехнических характеристик зарубежных моторных масел /Л. И. Куксенова, Л. М. Рыбалкова и др. *Вісник машинобудування*. 1999. С. 7-11.

3. Guan L., Feng X. L. & Xiong G. (2008). Engine lubricating oil classification by SAE grade and source based on dielectric spectroscopy data. *Analytica Chimica Acta*. 628. 117–120. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2008.09.004>.
 4. Wakiru J. M., Pintelon L., Muchiri P. N. & Chemweno P. K. (2019). A review on lubricant condition monitoring information analysis for maintenance decision support. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 118. 108–132. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2018.08.034>.
 5. Zhu J., He D. & Bechhoefer E. (2013). Survey of lubrication oil condition monitoring, diagnostics, and prognostics techniques and systems. *Journal of Chemical Science and Technology*. 2. 100–115.
 6. Бажинов А. В. Прогнозирование остаточного ресурса автомобильного двигателя: монографія. Харків: ХДАДТУ, 2001. 95 с.
 7. Бажинов А. В., Полянский А. С., Бажинов Е. А. Метод определения сроков смены моторных масел транспортных машин. *Вісник ХДТУСХ*. 2003. № 14. С. 212–216.
 8. Бажинов А. В. Управление надежностью автомобильного двигателя в конкретных условиях эксплуатации. *Автомобільний транспорт*. Київ: Техніка, 1988. Вип. 25. С. 18–21.
 9. Klamann D. Lubricants and related products: synthesis, properties, applications, international standards. Weinheim: Verlag Chemie, 1984. 489 p. ISBN 3-527-26022-6.
 10. Захаров С. М., Жаров И. А. Методология моделирования сложных трибосистем. *Трение и износ*. 1988. Т. 9. № 5. С. 825-834.
-

Воронін Сергій Володимирович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри машинобудування та технічного сервісу машин, Український державний університет залізничного транспорту.

ORCID iD: 0000-0001-8443-3222. Тел.: +38(095)500-81-59. E-mail: voronin.sergey@ukr.net.

Мазепа Віталій Олександрович, кандидат технічних наук, докторант кафедри машинобудування та технічного сервісу машин, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0009-0009-8617-5015. Тел.: +38(050)703-32-36. E-mail: mazepavitalii@gmail.com.

Афанасов Георгій Михайлович, кандидат технічних наук, доцент, докторант кафедри машинобудування та технічного сервісу машин, Український державний університет залізничного транспорту.

ORCID iD: 0000-0003-1730-1785. Тел.: +38(066)452-40-39. E-mail: 0674274770@kart.edu.ua.

Орлюк Юрій Костянтинович, аспірант кафедри машинобудування та технічного сервісу машин, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0009-0001-1004-490X. Тел.: +38(067)923-14-85. E-mail: orlyuk525@gmail.com.

Воронін Максим Олексійович, магістр з галузевого машинобудування. ORCID iD: 0009-0001-8841-0615.

Тел.: +38(066)721-33-26. E-mail: max.voronin@gmail.com.

Voronin Serhii, Dr. Sc. (Tech.), professor, Head of the Department of Mechanical Engineering and Technical Service of Machines, Ukrainian State University of Railway Transport.

ORCID iD: 0000-0001-8443-3222. Tel.: +38 (095)500-81-59. E-mail: voronin.sergey@ukr.net.

Vitalii Mazepa, PhD (Tech.), doctoral student, department of mechanical engineering and technical service of machines, Ukrainian State University of Railway Transport.

ORCID iD: 0009-0009-8617-5015. Tel.: +38(050)703-32-36. E-mail: mazepavitalii@gmail.com.

Afanasov Heorhii, PhD (Tech.), associate professor, doctoral student, department of mechanical engineering and technical service of machines, Ukrainian State University of Railway Transport.

ORCID iD: 0000-0003-1730-1785. Tel.: +38(066)452-40-39. E-mail: 0674274770@kart.edu.ua.

Orliuk Yurii, postgraduate student, department of mechanical engineering and technical service of machines, Ukrainian State University of Railway Transport.

ORCID iD: 0009-0001-1004-490X. Tel.: +38(067)923-14-85. E-mail: orlyuk525@gmail.com.

Voronin Maksym, master's degree in industrial mechanical engineering.

ORCID iD: 0009-0001-8841-0615. Tel.: +38(066)721-33-26. E-mail: max.voronin@gmail.com.

Статтю прийнято 09.09.2025 р.

ТЕПЛОЕНЕРГЕТИКА (144)

UDC 536.7

THERMODYNAMIC ANALYSIS OF ENERGY-EFFICIENT SOLUTIONS IN BOILER PLANTS AND HEAT PUMPS CONSIDERING QUALITY CONTROL AND ENERGY CERTIFICATION IN CONSTRUCTION

PhD (Tech.) Y. O. Burda, PhD (Tech.) Y. O. Pivnenko,
PhD (Tech.) L. I. Tiutiunyk, PhD (Tech.) V. Shepitchak,
Dr. Sc. (Tech.) I. O. Redko

ТЕРМОДИНАМІЧНИЙ АНАЛІЗ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ РІШЕНЬ У КОТЕЛЬНИХ УСТАНОВКАХ І ТЕПЛОВИХ НАСОСАХ З УРАХУВАННЯМ КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ ТА ЕНЕРГЕТИЧНОЇ СЕРТИФІКАЦІЇ В БУДІВНИЦТВІ

Кандидати техн. наук Ю. О. Бурда, Ю. О. Півненко, Л. І. Тютюнник, В. Б. Шепітчак,
д-р техн. наук І. О. Редько

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.213.2025.341889>

Abstract. This study investigates practical approaches to improving energy efficiency in boiler plants and heat pumps through thermodynamic analysis, with additional consideration of quality control and energy certification in construction. The research examines real operating conditions of heating systems and evaluates how thermodynamic optimization can increase performance, reduce fuel consumption, and lower operational costs. The analysis demonstrates that the integration of advanced heat pump technologies with modern boiler units provides significant potential for decarbonization in both residential and industrial applications. At the construction level, rigorous quality control is identified as a critical factor in ensuring the effectiveness of installed systems and minimizing thermal losses in building envelopes. Energy certification is emphasized as a practical instrument for verifying compliance with efficiency standards and guiding modernization strategies. The results show that combining thermodynamic improvements with strict construction quality measures and certification procedures leads to measurable benefits in sustainability, reliability, and long-term energy savings.

Keywords: thermodynamic analysis, energy efficiency, boiler plants, heat pumps, quality control, energy certification, sustainable construction, building performance, heating systems, energy savings.

Анотація. У статті подано термодинамічний аналіз енергоефективних рішень, що застосовують у котельних установках і теплових насосах, із акцентом на важливість інтеграції контролю якості та енергетичної сертифікації в будівельній практиці. Дослідження зосереджено на визначенні закономірностей перебігу термодинамічних процесів у сучасних системах теплопостачання, спрямованих на зниження питомих витрат енергії, оптимізацію коефіцієнта корисної дії та мінімізацію екологічного впливу. Проведено порівняльний аналіз роботи котельних агрегатів і теплових насосів за різних режимів експлуатації з урахуванням реальних теплотехнічних характеристик, що дало змогу визначити найбільш перспективні напрями підвищення енергоефективності. Окрему увагу приділено ролі контролю якості в будівництві енергоефективних будівель, оскільки саме точність виконання проєктних рішень і відповідність технологічним нормам є визначальними факторами для забезпечення розрахункових показників

енергоспоживання. Доведено, що дефекти огорожувальних конструкцій, недотримання вимог щодо монтажу інженерних систем і відсутність належної перевірки значно знижують потенційну ефективність навіть найсучасніших технічних рішень. Також підкреслено важливість енергетичної сертифікації як інструмента комплексного оцінювання енергетичних характеристик будівель, що дає змогу забезпечити прозорість, уніфікованість і відповідність європейським стандартам у сфері енергоефективності. Сертифікація виступає механізмом не лише контролю, але і стимулювання впровадження інноваційних технологій, сприяючи поширенню практик сталого розвитку в будівництві. Отримані результати підтверджують, що лише поєднання термодинамічно обґрунтованих технічних рішень, належного контролю якості та обов'язкової сертифікації здатне забезпечити довгострокові енергетичні та екологічні переваги, а також економічну доцільність у сфері експлуатації будівель і споруд.

Ключові слова: термодинамічний аналіз, енергоефективність, котельні установки, теплові насоси, контроль якості, енергетична сертифікація, енергоефективні будівлі, системи теплопостачання, будівельна теплофізика, сталий розвиток.

Introduction. The growing demand for reducing energy consumption and minimizing environmental impact in the built environment has placed energy efficiency at the forefront of both engineering practice and scientific research. Heating systems, in particular boiler plants and heat pumps, remain central components of energy supply in residential, commercial, and industrial sectors. Their thermodynamic performance directly determines the operational costs of buildings, the level of greenhouse gas emissions, and the overall sustainability of construction practices. In this context, the integration of thermodynamic analysis with construction quality control and energy certification has become an essential approach to ensuring long-term efficiency and reliability.

Boiler plants continue to play a significant role in centralized and decentralized heating systems, yet their efficiency is strongly influenced by combustion processes, heat exchange characteristics, and maintenance practices. Heat pumps, as renewable-based alternatives, provide higher efficiency through the utilization of low-grade environmental heat, but their performance is highly sensitive to installation quality, building envelope properties, and climatic conditions. Consequently, thermodynamic analysis allows for a comprehensive evaluation of these systems under real operating conditions,

offering valuable insights into optimization strategies.

Equally important is the role of quality control in construction, which ensures that the design solutions for heating and insulation systems are accurately implemented in practice. Deficiencies in workmanship, deviations from standards, or inadequate verification often result in substantial thermal losses, undermining the intended efficiency of energy systems. To complement this, energy certification serves as a standardized framework for evaluating and verifying the energy performance of buildings, providing transparency and comparability while aligning national practices with international energy policies.

The present study addresses these interrelated aspects by analyzing the thermodynamic efficiency of boiler plants and heat pumps in connection with construction quality control and energy certification. The aim is to establish a scientific basis for enhancing the sustainability of heating systems in buildings, thereby contributing to the advancement of energy-efficient construction practices.

Literature review and problem statement. Recent research highlights the critical role of thermodynamic analysis in optimizing energy systems, particularly boiler plants and heat pumps, for improved efficiency and sustainability. In [1], a Modelica-based

approach was applied to dynamic exergy analysis of a 300 MW power plant boiler, demonstrating the potential for precise modeling of thermal performance under varying operational conditions. The influence of different types and distribution ratios of heat users on distributed solar centralized heating systems was explored in [2], emphasizing the importance of system configuration in achieving energy efficiency. Operational flexibility and optimization of CHP units supplying electricity and two-pressure steam were investigated in [3], highlighting strategies to balance energy supply with varying demand profiles.

The economic evaluation of energy efficiency and renewable technologies using artificial intelligence has been considered in [4], illustrating the integration of computational tools in energy planning. Rapid prediction methods for indoor temperature and HVAC control through linear temperature models were proposed in [5], showing potential improvements in building thermal management. The control of ventilation frequency in tunnel construction using neural networks [6] and methods for enhancing flexibility in coal-fired thermal power plants [7] provide further evidence of the benefits of advanced control strategies in thermal systems.

In the context of construction, studies on gas emission cleaning [8] and comprehensive thermodynamic analyses of heat and gas supply systems [9] underscore the importance of integrating system-level performance assessment with quality assurance. Peak-shaving schemes for coal-fired power plants integrating flexible carbon capture and wastewater treatment [10] further demonstrate the necessity of combining energy efficiency with operational reliability.

Despite these advances, a significant gap remains in connecting thermodynamic optimization of heating systems with practical construction-level interventions, including quality control and energy certification. Many energy-efficient technologies underperform due to insufficient verification during

construction or lack of standardized certification procedures. Addressing this gap is critical for ensuring that high-efficiency designs achieve their intended performance in real-world buildings. The present study focuses on bridging this divide by analyzing thermodynamic performance of boiler plants and heat pumps while considering construction quality and energy certification, thereby contributing to sustainable and reliable energy-efficient building practices.

The aim and objectives of the study.

The primary aim of this study is to analyze thermodynamic performance of energy-efficient solutions in boiler plants and heat pumps while integrating construction quality control and energy certification, in order to enhance the sustainability, reliability, and operational efficiency of modern buildings.

Objectives:

- To evaluate the thermodynamic efficiency of boiler plants and heat pumps under varying operational conditions, identifying factors that influence energy performance and system reliability.
- To examine the impact of construction quality control on the realization of energy-efficient designs, with a focus on reducing thermal losses and optimizing system performance.
- To assess the role of energy certification in verifying compliance with efficiency standards and promoting the implementation of sustainable building practices.
- To integrate findings from thermodynamic analysis, quality control, and energy certification to propose recommendations for improving the design, installation, and operation of heating systems in energy-efficient buildings.
- To identify potential pathways for combining advanced heating technologies with practical construction measures to achieve long-term energy savings, environmental benefits, and compliance with regulatory frameworks.

The main part of the study

The main part of this study focuses on the detailed analysis of thermodynamic performance of boiler plants and heat pumps in the context of energy-efficient building construction. It systematically integrates theoretical principles, practical system evaluation, and construction-level quality control measures. The analysis begins with a comprehensive assessment of the thermodynamic behavior of heating systems under different operational conditions, including variable load scenarios and seasonal fluctuations. Special attention is given to the identification of factors affecting energy efficiency, such as heat transfer characteristics, working fluid properties, and system configuration.

Subsequently, the study examines the influence of construction practices on system performance, highlighting how quality control measures during installation and commissioning directly impact thermal efficiency, operational reliability, and overall building energy consumption. The role of energy certification is considered as an evaluative tool that ensures compliance with established efficiency standards, providing both

verification of performance and guidance for system optimization.

Integration of these aspects enables the development of practical recommendations for enhancing energy efficiency in buildings, aligning advanced thermodynamic solutions with construction quality assurance and certification procedures. The main part also discusses case studies and comparative analyses of different heating technologies, demonstrating potential energy savings, operational improvements, and environmental benefits achievable through coordinated technical and construction measures.

The experiments were conducted in Kharkiv Oblast (Ukraine) at a single site under identical operating and environmental conditions, with the installed heating units matched to equal nominal capacities. The boiler plant employed Viessmann gas-fired condensing boilers, and the comparative electric heating system used Daikin air-to-water heat pumps (Altherma line). The monitoring campaign covered two full heating seasons—2023–2024 and 2024–2025—with unified control settings, steady boundary conditions, and consistent (Table 1).

Table 1

Thermodynamic Performance of Boiler Plants and Heat Pumps under Different Operating Conditions

№	System	Heat Carrier Temperature (°C)	Efficiency (%)	COP	Thermal Losses
1	Boiler	90	85	0.85	15
2	Boiler	80	83	0.83	17
3	Boiler	70	80	0.80	20
4	Boiler	60	78	0.78	22
5	Heat Pump	35	50	4.2	10
6	Heat Pump	40	48	3.9	12
7	Heat Pump	45	46	3.7	14
8	Heat Pump	50	44	3.5	16

The data were obtained by modeling heating systems in typical residential and

commercial buildings with standard insulation. Boilers are conventional natural gas units, and

heat pumps are air-source. Full quality control and energy certification standards according to EN ISO 52000 were assumed.

The data presented in Table 1 reflect the thermodynamic behavior of boiler plants and heat pumps under varying operating conditions. The boilers demonstrate a decrease in efficiency as the heat carrier temperature drops, accompanied by a gradual increase in thermal losses, highlighting the sensitivity of conventional heating systems to operational parameters. In contrast, heat pumps show a non-linear relationship between operating temperature and coefficient of performance

(COP), reaching optimal performance at moderate temperatures while experiencing increased thermal losses at higher supply temperatures. These trends illustrate the importance of carefully selecting operating parameters and ensuring quality control during installation to maximize energy efficiency in buildings. The data also emphasize the role of energy certification in verifying that the designed performance is achieved in practice.

The 3D graph visualizes the nonlinear dependencies between system performance parameters (Fig. 1).

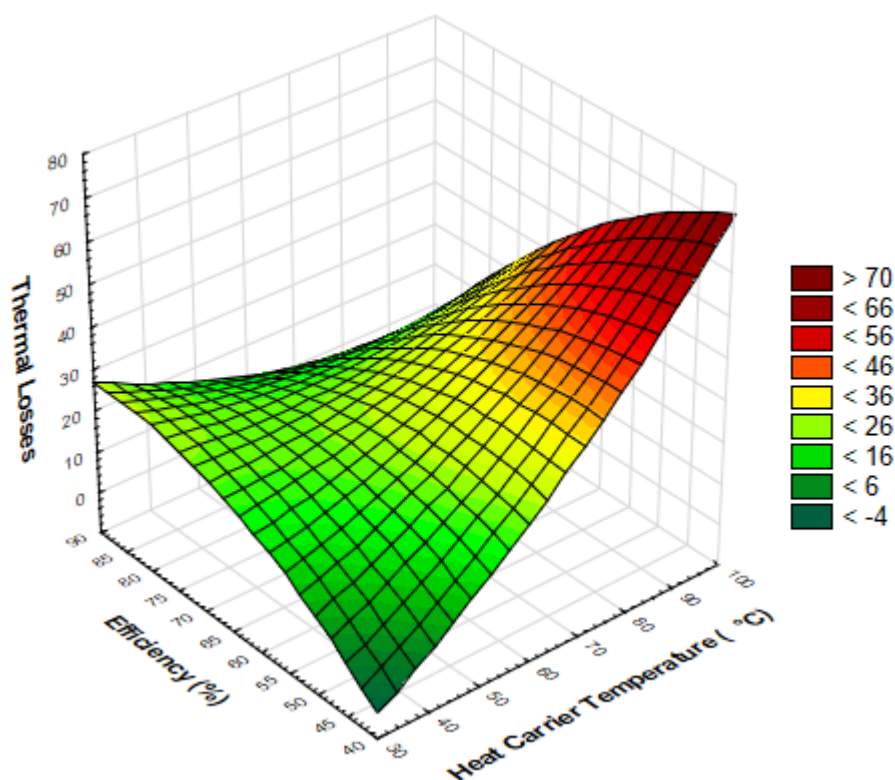


Fig. 1. Thermodynamic Performance of Boiler Plants and Heat Pumps under Different Operating Conditions

The thermodynamic performance of boiler plants and heat pumps under alternative operating conditions was analyzed to evaluate

the impact of improved building insulation and partial renewable energy integration on efficiency, COP, and thermal losses (Table 2).

Table 2

Thermodynamic Performance of Boiler Plants and Heat Pumps under Alternative Operating Conditions

№	System	Heat Carrier Temperature (°C)	Efficiency (%)	COP	Thermal Losses
1	Boiler	85	88	0.88	12
2	Boiler	75	86	0.86	14
3	Boiler	65	83	0.83	17
4	Boiler	55	81	0.81	19
5	Heat Pump	30	52	4.5	9
6	Heat Pump	35	50	4.1	11
7	Heat Pump	40	48	3.8	13
8	Heat Pump	45	46	3.6	15

This table presents thermodynamic performance under alternative operating conditions for buildings with improved insulation and partial renewable energy integration. Boilers operating on a combination of conventional and renewable sources demonstrate slightly higher efficiency and lower thermal losses compared to conventional scenarios. Heat pumps show increased COP values at lower heat carrier temperatures due to optimal utilization of external air-source energy, while thermal losses remain controlled.

Modeling assumes buildings with advanced insulation, partial use of biofuel or hydronic heat exchangers for boilers, and heat pumps equipped with optimized temperature control. Full quality control and energy certification are included according to EN ISO 52000 standards.

Conclusions. The present study investigated the thermodynamic performance of boiler plants and heat pumps within the context of energy-efficient buildings, integrating considerations of construction quality control and energy certification. Analysis of operating conditions in Table 1 demonstrated that boiler efficiency decreases with lower heat carrier temperatures, accompanied by an increase in thermal losses, while heat pumps show nonlinear variations in COP, reaching optimal performance at

moderate temperatures. This highlights the sensitivity of both systems to operational parameters and underscores the importance of precise control during installation and operation.

Table 2, reflecting alternative conditions with improved building insulation and partial renewable energy integration, indicates a measurable improvement in both efficiency and COP across the examined temperature range. Boilers achieved higher efficiencies and lower thermal losses due to optimized operational conditions and partial renewable fuel utilization, while heat pumps demonstrated elevated COP values at lower temperatures, confirming the benefits of advanced insulation and controlled system management.

The comparative analysis of both datasets emphasizes the critical role of quality control and energy certification in ensuring that the designed performance is realized in practice. Nonlinear trends observed in thermal losses and system efficiency underscore the necessity of integrated thermodynamic assessment and practical construction oversight for reliable energy performance.

Overall, the results confirm that combining advanced heating technologies, optimized operational parameters, and rigorous quality assurance enables substantial energy savings, enhances sustainability, and supports

compliance with energy performance standards. This integrated approach provides a foundation for informed decision-making in the

design, implementation, and certification of energy-efficient building heating systems.

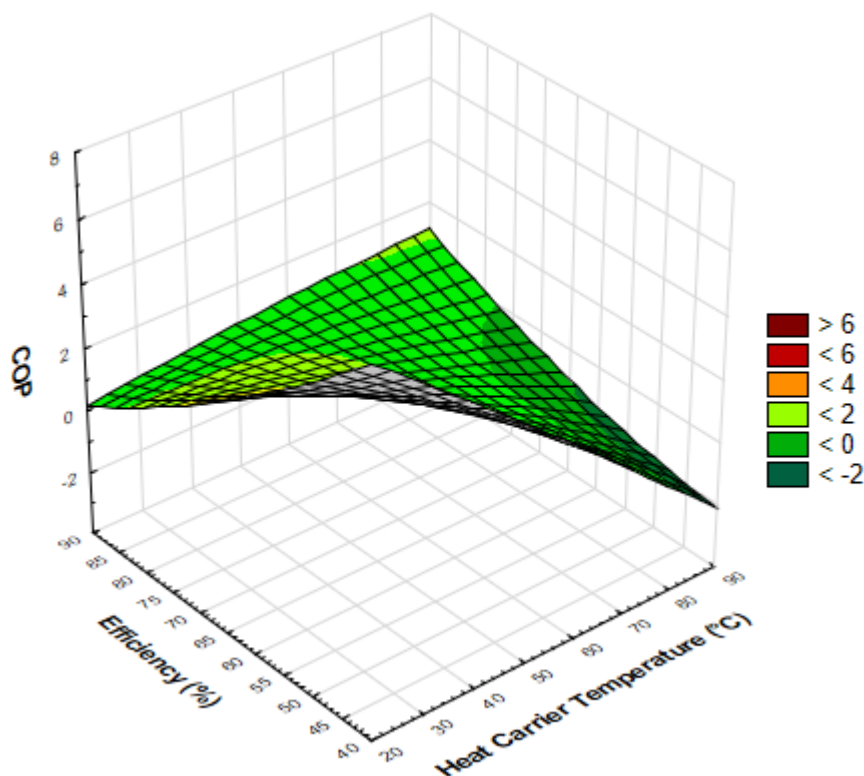


Fig. 2. Thermodynamic Performance of Boiler Plants and Heat Pumps under Improved Insulation and Renewable Integration Conditions

Reference

1. MengMeng Guo, Yongsheng Hao, Sandro Nižetić, Kwang Y. Lee, Li Sun. Modelica-based heating surface modelling and dynamic exergy analysis of 300 MW power plant boiler. *Energy Conversion and Management*. 15 July 2024. Vol. 312. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2024.118557>.
2. Mengmeng Guo, Yanfeng Liu, Yaowen Chen, Wenzhen Gao, Dengjia Wang, Huanlong Tang, Huaican Liu. Study on the effect of different types and distribution ratio of heat users on operation performance of the distributed solar centralized heating system. *Energy and Buildings*. 1 September 2022. Vol. 270. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112265>.
3. Miaomiao Liu, Ming Liu, Weixiong Chen, Junjie Yan. Operational flexibility and operation optimization of CHP units supplying electricity and two-pressure steam. *Energy*. 15 January 2023. Vol. 263, Part E. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125988>.
4. Cheng Chen, Yuhan Hu, Marimuthu Karuppiah, Priyan Malarvizhi Kumar. Artificial intelligence on economic evaluation of energy efficiency and renewable energy technologies. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. October 2021. Vol. 47. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101358>.

5. Chen Ren, Shi-Jie Cao. Construction of linear temperature model using non-dimensional heat exchange ratio: Towards fast prediction of indoor temperature and heating, ventilation and air conditioning systems control. *Energy and Buildings*. 15 November 2021. Vol. 251. 111351. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111351>.
 6. Rong Liu, Yi He, Yunfeng Zhao, Xiang Jiang, Song Ren. Tunnel construction ventilation frequency-control based on radial basis function neural network. *Automation in Construction*. October 2020. Vol. 118. 103293. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103293>.
 7. Di Wang, Deying Liu, Chaonan Wang, Yunlong Zhou, Xiaoli Li, Mei Yang. Flexibility improvement method of coal-fired thermal power plant based on the multi-scale utilization of steam turbine energy storage. *Energy*. 15 January 2022. Vol. 239, Part D. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122301>.
 8. Burda Yu., Pivnenko Yu., Cherednik A., Chaika Yu., Tkachenko R. Analysis of the cleaning efficiency of gas emissions from the venturi scrubber. V Міжнар. наук.-практ. конф. «CURRENT CHALLENGES OF SCIENCE AND EDUCATION», 15-17.01.2024 p. P. 140–147.
 9. Tiancheng Ouyang, Shutao Xie, Mingming Pan, Peijia Qin. Peak-shaving scheme for coal-fired power plant integrating flexible carbon capture and wastewater treatment. *Energy Conversion and Management*. 15 March 2022. Vol. 256. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115377>.
 10. Burda Y. 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 National University of Urban Economy in Kharkiv. Kharkiv: O. M. Beketov NUUE, 2025. 130 p. URL: <https://eprints.kname.edu.ua/68140/>.
-

Бурда Юрій Олександрович, кандидат технічних наук, доцент кафедри теплогазопостачання і вентиляції, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова.

E-mail: science.yurii.burda@gmail.com. ORCID ID: 0000-0003-3470-1334.

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: 0000-0002-6675-2649.

Тютюнник Лариса Іванівна, кандидат технічних наук, доцент кафедри парогенераторобудування, НТУ «ХПІ».

E-mail: lara.tyutyunik@gmail.com. ORCID ID: 0000-0002-3128-497X.

Шепітчак Володимир Богданович, кандидат технічних наук, доцент кафедри теплоенергетики, теплових та атомних електростанцій, Національний університет «Львівська політехніка». ORCID ID: [orcid.org/ 0000-0001-5883-548X](https://orcid.org/0000-0001-5883-548X). E-mail: volodymyr.b.shepitchak@lpnu.ua.

Редько Ігор Олександрович, доктор технічних наук, професор кафедри ТТДЕМ, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID ID: [orcid.org/ 0009-0005-1556-0830](https://orcid.org/0009-0005-1556-0830).

E-mail: ihor.redko1972@gmail.com.

Yurii Burda, Ph.D., Associate Professor at the Department of Heating, Gas Supply, and Ventilation, O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. E-mail: Yurii.Burda@kname.edu.ua. ORCID ID: 0000-0003-3470-1334.

Yurii Pivnenko, Ph.D., Assistant at the Department of Heating, Gas Supply, and Ventilation, O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. E-mail: yurii.pivnenko@kname.edu.ua. ORCID ID: 0000-0002-6675-2649.

Tiutiunyk Larysa, Ph.D., Associate Professor of the Department of Steam Generator Engineering, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute». E-mail: lara.tyutyunik@gmail.com. ORCID ID: 0000-0002-3128-497X.

Volodymyr Shepitchak Ph.D., Associate Professor of Department of Heat Engineering and Thermal and Nuclear Power Plants — Lviv Polytechnic National University. E-mail: volodymyr.b.shepitchak@lpnu.ua. ORCID ID: [orcid.org/ 0000-0001-5883-548X](https://orcid.org/0000-0001-5883-548X).

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: ihor.redko1972@gmail.com. ORCID ID: 0009-0005-1556-0830.

Статтю прийнято 25.08.2025 р.

БУДІВНИЦТВО ТА ЦИВІЛЬНА ІНЖЕНЕРІЯ (192)

УДК 697.343

СУЧАСНІ ВОДЯНІ СИСТЕМИ ОПАЛЕННЯ З ДВОМА ДЖЕРЕЛАМИ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ

Д-р техн. наук О. М. Тарадай, асп. С. В. Дяченко

MODERN WATER HEATING SYSTEMS WITH TWO SOURCES OF HEAT SUPPLY

Dr. Sc. (Tech.) O. Taradai, postgraduate student S. Diachenko

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.213.2025.341937>

Анотація. У статті розглянуто основні аспекти роботи залежних і незалежних поквартирних систем опалення, серед яких найбільш надійною та придатною в експлуатації є незалежна поквартирна система з двома джерелами теплопостачання. Впровадження таких систем забезпечує високу надійність теплопостачання, сприяє зниженню експлуатаційних витрат і забезпечує можливість проведення ремонтних або відновлювальних робіт без припинення подавання теплової енергії в інші частини будівлі. Зроблено висновки про перспективність впровадження незалежних поквартирних систем опалення як із будівництвом нових житлових комплексів, так і реконструкцією наявного житлового фонду.

Ключові слова: житловий фонд, системи опалення, теплоносій, електричні котли, будівництво, джерело.

Abstract. The article discusses the differences and key aspects of the functioning of dependent and independent apartment heating systems in multi-story residential buildings. Particular attention is paid to the analysis of various heating system schemes, among which an independent apartment system with two heat sources of heat supply is identified as the most reliable and cost-effective option.

The feasibility and effectiveness of using independent apartment heating systems with two heat sources of heat supply in multi-story residential buildings are comprehensively analysed. It has been established that this approach provides individual control over the thermal regime in each apartment, reduces the load on centralised networks in emergency situations and periods of peak consumption, and allows the system to be adapted to the needs of users. It has been established that in such systems it is advisable to use individual electric boilers in each apartment as a second heat supply source, which is a technically and economically sound solution. It has been established that such a combination ensures uninterrupted heating even in the event of failure of one of the sources, thereby increasing the overall reliability of the system. The implementation of such systems ensures high reliability of heat supply, reduces operating costs and simplifies repair or technical work without interrupting heating in other parts of the building. This, in turn, contributes to increased comfort for residents and optimisation of heating costs.

The results obtained confirm that the introduction of independent heating systems for flats with two heat sources of heat supply is a promising approach in modern residential construction, as well as in the reconstruction of existing housing stock with the aim of improving energy efficiency and reliability of heat supply.

Keywords: housing stock, heating systems, heat carrier, electric boilers, construction, source.

Вступ. Одним із основних завдань будь-якої держави є забезпечення раціонального використання енергоресурсів. Для України це питання має актуальну особливість, оскільки від ефективного споживання енергії залежить її стан енергетичної безпеки [1].

У цьому контексті особливу роль відіграють системи теплопостачання та опалення, які є невід'ємною складовою інфраструктури будь-якого міста чи населеного пункту, створюють і забезпечують споживачів необхідними умовами для їхнього комфортного існування. Проте постійне підвищення вимог щодо енергоефективності та енергетичної незалежності наявного багатоквартирного житлового фонду, дорожнеча комунальних послуг для населення стають основним стимулом для пошуку нових підходів щодо організації альтернативних систем опалення. Дедалі частіше ведуть дискусії в науковому та будівельному колі, присвячені комбінованим системам, що утворилися в результаті оптимізації традиційного централізованого та автономного теплопостачання.

Сьогодні одним із найбільш перспективних рішень є впровадження поквартирних комбінованих систем опалення з незалежною схемою підключення, що поєднують опалення з централізованим джерелом теплопостачання (ТЕЦ або котельня) і автономним, зокрема електричними котлами. До споживачів теплової енергії належать юридичні і фізичні особи, які використовують теплову енергію на підставі укладеного договору [2]. Тому впровадження сучасних підходів щодо теплоспоживання, зокрема індивідуального регулювання температурного режиму в окремих кімнатах квартири, відкриває для кожного споживача можливість самостійно управляти параметрами теплопостачання.

Це сприятиме досягненню економії енергоресурсів, поліпшенню комфортних умов проживання та зниженню витрат на ремонтно-експлуатаційні заходи.

Виклики, спричинені руйнуванням систем опалення під час бойових дій, роблять проблему можливості заміни джерела теплопостачання в кожній квартирі незалежно від інших квартир багатоповерхового житлового будинку досить актуальною. Розв'язання цієї проблеми необхідне не тільки для безпосереднього збереження нормальних умов життєдіяльності, але і оперативного проведення відновлювальних робіт.

У статті проаналізовано основні особливості функціонування поквартирних систем опалення із залежною та незалежною схемою підключення і двома джерелами теплопостачання, запропоновано рекомендації з поетапного переходу до поквартирних систем у наявному та новому житловому фонді. Досягнуті результати дослідження можуть бути корисними для тих, хто працює у сфері теплопостачання і будівництва: проектувальників, фахівців, інженерів, а також як база для подальших досліджень у галузі енергозбереження, теплотехніки та інженерних систем.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідження останніх років у сфері теплопостачання і будівництва свідчать, що різні типи систем опалення мають свої недоліки та переваги. Але найбільшого розповсюдження отримали саме водяні системи, які базовані на використанні централізованого джерела та котлів, що споживають різні види палива, зокрема електроенергію [3, 4].

Такий підхід забезпечує комбінованій системі вищу енергоефективність і надійність, ніж у системі з одним джерелом, тому його можна розглядати як ефективний напрям модернізації теплових мереж. Крім того, електричний котел можна використовувати як резервне або пікове джерело теплопостачання, що дасть змогу зменшити навантаження на централізоване джерело в разі виникнення аварійних ситуацій або в години максимального споживання [5].

Крім того, акцентовано на оптимізації витрат шляхом використання нічних тарифів на електроенергію [6, 7], що робить комбіновані системи в умовах сучасного енергетичного ринку економічно доцільними.

Проте проведений аналіз вітчизняної та закордонної наукової літератури свідчить, що існує недостатня кількість досліджень, які б поєднували техніко-економічні, екологічні та експлуатаційні аспекти застосування комбінованих систем у житловому фонді. Це свідчить про обмеження можливостей для формування об'єктивної оцінки ефективності цих систем і потребує подальших досліджень з урахуванням сучасних умов енергетичного ринку та кліматичних викликів.

Визначення мети та завдання дослідження. Метою дослідження є аналіз техніко-економічних та експлуатаційних особливостей поквартирних систем опалення з двома джерелами теплопостачання і незалежною схемою підключення та оцінювання потенціалу їх впровадження як способу підвищення енергоефективності житлових будинків.

Завдання дослідження:

- огляд актуальних досліджень і наукової літератури;
- розкрити принцип роботи поквартирних систем опалення з двома джерелами теплопостачання та незалежною схемою підключення;
- проаналізувати їхні основні переваги та обмеження з реконструкцією наявного або будівництвом нового житлового фонду;
- розглянути можливі технічні рішення щодо застосування незалежної схеми.

Основна частина дослідження. Навіщо в системі потрібне друге джерело теплопостачання? Розглянемо можливі варіанти відповідей на це запитання:

1. Резервування подавання теплопостачання в разі аварійного виходу з ладу основної системи теплопостачання або її

окремих частин і, як наслідок, припинення подавання теплової енергії споживачу. Саме цей випадок особливо актуальний у контексті бойових дій.

2. Створення можливості збереження опалення у споживача в разі перебоїв у постачанні палива основним постачальником теплової енергії.

3. Створення можливості кожному мешканцю квартири або всім мешканцям квартир одного будинку вмикати систему опалення своєї квартири або всього будинку за власним бажанням протягом цілого року незалежно від термінів опалювального періоду, встановленого основним постачальником.

4. Можливість вільного вибору споживачем постачальника теплової енергії за вартісними показниками теплової енергії.

Обов'язковою умовою для можливості індивідуального вибору постачальника теплової енергії мешканцями квартир є наявність у багатоповерховому житловому будинку поквартирних горизонтальних двотрубних систем опалення з лічильниками теплової енергії.

Якщо будинок обладнаний вертикальними однотрубними системами опалення, то реалізація технічної можливості індивідуального вибору джерела теплопостачання та підключення до нього неможлива. За таких умов джерело вибирають колективно на рівні всього будинку.

В Україні основними (першими) джерелами теплопостачання є ТЕЦ, районні, квартальні, групові або місцеві (будинкові) котельні.

Квартирною системою може бути котел, встановлений у місцевій котельні, що працює на газовому або будь-якому іншому виді палива. Якщо теплоносій від цього котла (другого джерела) буде поданий до квартирних систем опалення тими самими трубопроводами, якими подають і теплоносій від основного джерела, то ми отримаємо систему опалення з можливістю зміни джерела теплопостачання тільки в цілому для всіх квартир одночасно.

Якщо ж теплоносій від другого джерела подати до кожної квартири по самостійному розвідному трубопроводу, то ми отримаємо систему опалення будинку з можливістю змінювати джерело тепlopостачання в кожній квартирній системі опалення за бажанням мешканців квартири. При цьому всі інші квартири можуть отримувати тепло, як і раніше, від першого джерела.

Таку схему можна розглядати виключно як теоретично можливу, оскільки її реальна практична реалізація потребує постійного функціонування другого джерела та наявності відповідного

кваліфікованого персоналу, здатного обслуговувати це джерело в будь-який час на вимогу окремого споживача.

Очевидно, що мешканці жодного багатоповерхового житлового будинку не погодяться мати такі додаткові, абсолютно необґрунтовані витрати.

На рис. 1 зображено можливу залежну поквартирну схему опалення багатоповерхового житлового будинку з двома джерелами тепlopостачання. Перше джерело – централізоване, що здійснює подавання теплоносія від теплових мереж, ТЕЦ або котельні. Другим джерелом є внутрішньобудинкова електрична котельня.

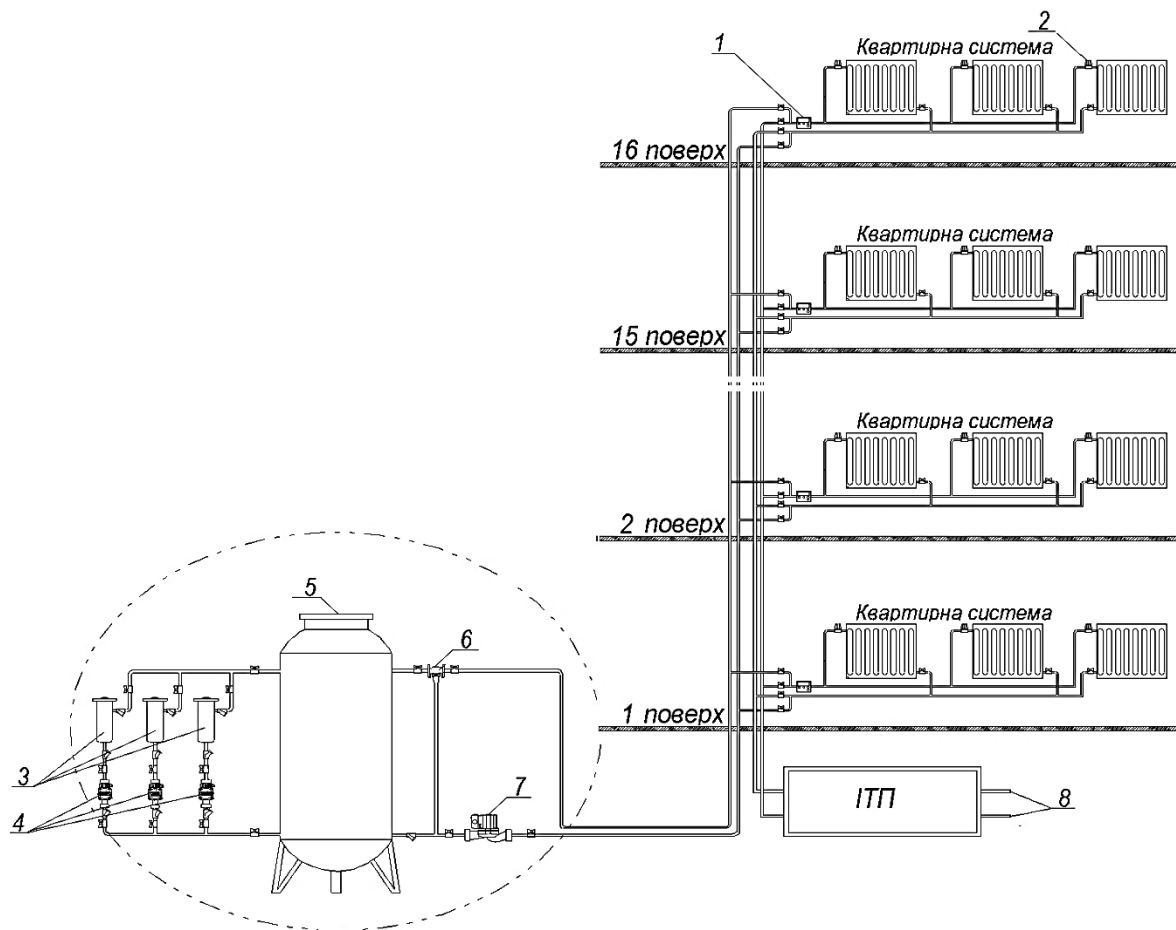


Рис. 1. Залежна поквартирна схема системи опалення багатоповерхового житлового будинку з двома джерелами тепlopостачання:

- 1 – квартирний лічильник теплової енергії; 2 – терморегулятор «Danfoss»;
- 3 – електродний котел; 4 – циркуляційний насос котельного контуру;
- 5 – теплоаккумуляторна ємність; 6 – регулювальний клапан; 7 – циркуляційний насос внутрішньосистемного контуру; 8 – ввід тепломережі

Реальним другим джерелом теплопостачання в такій схемі є лише електричний котел, оскільки використання будь-якого іншого котла, що працює на твердому або рідкому паливі, потребує істотних змін конструкції самого житлового будинку, а також значних додаткових площ для розміщення складів палива і продуктів його згоряння.

У запропонованій схемі, зображеній на рис. 1, уся внутрішньобудинкова поквартирна система опалення функціонує відповідно до гідравлічних і теплотехнічних параметрів джерел теплопостачання. Для прикладу, у квартирній системі опалення 16-поверхового будинку статичний тиск досягатиме граничних значень, наближених до норм міцності нагрівальних приладів та іншого обладнання.

Будь-які технологічні порушення в роботі зовнішньої системи теплопостачання безпосередньо будуть передаватися на внутрішньобудинковій системі, створюючи додаткові ризики для її надійності та довговічності.

У запропонованій схемі управління своєю внутрішньоквартирною системою опалення вибір джерела теплопостачання покладено на мешканця квартири, який здійснює управління шляхом відкривання/закривання відповідної запірної арматури на вводі до своєї квартири. Очевидно, що при цьому можуть виникнути передумови, спричинені помилковими діями користувача, що може призвести до порушень у функціонуванні системи та аварійних ситуацій. Такими наслідками можуть бути витікання теплоносія, утворення повітряних пробок і навіть часткові руйнування елементів арматури, нагрівальних приладів і трубопроводів.

З огляду на це, слід зазначити, що вся система опалення має бути заповнена хімічно очищеним деаерованим теплоносієм, приготованим на джерелі теплопостачання. Втрата такого дорогого теплоносія в результаті неправильної експлуатації небажана.

Очевидним є той факт, що застосування залежної схеми в багатоповерховому житловому будинку призводить до погіршення експлуатаційних характеристик системи, а найголовніше, її надійності.

Технічно обґрунтованим і раціональним рішенням, особливо у випадку, коли передбачена квартирна система з двома самостійними джерелами теплопостачання, є впровадження незалежної схеми підключення поквартирної системи опалення до загальнобудинкової тепломережі.

Розглянемо можливі технічні рішення щодо застосування незалежної схеми.

Для створення повної автономності у виборі джерела теплопостачання доцільним є установа свого індивідуального котла в межах кожної квартири. З технічного погляду найбільш реальним варіантом є електричний котел. Водночас для впровадження такого рішення може бути потрібне проведення додаткових робіт із реконструкції системи електропостачання.

Встановлення газового котла в кожній квартирі потребує значних капіталовкладень на газифікацію будинку, зокрема на реконструкцію зовнішніх мереж газопостачання, які в декілька разів перевищують капіталовкладення на реконструкцію мереж електропостачання. Основним недоліком газифікації будь-якого житлового будинку є істотне підвищення рівня газопожежної небезпеки, що потребує суворого дотримання правил пожежної безпеки.

Крім того, газифікація житлових будинків обмежена п'ятиповерховими [8], максимум в окремих випадках дев'ятиповерховими, забудовами. Фактично єдиним допустимими випадком, коли для опалення квартири може бути використаний двоконтурний газонагрівач, – це старі житлові дво-шестиповерхові будинки, обладнані газовими колонками.

Як уже зазначено вище, з'єднання централізованої або автономної системи опалення з квартирною, оснащеною електричним котлом, без гідравлічного

розділення контурів, є технічно необґрунтованим і небажаним, оскільки призводить до значного зниження надійності та створює критичну залежність її функціонування від некваліфікованих дій окремих мешканців будинку.

Для забезпечення стабільної та надійної експлуатації необхідно передбачити розділення контурів подавання теплоносія від кожного джерела

теплопостачання шляхом впровадження незалежної схеми.

Можливі дві незалежні схеми з'єднання різних джерел теплопостачання через пластинчасті теплообмінники у водяних системах опалення: перша – незалежне приєднання всієї загальнобудинкової системи опалення (рис. 2); друга – незалежне приєднання окремих квартирних систем опалення (рис. 3).

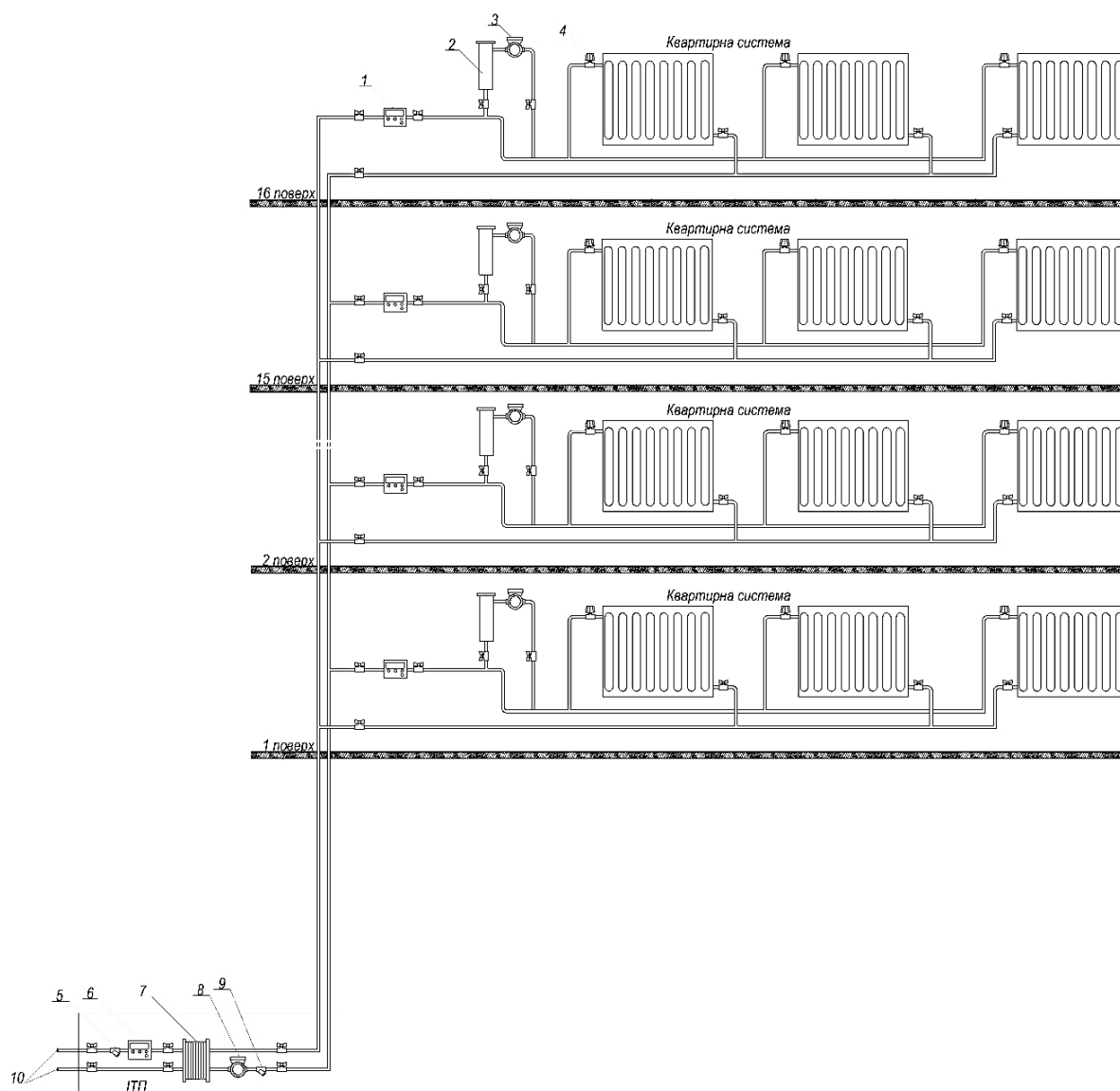


Рис. 2. Незалежна схема приєднання загальнобудинкової квартирної системи опалення:

1 – квартирний лічильник теплової енергії; 2 – електричний котел; 3 – насос;
4 – терморегулятор «Danfoss»; 5 – фільтр; 6 – загальнобудинковий лічильник теплової енергії; 7 – пластинчастий теплообмінник; 8 – насос; 9 – фільтр; 10 – ввід тепломережі

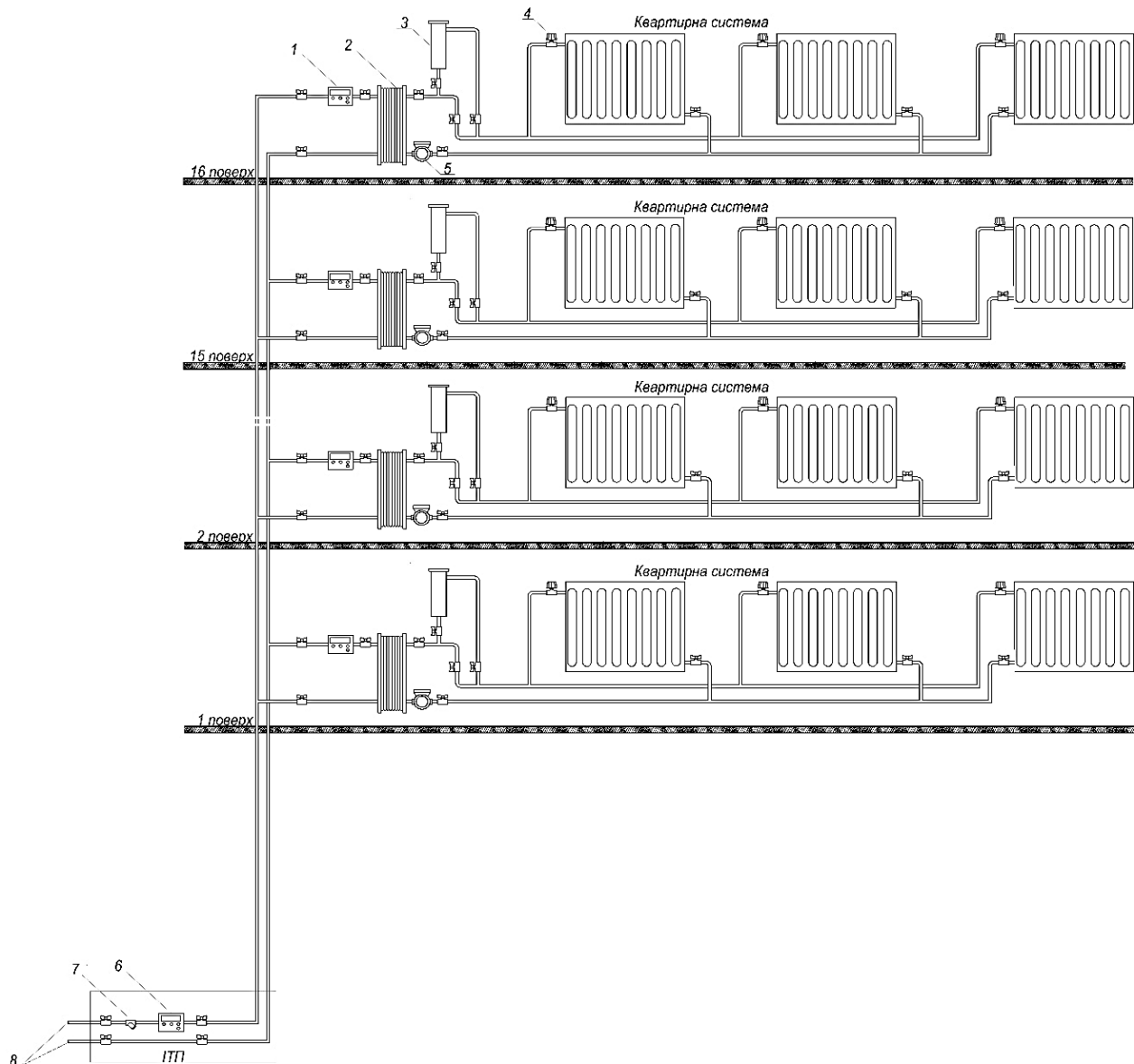


Рис. 3. Незалежна схема приєднання окремих квартирних систем опалення:
 1 – квартирний лічильник теплової енергії; 2 – пластинчастий теплообмінник;
 3 – електричний котел; 4 – терморегулятор «Danfoss»; 5 – насос; 6 – загально- будинковий лічильник теплової енергії; 7 – фільтр; 8 – ввід тепломережі

Аналізуючи можливості систем квартирного опалення, зображених на рис. 2 і 3, можна зробити висновок, що обидві системи забезпечують мешканцям кожної квартири повну свободу щодо вибору джерела теплопостачання, тобто кожен споживач має можливість самостійно вмикати будь-яке джерело відповідно до своїх потреб.

Водночас мешканці інших квартир можуть продовжувати експлуатацію з використанням того джерела теплопостачання, яке відповідає їхнім індивідуальним вподобанням.

Принципова відмінність між схемами, зображеними на рис. 2 і 3, полягає в тому, що нагрівальні прилади, запірно-

регулювальна арматура та насоси схеми (рис. 2) розміщені у вторинному контурі на нижніх поверхах багатоповерхових будівель і зазнають значно більшого статичного тиску порівняно з такими самими елементами зі схеми, зображеної на рис. 3.

Натомість у схемі, зображеній на рис. 3, другий контур формує квартирна система, і він практично не відчуває ніякого додаткового статичного тиску, працюючи за мінімально можливого тиску свого квартирної циркуляційного насоса. Така квартирна система може функціонувати у спрощеному режимі, а її заповнення теплоносієм можливе навіть шляхом ручного доливання. Це значно спрощує технічне обслуговування та знижує вимоги щодо надійності трубопроводів і арматури.

Для другого контуру квартирних систем опалення не обов'язкова вимога щодо підживлення хімічно очищеним деаерованим теплоносієм. З огляду на мінімальні втрати теплоносія в цьому контурі, підживлення може здійснюватися звичайною водопровідною водою.

Наявність у схемах, зображених на рис. 2 і 3, вторинних незалежних контурів створює можливість для виконання в них будь-яких ремонтних робіт або реконструкції в будь-який час незалежно від роботи першого контуру.

Додатковою перевагою схеми на рис. 3 є можливість застосування в ній нагрівальних приладів, арматури і насосів зі зниженими вимогами щодо характеристик міцності.

Встановлення у квартирних системах опалення циркуляційних насосів зі змінною швидкістю обертання забезпечує можливість регулювання теплового навантаження внаслідок зміни витрат теплоносія, що реалізовано зміною швидкості обертання теплоносія, тобто зміною кількості теплоносія, що циркулює в системі протягом часу.

Застосування таких незалежних схем сприяє зниженню витрат електроенергії на забезпечення циркуляції теплоносія.

Крім того, впровадження незалежних схем дає змогу зменшити загальні капітальні витрати на трубопроводи, запірно-регулювальну арматуру та нагрівальні прилади. Водночас слід урахувати, що загальні витрати на реалізацію такого технічного рішення, безумовно, зростуть через необхідність установа пластинчастого теплообмінника в кожній квартирі.

Найвагомішим аргументом, що диктує необхідність впровадження незалежних поквартирних схем опалення, є їхня істотно вища надійність порівняно із залежними схемами. Історичний досвід і сучасна практика у сфері теплопостачання свідчать, що надійність – це найважливіший критерій ефективності системи, особливо в багатоповерховій житловій забудові.

На рис. 4 зображено детальну принципову схему рекомендованої незалежної квартирної системи опалення, що передбачає можливість роботи з двома джерелами теплопостачання.

Установлення квартирної лічильника теплової енергії на ввіді в кожну квартиру в запропонованій схемі незалежної квартирної системи опалення дає змогу забезпечити стовідсотковий облік усієї кількості теплової енергії, що споживає квартира в цей момент, а також день, тиждень, місяць, квартал або рік [9].

Застосування двотрубного горизонтального розведення трубопроводів дає змогу технічно реалізувати індивідуальний тепловий пункт із мінімальними конструктивними та фінансовими витратами, оскільки сам процес регулювання теплопостачання здійснюється безпосередньо на рівні споживача – у межах окремої квартири.

В індивідуальному тепловому пункті всі регулювання зведені до підтримання необхідної середньої температури теплоносія на виході з нього, а також забезпечення сумарних витрат теплоносія, що утворено в результаті індивідуального регулювання його подавання кожним

споживачем на рівні своїх нагрівальних приладів із використанням терморегуляторів.

Крім того, до основних технічних переваг запропонованої схеми можна віднести таке:

1. Наявність пластинчастого теплообмінника створює технічну можливість організації альтернативного джерела тепlopостачання – електричного котла та дає можливість споживачу автономно запускати і завершувати опалювальний період відповідно до власних потреб, незалежно від графіка подавання теплової енергії централізованим джерелом.

2. Невеликі індивідуальні системи опалення можуть бути заповнені якісно

підготовленим теплоносієм один раз. Це рішення дасть змогу знизити потреби в підживленні систем хімічно очищеною деаерованою водою та мінімізувати подальші витрати на експлуатацію.

3. Зменшення загального споживання електроенергії завдяки значному зниженню напору циркуляційних насосів на централізованому джерелі тепlopостачання.

4. Повне гідравлічне розділення контурів теплоносія на зовнішній (центральне тепlopостачання) і внутрішній (квартирна система тепlopостачання) дає змогу забезпечити високу надійність, стабільність роботи системи та організувати індивідуальне незалежне регулювання теплоспоживання.

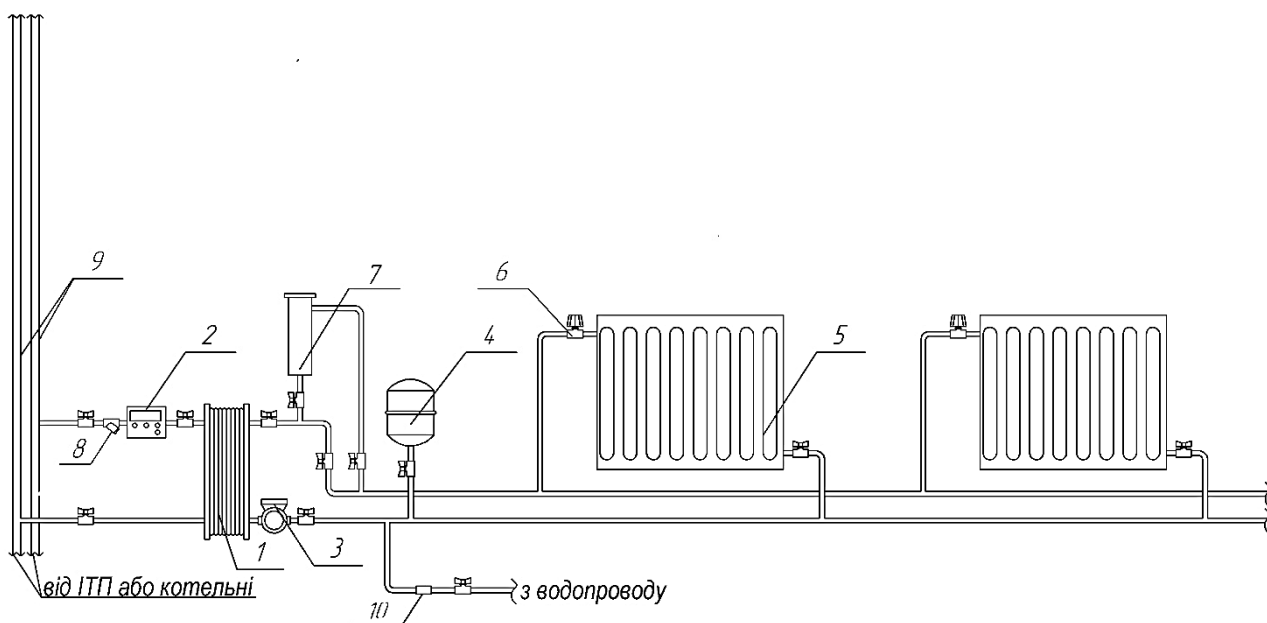


Рис. 4. Схема незалежної поквартирної системи опалення з двома джерелами тепlopостачання:

- 1 – пластинчастий теплообмінник; 2 – квартирний лічильник теплової енергії;
3 – циркуляційний насос; 4 – розширювальний бак; 5 – нагрівальний прилад;
6 – терморегулятор «Danfoss»; 7 – електричний котел; 8 – фільтр; 9 – головні стояки;
10 – зворотний клапан

У таблиці наведено техніко-економічний аналіз показників внутрішньобудинкових залежної та

незалежної поквартирних систем опалення з двома джерелами з повним спектром факторів, що забезпечують ефективне

функціонування систем з урахуванням виробництва, транспортування та споживання теплової енергії,

експлуатаційної надійності та можливості перетворення джерел теплопостачання за видами палива [10].

Таблиця

Техніко-економічний аналіз показників внутрішньобудинкових залежної та незалежної поквартирних систем опалення з двома джерелами теплопостачання

Номер	Показник	Залежна поквартирна система опалення з двома джерелами теплопостачання	Незалежна поквартирна система опалення з двома джерелами теплопостачання
1	2	3	4
1	Сукупне навантаження, Гкал/год	11,95	11,95
2	Навантаження на ГВП, Гкал/год	5,45	5,45
3	Навантаження на систему опалення, Гкал/год	6,5	6,5
4	Споживання теплової енергії за рік, Гкал	14301,4	14301,4
5	Споживання електроенергії електричними приладами, МВт·год	17286,2	4986,4
6	Споживання джерелами ЦТ, Гкал	0	10411,41
7	Споживання насосним обладнанням, МВт·год	39,6	0,8
8	Тариф на теплову енергію, ум. од./Гкал	25	25
9	Тариф на електроенергію, ум. од./кВт·год	0,592	1,479
10	Загальна вартість річного обсягу спожитої теплової енергії, ум. од.	0	260
11	Загальна вартість річного споживання електричної енергії, ум. од.	397	285
12	Загальні поточні витрати, ум. од.	397	545
13	Максимальні годинні навантаження, Гкал	6,5	6,5
14	Потужність джерел ЦТ, Гкал/год	0	4,55
15	Потужність електричних джерел теплопостачання	12,6	3,7
16	Плановий обсяг відпущеної теплової енергії за рік, Гкал	14301,4	14301,4
17	Капітальні інвестиції у проєкт, ум. од.	6175	7215
18	Поточні витрати на споживання теплової та електричної енергії, ум. од.	397	545
19	Собівартість 1 Гкал теплової енергії, що відпускає система теплопостачання, ум. од./Гкал	0,7167	0,9832
20	Приведені витрати, ум. од.	1940	2350

Продовження таблиці

1	2	3	4
21	Приведені витрати на відпускання 1 Гкал теплової енергії системою теплопостачання, ум. од./Гкал	135	165
22	Приведені витрати з розрахунку на 1 м ² опалюваної площі житлових приміщень, ум. од./м ²	43,1	53,2

Висновки

1. Для багатоповерхових житлових будинків серед усіх можливих схем внутрішньобудинкового опалення найбільш надійною і придатною в експлуатації є схема незалежної квартирної системи опалення з двома джерелами теплопостачання.

2. Сьогодні найбільш реальним другим джерелом у системах опалення з водяним теплоносієм для нового будівництва та реконструкції старих будівель є квартирні електричні котли.

3. Застосування незалежних поквартирних систем опалення дає змогу значно підвищити надійність теплопостачання та знизити експлуатаційні витрати.

4. Незалежні схеми забезпечують оперативне проведення будь-яких ремонтних і відновлювальних робіт в окремій квартирі або частині будівлі без необхідності припинення роботи системи теплопостачання в інших квартирах чи секціях будинку.

Список використаних джерел

1. Дяченко С. В. Реконструкція системи опалення як елемент термомодернізації старих багатоповерхових житлових будинків. *Технічні науки та технології*. 2025. № 2(40). С. 502–509. URL: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-2\(40\)-502-509](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-2(40)-502-509).
2. Про теплопостачання: Закон України від 02.06.2005 р. *Відомості Верховної Ради*. 2005. № 28. Ст. 373. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2633-15#Text> (дата звернення: 25.08.2025).
3. Клімов Р. О., Морозовська А. С. Енергетична ефективність комбінованих систем теплопостачання. *Збірник наукових праць ДДТУ*. 2021. № 2(39). С. 92-97. URL: <https://doi.org/10.31319/2519-2884.39.2021.11>.
4. Ma X., Li J., Ren Y. and et al. Performance and Economic Analysis of the Multi Energy Complementary Heating System under Different Control Strategies in Cold Regions. *Energies*. 2022. № 15(21). Article 8140. URL: <https://doi.org/10.3390/en15218140> (last access: 25.08.2025).
5. Шеренковський Ю. В. (2015). Порівняльний аналіз енергетичної ефективності будівель з комбінованою водяною системою теплопостачання від газоспоживальних та електричних котлів. *Scientific Bulletin of UNFU*. 2015. № 9 (25). С. 360-364. URL: <https://doi.org/10.15421/40250956>.
6. Martyr R., Moriarty J., Beck C. Optimal control of a commercial building's thermostatic load for off peak demand response. *Journal of Building Performance Simulation*. 2018. № 12. P. 580-594. URL: <https://doi.org/10.1080/19401493.2018.1535624> (last access: 26.08.2025).
7. Blum D., Zakula T., Norford L. Opportunity Cost Quantification for Ancillary Services Provided by Heating, Ventilating, and Air-Conditioning Systems. *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2017. № 8 (3). P. 1264–1273. URL: <https://doi.org/10.1109/TSG.2016.2582207> (last access: 26.08.2025).

8. ДБН В.2.5-20:2018. Газопостачання. Чинний від 2019–07–01. Київ: Мінрегіон України, 2019. 109 с. URL: https://dreamdim.ua/wp-content/uploads/2019/04/DBN-V2520-18_Gas.pdf (дата звернення: 26.08.2025).

9. Тарадай О. М. Теплозабезпечення: монографія. Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2025. 324 с. URL: <https://eprints.kname.edu.ua/68781/>.

10. Taradai O., Bugai V., Gvozdettskii O., Burda Y., Diachenko S. Modern Heating Systems for Multi-Story Residential Buildings. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2024. Article 012046. URL: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1376/1/012046> (last access: 26.08.2025).

Тарадай Олександр Михайлович, доктор технічних наук, професор кафедри теплогазопостачання і вентиляції, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова.

E-mail: alekst1704@gmail.com. ORCID iD: 0000-0002-4239-9895.

Дяченко Сергій Володимирович, аспірант кафедри теплогазопостачання і вентиляції, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова. E-mail: dyachenkosv460@gmail.com. ORCID iD: 0000-0003-0187-0684.

Taradai Oleksandr, Dr. Sc. (Tech.), Professor of the Department of Heat and Gas Supply, Ventilation, O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. Tel.: +38(050)3233333. E-mail: alekst1704@gmail.com.

ORCID iD: 0000-0002-4239-9895.

Diachenko Serhii, postgraduate student, Department of Heat and Gas Supply, Ventilation, O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. Tel.: +38(066)9626112. E-mail: dyachenkosv460@gmail.com.

ORCID iD: 0000-0003-0187-0684.

Статтю прийнято 09.09.2025 р.

УДК 711.1:711.4:711.5

РЕГУЛЮВАННЯ ПРОСТОРОВОГО РОЗВИТКУ ТЕРИТОРІЙ У РАМКАХ ЗОНИ ВПЛИВУ АГЛОМЕРАЦІЇ

Кандидати техн. наук А. М. Панкеєва, О. В. Завальний

REGULATION OF SPATIAL DEVELOPMENT OF TERRITORIES WITHIN THE AGGLOMERATION INFLUENCE ZONE

PhD (Tech.) A. Pankeieva, PhD (Tech.) O. Zavalniy

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.213.2025.341944>

Анотація. У статті розглянуто питання, що стосуються нормативного регулювання урбанізаційних процесів навколо великих і найбільших міст. Міста під впливом різних факторів починають «виходити» за свої межі, що супроводжується формуванням навколо них агломерацій. Акцентовано на відображенні агломерацій у вітчизняних законодавчих і нормативних документах. Визначено потребу вивчення їхніх особливостей і вироблення містобудівних і правових умов їхнього розвитку.

Ключові слова: агломерація, просторовий розвиток територій, зона впливу агломерації, урбанізація.

Abstract. The article considers the issues of spatial development of territories around large and largest cities. The development of territories is subject to objective laws. An important place among them is occupied by the laws of its spatial organization. They are based on taking into account the features of the natural, historical-cultural and transport-settlement framework that has developed and the interrelationship of their changes. Decisions on the development of a territory without taking into account these features and interrelationships can cause it serious damage. The reform of the administrative-territorial structure of Ukraine has drawn attention to the need to revise existing legislation and create methods and mechanisms for managing large and largest cities and adjacent territories. The article examines the definition of the essence of the concept of «agglomeration» and the reflection of agglomerations in existing legislative and regulatory documents. Two draft laws «On urban agglomerations» and «On amendments to certain legislative acts on the creation of legal grounds for the formation of an agglomeration as one of the forms of cooperation of territorial communities» have been registered in the Verkhovna Rada of Ukraine. They reflect the purpose of creating agglomerations and the conditions for the formation of urban agglomerations. An agglomeration is defined as a form of cooperation between the community of the city-center of the agglomeration and territorial communities located in the zone of influence of the city-center of the agglomeration. It has been established that existing legislative and regulatory documents do not sufficiently fully reflect the essence of the term «agglomeration», clear criteria, signs and properties by which it is possible to distinguish a territory as an agglomeration, to determine the boundaries of the territories of the zone of influence of agglomerations are not defined.

Keywords: agglomeration, spatial development of territories, agglomeration influence zone, urbanization.

Вступ. Проблеми, пов'язані з формуванням і розвитком агломерацій, є предметом дослідження в різних науках, таких як урбаністика, містобудування, географія, екологія, соціологія, економіка тощо. Сьогодні агломерацію розглядають як основний інструмент розвитку територій, що забезпечує високу якість життя населення. Велика кількість крупних і найкрупніших міст виходять за свої адміністративні межі та формують навколо себе агломерації. Складність питання обумовлено масштабністю явища, що розглядають, і пов'язаними з ним соціально-економічними та просторовими процесами. Умови, у яких складаються та існують агломерації і в яких треба ухвалювати рішення щодо їхнього розвитку, невпинно змінюються. У сучасних вітчизняних працях і дослідженнях питання агломерацій і їхнього подальшого розвитку потребують глибшого та повнішого вивчення. Законодавчі і нормативні документи, що регламентують відносини між містами та населеними пунктами, обмежені, а термін

«агломерація» не має чіткого правового визначення. Щоб вирішити ці та інші питання, потрібно глибше вивчити взаємодію міст і населених пунктів у рамках таких утворень, як агломерації, виявити напрями удосконалення законодавчої та нормативної документації щодо режиму використання територій зони впливу агломерації. Особливого значення це набуло після реформування адміністративно-територіального устрою України.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Великий внесок у теорію та практику розвитку агломерацій зробили такі відомі вчені, як Ю. М. Білоконь, Д. І. Богорад, Ж. Боже-Гарньє, А. Вебер, Н. М. Габрель, П. Геддес, Н. М. Дьомін, Дж. Каполані, Є. Є. Ключніченко, М. Руже, П. Селф, В. Т. Семенов, І. А. Фомін, Ж. Шабо, Ф. Шої та ін.

Визначення мети та завдання дослідження. Метою статті є визначення особливостей формування та розвитку агломерації, сутності поняття «агломерація». Відображення терміна

агломерація у вітчизняних законодавчих і нормативних документах.

Основна частина дослідження.

Питання урбанізованих утворень, які формувалися навколо крупних і найкрупніших міст, почали досліджувати ще наприкінці XIX століття. Міста почали «виходити» за свої адміністративні межі, поглинаючи прилеглі до них території. У результаті утворюються так звані агломерації. Десятиліттями вчені обговорюють питання, пов'язані з агломераціями, існує безліч термінів, що трансформуються з часом. Термін «агломерація» – не єдине визначення цього феномену. Існує безліч визначень поняття: міська агломерація, метрополія, метрополітенський ареал, метрополітенські території, субрегіон, урбанізовані райони, конурбації тощо.

У розвитку міських агломерацій виділяють характерні особливості: нарощування величезних міських скупчень із містом-центром (ядром), яке безперервно розповзається за свої адміністративні межі, захоплює прилеглі території та концентрує на них велику кількість населення; передмістя швидко розвиваються, зазвичай стихійно і некеровано; виникнення маятникових міграцій; систематичне пересування населення в межах агломерації до місць прикладання праці, навчання, культурно-побутового обслуговування, відпочинку набувають великих масштабів.

З. О. Орестович і В. Л. Любомирович у своїй роботі виділяють етапи формування міських агломерацій. На першому етапі відбувається концентрація населення у промислових центрах і поблизу них. Відбувається розвиток транспортної мережі, що з'єднує центральне місто і передмістя. Навколо міста-ядра агломерації довколишні поселення стають містами-супутниками. Другий етап – це переміщення населення з центральних міських районів у зручніші для проживання передмістя і призупинення «розповзання» міста-ядра агломерації. На третьому етапі великі підприємства

виходять за межі міста-ядра, переміщення населення відображають у постійних міграційних потоках від міста-ядра до менших населених пунктів. На завершальному етапі відбувається процес реурбанізації. Частина населення переміщається в місто, яке було раніше залишене [1].

Досліджувати розвиток і формування агломерацій необхідно на основі системного аналізу. За результатами системного аналізу можуть бути розроблені стратегії та рекомендації щодо управління просторового розвитку територій, спрямовані на досягнення сталого розвитку агломерації, із залученням різних зацікавлених сторін, включаючи місцеві органи влади, громадські організації, бізнес і населення, до ухвалення рішень і реалізації стратегій сталого розвитку [2].

Термін «агломерація» вперше був використаний шотландським професором П. Геддесом: «агломерація – це нова форма угруповання населення, відповідно елементами цієї системи є населення і соціальні зв'язки» [3]. Українські вчені протягом багатьох років активно досліджували це питання. У роботі В. М. Кубійовича, датованій 1927 роком, проаналізовано процес урбанізації, концентрації населення і продуктивних сил у містах і їхніх прилеглих приміських територіях [4]. У 1960-ті роки науково-дослідним роботам із питань формування, розвитку агломерацій і визначенням їхніх меж в Україні присвячені праці Д. І. Богорада, А. Г. Вишневецького, І. О. Фоміна. За визначенням Д. І. Богорада, «міські агломерації – різновид систем населених пунктів, їхня більш розвинута форма, яка є «ущільненням стійких і глибоких різноманітних зв'язків» [3]. Український містобудівник І. О. Фомін визначає міську агломерацію як «територіально-економічне угруповання з типовими проявами концентрації населених пунктів, як своєрідну форму розвитку міст [5].

Слід зазначити визначення англійського містобудівника П. Селфа. Він визначає агломерації як «райони суцільної урбанізації, що оточують великі населені пункти. Безперервно розширюючись, поглинаючи на своєму шляху дрібні поселення, «місто-центр», не зустрічаючи ніяких перешкод, збирає в одне ціле, у суцільну масу цегли і вапна всі найближчі околиці».

Зарубіжні вчені розглядали міську агломерацію як територію з безперервною забудовою, що склалася навколо ядра і має включати не менше 2 тис. осіб. Французький географ Дж. Каполані визначає міську агломерацію як «систему міст і селищ із взаємопов'язаними функціональними відносинами, тенденцією до зрощення в одну просторову загальну міську зону» [6].

На думку географа М. Руже, який першим ужив термін «агломерація» щодо розселення, «вона виникає тоді, коли концентрація міських видів діяльності виходить за межі адміністративних меж і поширюється на сусідні населені пункти, що є новою формою розселення й розміщення деяких видів економічної діяльності» [7].

Французькі урбаністи П'єр Мерлен і Франсуаза Шое формулюють поняття агломерації як систему, що включає місто і його передмістя [8].

Особливо слід зупинитися на зв'язках у рамках агломерації. У більшості визначень приділяють увагу різним видам зв'язків між населеними пунктами в агломераціях. З точки зору того, що агломерація належить до форм розселення та визначена як система розселення, до неї входять лише трудові, культурно-побутові та рекреаційні зв'язки, які відображені в переміщенні населення по території.

Автори розглядають агломерацію як форму розселення, що виникає на базі великого міста (або кількох міст), створює значну зону урбанізації з тенденцією до зрощення сусідніх поселень, і як систему сучасного розселення.

Незважаючи на те, що цією проблематикою займаються вже багато років, досі немає чітко закріпленого визначення терміна «агломерація», визначених дефініцій, за якими можна виокремити територію як агломерацію в чинному законодавстві та нормативній документації. Особливого значення це набуває після зміни адміністративно-територіального устрою України.

Зважаючи на проведення реформи децентралізації, агломерації в Україні не мають правового статусу, а в багатьох країнах світу, наприклад Франція, США, Канада, термін «агломерація» активно використовуваний у законодавстві.

Відповідно до реформи децентралізації агломерації набувають великого значення для забезпечення стійкого економічного зростання міст в Україні. Хоча питання агломерацій обговорюють у теорії місцевого самоврядування протягом останнього десятиліття, законодавчого визначення досі немає [9].

І. Лещух вказує на те, що відсутність уніфікованої нормативно-правової бази та різноманітність підходів щодо визначення меж і формування агломерацій в Україні створюють численні виклики. Зокрема, це загрожує правовій стабільності агломерацій, ускладнює функціонування інституційних механізмів управління і регулювання їхнього розвитку, а також породжує ризики нерівномірного розподілу державної підтримки. Такі проблеми можуть мати тривалі наслідки, ставлячи під загрозу досягнення збалансованого територіального розвитку [10].

Офіційне визначення терміна «міська агломерація» подане в Постанові Кабінету Міністрів України «Про Основні напрями забезпечення комплексного розвитку малих монофункціональних міст» (на сьогодні втратила чинність): «компактне територіальне розміщення міських населених пунктів, об'єднаних

інтенсивними господарськими, трудовими і культурно-побутовими зв'язками» [11].

Також термін «агломерація» зафіксовано в таких законодавчих і нормативних документах [12-17]:

- Указ Президента України «Про заходи щодо впровадження Концепції адміністративної реформи в Україні» від 22.07.1998 р. № 810/98 («*міська агломерація* не є новою адміністративно-територіальною одиницею, а являє собою організаційне утворення, яке складається з кількох територіальних громад, що мають на меті спільну реалізацію функцій місцевого самоврядування»);

- Закон України «Про затвердження Загальнодержавної програми розвитку малих міст» від 04.03.2004 р. № 1580-IV («завдання розвитку соціальної сфери окремих малих міст виконуватимуться з урахуванням їхніх особливостей, а саме: для категорії малих міст-супутників, населення яких має змогу користуватися розвинутою сферою соціальних послуг великого міста – центра цієї *міської агломерації*»);

- Розпорядження Кабінету Міністрів України від 01.08.2006 р. № 447-р «Про схвалення Концепції створення індустріальних (промислових) парків» («формування мережі державних і регіональних індустріальних (промислових) парків повинне здійснюватися відповідно до основних напрямів розвитку державної і регіональної промислової політики з урахуванням завдань, пов'язаних з розвитком міських агломерацій»; «індустріальні (промислові) парки доцільно створювати у промислових регіонах поблизу великих *міських агломерацій*...»);

- Державна стратегія регіонального розвитку на період до 2020 року, затверджена постановою Кабінету Міністрів України від 06.08.2014 р. № 385 («...концентрація економічної активності в містах України потребує від органів місцевого самоврядування прийняття рішень, спрямованих на відповідну та швидку реакцію на процеси *міської*

агломерації»; «удосконалення системи стратегічного планування регіонального розвитку на загальнодержавному та регіональному рівні буде забезпечено шляхом виконання таких завдань: ... впровадження європейської системи статистичної звітності на регіональному рівні у форматі NUTS (NUTS 2 – регіон, NUTS 3 – група районів (субрегіон) та *міська агломерація*»);

- ДБН 360-92** «Містобудування. Планування і забудова міських і сільських поселень» («розвиток системи розселення повинен спиратися на ту мережу міських і сільських поселень, яка склалася, включаючи *агломерації* існуючі і ті, що формуються»);

- ДБН Б.2.2-12:2019 «Планування і забудова територій» («індустріальні, інноваційні парки повинні створюватися в регіонах з відповідною кількістю трудових ресурсів, розміщуватися в межах населеного пункту або за його межами, в складі *агломерацій* і мати зручний транспортний зв'язок із сільбищними територіями»).

З утворенням об'єднаних територіальних громад зросла кількість пропозицій щодо внесення змін до чинних законів України.

Наразі ухвалено низку законів, які регулюють співпрацю між територіальними громадами, іншими формами місцевого самоврядування та урядовими органами, зокрема «Про співробітництво територіальних громад», «Про асоціації органів місцевого самоврядування» [18, 19]. Але в цих законах термін «агломерація» не зустрічається.

Одним із важливих питань є визначення місця агломерацій на перспективний період у системі розселення і територіальної організації господарства країни та обґрунтування основних напрямів удосконалення їхнього розвитку, а також механізмів регулювання цих процесів.

За останні десятиліття подано на розгляд два законопроекти, у яких ідеться про агломерації: «Про міські агломерації»

від 17.07.2017 р. № 6743 і «Про внесення змін до деяких законодавчих актів щодо створення правових підстав для утворення агломерації як однієї з форм співробітництва територіальних громад» від 19.12.2019 р. № 2637 [20, 21].

Метою законопроекту «Про міські агломерації» є «визначення організаційно-правових засад формування міських агломерацій територіальними громадами сіл, селищ і міст, у тому числі об'єднаними територіальними громадами, принципів і механізмів взаємодії територіальних громад у межах міських агломерацій, гарантій і відповідальності міських агломерацій, а також форм підтримки державою міських агломерацій». За законопроектом, «міська агломерація – це форма співробітництва між громадою міста-центру агломерації і територіальними громадами сіл, селищ, міст, які знаходяться в зоні впливу міста-центру агломерації та мають інтенсивні зв'язки у сферах економіки, праці, культури та побуту з містом-центром агломерації, з метою спільного вирішення окремих функцій місцевого самоврядування».

За законопроектом, міську агломерацію можна виокремити за таких умов: 1) центр міської агломерації – населений пункт, віднесений до категорії міст, що має передумови для виконання функцій адміністративного центру міської агломерації; 2) ширину зони впливу міста-центру агломерації визначають індивідуально в кожній міській агломерації; 3) мінімальна кількість суб'єктів формування міської агломерації, крім центру агломерації, має бути не менше трьох територіальних громад; 4) загальна кількість населення територіальних громад, що беруть участь у формуванні міської агломерації, не може бути менше ніж 100 тисяч осіб; 5) територія міської агломерації має бути нерозривною, межі міської агломерації визначені за зовнішніми межами юрисдикції рад територіальних громад.

За законопроектом «Про внесення змін до деяких законодавчих актів України щодо створення правових підстав для утворення агломерації як однієї з форм співробітництва територіальних громад», агломерація – це форма співробітництва територіальної громади, що виконує функції центру агломерації і територіальних громад, які розташовані в зоні впливу центру агломерації та мають із ним інтенсивні господарські, трудові, культурно-побутові зв'язки, що спричиняють значну щоденну маятникову міграцію населення. Також надано визначення «центру агломерації», «раді агломерації» та «зоні добросусідства».

До критеріїв формування агломерації відносять таке: 1) агломерація може бути утворена навколо міста з чисельністю постійного населення понад 200 тисяч осіб або меншого міста, за умови якщо спільна чисельність постійного населення потенційних учасників агломерації складає не менше 200 тисяч осіб, а таке місто відповідає вимогам щодо центру агломерації, встановленим законодавством; 2) територіальні громади, що межують із територіальними громадами – членами агломерації та входять до зони впливу центру відповідної агломерації, можуть приєднуватися до такої агломерації за рішенням відповідної ради територіальної громади та ради агломерації; 3) територія агломерації має бути нерозривною; 4) методику порядку визначення зони впливу центру агломерації затверджує Кабінет Міністрів України.

У березні 2023 року Комітет Верховної Ради з питань організації державної влади, місцевого самоврядування, регіонального розвитку та містобудування направив для доопрацювання законопроект «Про внесення змін до деяких законодавчих актів України щодо створення правових підстав для утворення агломерації як однієї з форм співробітництва територіальних громад».

Державна стратегія регіонального розвитку на 2021–2027 роки передбачає створення законодавчої основи

функціонування та розвитку агломерацій, забезпечення збалансованого просторового розвитку територій, що входять до їхнього складу. У додатку наведено межі агломерацій – Київської, Харківської, Дніпро-Кам'янської, Запорізької, Криворізької, Одеської і Львівської [22].

Як видно з наведеного, немає однастайності у визначенні сутності поняття «агломерація», визначення єдиних критеріїв, властивостей, ознак, за якими можна виокремити територію як агломерацію та розробити методи визначення меж територій зони впливу агломерації.

Відсутність правового регулювання в Україні ускладнює формування, розвиток і функціонування агломерацій. Запропоновані законопроекти, попри наявність певних недоліків, мали потенціал значного прискорення процесу розвитку агломерацій. Особливо ефективним це могло стати за умови своєчасного усунення виявлених недоліків [23].

Основного значення в сучасних умовах набуває об'єднання в рамках агломерації територіальних громад на основі добровільних договірних засад із широким залученням громадських структур і процедур, формуванням координаційного органу з відповідним експертним забезпеченням. На цій основі має бути спільне (скоординоване) використання земельних та інших ресурсів у межах агломерації, єдина екологічна, економічна, соціальна, містобудівна, демографічна, міграційна політика, що поки не повністю реалізована на практиці та в законодавстві.

Висновки. Можна зробити висновок, що потрібно вивчити всі особливості агломерації та виробити містобудівні та правові умови їхнього розвитку. Розглядаючи розвиток агломерацій на довгострокову перспективу, важливо дотримуватися таких вимог:

1. Формування агломерації – це процес, який неможливо зупинити. Вони вже існують, і треба створювати такі методи

та механізми, які дадуть змогу регулювати і керувати, а в деяких випадках і стримувати розвиток агломерацій. Керований їхній розвиток посилить позитивні властивості та результати, некерований призведе до нагромадження недоліків, властивих великому місту, але в ще більших розмірах і значно більшій території.

2. Заходи щодо цілеспрямованого регулювання розвитку агломерації можна розробити і реалізувати лише з об'єднанням зусиль усіх зацікавлених учасників процесу: населення, яке проживає на території агломерації, громадських організацій які представляють інтереси населення, органів місцевого самоврядування, представників бізнес-спільноти.

3. Закріплення на законодавчому рівні терміна «агломерація», який повною мірою відображує сутність цього поняття, урахувавши всі сфери наук, які займаються такою тематикою, зокрема містобудування, географія, економіка, демографія, соціологія тощо.

4. Надання офіційного статусу агломераціям, визначивши їхній правовий статус. Чіткість і узгодженість термінологічної бази законодавчої та нормативної документації.

5. Визначення чітких єдиних кількісних і якісних критеріїв, ознак, властивостей, за якими можна виокремити територію як агломерацію, що дасть змогу розробити методи визначення меж територій зони впливу агломерації.

6. Дослідження і впровадження зарубіжного досвіду управління агломераціями та формування рекомендацій щодо створення системи правового та нормативного регулювання територій у складі зони впливу агломерації.

7. Особливу увагу слід приділяти розробленню містобудівної документації, яка охоплює всю територію агломерації. Безперечно, її слід розробляти з урахуванням комплексних планів, Державної стратегії регіонального розвитку, Генеральної схеми планування території України.

Список використаних джерел

1. Сірик З. О., Засадний В. Л. Теоретичні засади дослідження агломераційних чинників інвестиційної привабливості громад. *Український журнал прикладної економіки та техніки*. 2024. Т. 9. № 1. С. 302–309.
2. Uhodnikova Olena, Kostiantyn Viatkin, Kolodezny Andrii Methods and models of urban planning for sustainable development processes in agglomerations. 2024 IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 1376 012045. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/1376/1/012045/pdf>.
3. Дронова Л. О. Геоурбаністика: навч. посіб. Київ: Видавничо-поліграфічний центр «Київський університет», 2014. 419 с.
4. Кубійович В. З антропогеографії Нового Санча. *Наукові праці*. Париж-Львів, 1996. Т. 1. С. 286–506.
5. Фомін І. О. Основи теорії містобудування. Київ: Наукова думка, 1997. 190 с.
6. Coppolani J. De Queleques Notions Fondamentales et Définitions en géographie urbaine. *La Vie Urbaine*. 1960. 275 s.
7. Дідик В. В., Павлів А. П. Планування міст: навч. посіб. Львів, 2003. 412 с.
8. Merlin P., Choay F. Ensemble constitué par une ville et ses banlieues. Paris: PUF, 1988.
9. Шустер Б. Перспектива розвитку та функціонування міських агломерацій в Україні. *Регіональні студії*. 2024. № 36. С. 69–76. DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-6170/2024.36.11>.
10. Лещух І. Критерії делімітації агломерацій: зарубіжний досвід та вітчизняна практика. *Економічний часопис Волинського національного університету імені Лесі Українки. Розділ «Економіка»*. 2025. № 1. С. 7–18. URL: <https://echas.vnu.edu.ua/index.php/echas/article/view/965/793>.
11. Про основні напрями забезпечення комплексного розвитку малих монофункціональних міст : Постанова Кабінету Міністрів України від 17.03.2000 р. № 521. URL: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/521-2000-п> (втратила чинність).
12. Про заходи щодо впровадження Концепції адміністративної реформи в Україні : Указ Президента України від 22.07.1998 р. № 1580-IV. URL: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/810/98/page>.
13. Про затвердження Загальнодержавної програми розвитку малих : Закон України від 04.03.2004 р. № 1580-IV. URL: <http://zakon0.rada.gov.ua/laws/show/1580-15/page>.
14. Про схвалення Концепції створення індустріальних (промислових) парків: Розпорядження Кабінету Міністрів України від 01.08.2006 р. № 447-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/447-2006-%D1%80#Text>.
15. Про затвердження Державної стратегії регіонального розвитку на період до 2020 року: Постанова Кабінету Міністрів України від 06.08.2014 р. № 385. URL: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/385-2014-п>.
16. ДБН 360-92**. Містобудування. Планування і забудова міських і сільських поселень (втратив чинність). URL: https://dbn.co.ua/load/normativy/dbn/dbn_360_92_ua/1-1-0-116.
17. ДБН Б.2.2-12:2019. Планування і забудова територій. Чинний від 01-10- 2019 р. URL: https://dbn.co.ua/load/normativy/dbn/b_2_2_12/1-1-0-1802.
18. Про співробітництво територіальних громад : Закон України від 17.06.2014 р. № 1508-VII. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1508-18#Text>.
19. Про асоціації органів місцевого самоврядування : Закон України від 16.04.2009 р. № 1275-VI. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1275-17#Text>.
20. Про міські агломерації: Проект Закону від 17.07.2017 р. № 6743. URL: http://w1.c1.rada.gov.ua/pls/zweb2/webproc4_1?pf3511=62318.

21. Про внесення змін до деяких законодавчих актів щодо створення правових підстав для утворення агломерації як однієї з форм співробітництва територіальних громад: Проект Закону від 19.12.2019 р. № 2637. URL: http://w1.c1.rada.gov.ua/pls/zweb2/webproc4_1?pf3511=67710.

22. Про затвердження Державної стратегії регіонального розвитку на 2021-2027 роки: Постанова Кабінету Міністрів України від 05.08.2020 р. № 695. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/695-2020-%D0%BF#Text>.

23. Стешенко Т. В., Алиєва А. В. Міські агломерації як форма співробітництва територіальних громад. *Юридичний науковий електронний журнал*. 2023. № 3. С. 114-117. DOI: <https://doi.org/10.32782/2524-0374/2023-3/25>.

Панкеева Анна Миколаївна, кандидат технічних наук, доцент кафедри міського будівництва та територіального планування, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова.

ORCID: 0000-0002-7915-6651. Тел.: +38(050)7709825. E-mail: pankeevaanna@i.ua.

Завальний Олександр Вячеславович, кандидат технічних наук, професор кафедри міського будівництва та територіального планування, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова. ORCID: 0000-0002-6191-2893. Тел.: +38(067)5771742. E-mail: azavalniy@i.ua.

Pankeieva Anna, PhD (Tech). Associate Professor, department of urban construction and territorial planning, O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. ORCID: 0000-0002-7915-6651.

Tel.: +38(050)7709825. E-mail: pankeevaanna@i.ua.

Oleksandr Zavalniy, PhD (Tech). Professor, department of urban construction and territorial planning, O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. ORCID: 0000-0002-6191-2893. Tel.: +38(067)5771742.

E-mail: azavalniy@i.ua.

Статтю прийнято 18.09.2025 р.

УДК 69.059.2:69.03:624.012.45

ВИКОРИСТАННЯ ТРУБОБЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЙ У РЕКОНСТРУКЦІЇ ЗРУЙНОВАНИХ ПЕРЕКРИТТІВ ВЕЛИКОПАНЕЛЬНИХ БУДИНКІВ

Кандидати техн. наук Ф. І. Казімагомедов, К. І. Вяткін,
старш. викл. Н. В. Мороз, фах. М. М. Селезньов

THE USE OF CONCRETE-FILLED STEEL TUBE STRUCTURES IN THE RECONSTRUCTION OF DESTROYED FLOOR SLABS IN LARGE-PANEL BUILDINGS

PhD (Tech.) F. Kazimagomedov, PhD (Tech.) K. Viatkin, Sr. lecturer N. Moroz,
Specialist M. Seleznev

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.213.2025.341963>

Анотація. У статті проаналізовано основні пошкодження перекриттів великопанельних будівель унаслідок артилерійських обстрілів. Запропоновано метод реконструкції пошкоджених перекриттів великопанельних залізобетонних житлових будинків на прикладі зруйнованих споруд у місті Харкові. Метод полягає у створенні субкаркаса з труобетонних конструкцій, заповнених спеціально підібраним складом

(фібробетон і модифікатор бетону), на який заливають основне перекриття. Використання класичного залізобетонного перекриття або металевого субкаркаса призводить до суттєвого збільшення товщини перекриття порівняно з тими, що застосовують у великопанельному будівництві. Це зумовлено особливостями монтажу безпосередньо на будівельному майданчику, які відрізняються від заводських умов. Запропонований у статті субкаркас демонструє, що застосування таких конструкцій дає змогу значно зменшити перерізи несучих елементів.

Ключові слова: труبوبетон, реконструкція, відновлення, перекриття, великопанельна будівля, конструкції.

Abstract. The full-scale military invasion of Ukraine by the Russian Federation in February 2022 caused widespread damage to civilian infrastructure, including large-panel residential buildings constructed primarily in the late Soviet period. These structures are prevalent in urban districts like Saltivka, a densely populated area of Kharkiv located near the state border. Due to their modular design and proximity to frontline hostilities, many of these buildings experienced either partial or complete destruction, particularly affecting floor slabs.

This study investigates the restoration of floor systems in damaged large-panel buildings and proposes a practical, innovative reinforcement method based on tubular concrete (concrete-filled steel tubes) enhanced with a specialized infill composition. The solution involves constructing a steel subframe integrated with a modified concrete core that includes steel fiber and mineral additives to improve mechanical performance. Structural analysis and experimental tests demonstrated that this configuration significantly improves the stiffness and strength characteristics of floor elements while allowing for a reduction in slab thickness. Compared to traditional solutions, the proposed system offers up to 50 % less deformation than empty steel sections and about 30 % better performance than standard concrete-filled tubes.

From a construction standpoint, the design allows for efficient assembly within existing buildings, maintaining room height and minimizing the impact on architectural ergonomics. Additional central beams redistribute loads more effectively, transforming the floor into a system supported along its entire perimeter, which reduces bending moments and enhances load-bearing capacity.

This method addresses critical challenges in post-war reconstruction by providing a cost-effective, scalable approach to residential rehabilitation. Its compatibility with prefabricated panel housing makes it particularly valuable in regions where restoring living space quickly and safely is essential. The findings confirm that tubular concrete elements with optimized infill materials can serve as a reliable alternative to traditional slab replacement techniques in the context of modern structural retrofitting.

Keywords: concrete-filled tubes, structural rehabilitation, floor restoration, large-panel construction, load-bearing systems, reconstruction.

Вступ. Після початку повномасштабного вторгнення Російської Федерації в лютому 2022 року майже всі міста України зазнали ракетних і артилерійських обстрілів, що призвело до повного або часткового руйнування житлового фонду. Особливо значних ушкоджень зазнали прикордонні міста, зокрема місто Харків [1]. Найбільше

постраждали так звані «спальні» райони, імовірно, через їхню близькість до державного кордону з країною-агресором. Ці райони забудовували переважно після 1980 року, а основну частину житлового фонду в них складають великопанельні будинки.

Великопанельні будівлі (ВПБ) мають як певні недоліки, так і суттєві переваги.

Серед мінусів — не завжди вдале планування квартир, невелика висота приміщень, значні тепловтрати та інші архітектурні обмеження. Проте головною перевагою таких конструкцій є можливість швидкого зведення завдяки застосуванню заводських залізобетонних елементів.

Високі просторово-конструктивні жорсткості великопанельних будинків досягають за рахунок малого кроку внутрішніх несучих стін, а також надійності з'єднувальних вузлів між вертикальними та горизонтальними елементами заводського виготовлення, які мають достатню міцність.

Ми провели детальне обстеження кількох пошкоджених великопанельних будівель, розташованих на Салтівці — одному з найбільших житлових районів Харкова (рис. 1). Цей район зазнав значних пошкоджень через близьке розташування до державного кордону — приблизно 20 км. На початку повномасштабного вторгнення поблизу нього відбувалися активні бойові дії. Усі досліджувані будинки були класифіковані як аварійні. Незважаючи на індивідуальний характер пошкоджень у кожному конкретному випадку, їх вдалося згрупувати за типовими ознаками.



Рис. 1. Типові руйнування ВПБ

Було виділено три основні групи пошкоджень:

1. Повне руйнування, яке не підлягає відновленню.
2. Часткове руйнування, спричинене прямими влучаннями снарядів. У більшості випадків пошкоджені елементи можуть бути відновлені в межах капітального ремонту.
3. Незначні пошкодження, спричинені осколковою дією, — відколи, тріщини,

подряпини. Такі дефекти усувають під час поточного ремонту.

У статті розглядаємо тільки перекриття ВПБ.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На сьогодні існує багато класичних, а також сучасних (інноваційних) методів відновлення пошкоджених панельних будинків (рис. 2). Застосування ідентичних панелей наразі є неможливим, оскільки заводи з їх виготовлення вже не

функціонують через застарілість технологій і відсутність необхідних обсягів виробництва.

Тому до класичних методів можна віднести використання монолітного залізобетону або металевих каркасів [2], що призводить до збільшення товщини перекриття, а отже, зменшення висоти

приміщення, яка і без того є невеликою в таких будинках.

Деякі дослідники [3] пропонують застосовувати високоміцні матеріали (бетон і арматуру), що, безсумнівно, дає змогу зменшити переріз елементів, проте суттєво підвищує вартість перекриття. Крім того, слід урахувати дефіцит цих матеріалів.



Рис. 2. Приклад відновлення ВПБ

Існують методи із застосуванням сталобетонних балок [4, 5], однак вони значно збільшують загальну товщину перекриття.

Автори окремих досліджень також пропонують використання класичного трубобетону [6, 7], проте через високу деформативність такої конструкції використання трубобетонного сердечника, на нашу думку, є менш доцільним.

Також велика кількість досліджень [8, 9] рекомендують для реконструкції використовувати BIM-технології для аналізу та результатів. Безумовно, це сучасна методика, і ми її дотримуємося.

Визначення мети та завдання дослідження. У процесі вибухового впливу на конструкції ВПБ пошкоджені не лише окремі елементи, такі як перекриття чи стіни, а і їхні зварні з'єднання. Через особливості проектування майже всі стіни у ВПБ є несучими, що потенційно може призводити до серйозних руйнувань усієї будівлі навіть із втратою однієї з несучих конструкцій. На щастя, такі випадки трапляються нечасто завдяки значному запасу міцності та жорсткості споруд. Це дає змогу сусіднім елементам компенсувати втрату функцій пошкодженого елемента через перерозподіл навантаження.

Суть запропонованого методу відновлення перекриття полягає у створенні металевго субкаркаса на місці зруйнованих плит перекриття з подальшим влаштуванням монолітної плити. Така конструкція відновлює несучу здатність втраченої панелі та передає навантаження на стіни, відновлюючи тим самим цілісність системи ВПБ.

Нами, а також іншими дослідниками, було вдосконалено конструкцію типу «трубобетон» [10-13]. Трубобетон — це сталева труба, заповнена бетоном. Завдяки об'ємному обтиску бетону стінками труби його міцнісні та деформаційні характеристики суттєво покращені, що відкриває широкі можливості для застосування таких елементів. Основною перевагою трубобетону є висока міцність і знижена деформативність, що дає змогу зменшити поперечні розміри конструкцій. Це особливо актуально для ВПБ, де всі конструктивні елементи мають мінімально допустимі габарити, зумовлені заводським виготовленням. У польових умовах досягти таких розмірів традиційними методами майже неможливо, що призводить, зокрема, до зменшення корисної площі квартири після її відновлення.

Зменшення перерізу є особливо важливим із відновленням перекриттів, адже стандартна товщина перекриття у ВПБ становить 140–160 мм. Отримати аналогічну товщину монолітної плити в умовах великого приміщення з відношенням сторін більше двох досить складно, оскільки в такому випадку плита працює як балка на двох опорах — у короткому напрямку. Збільшення товщини перекриття призводить до зменшення висоти відновлених приміщень, що негативно впливає як на архітектурну складову, так і ергономіку житла. Також це ускладнює вирішення вузлів стикування старих і нових перекриттів із несучими стінами.

Ми пропонуємо створити субкаркас із трубобетонних конструкцій, заповнених спеціально розробленим складом [11, 12],

щоб ще більше зменшити поперечні розміри сталевих елементів.

Основна частина дослідження. Як приклад розглянемо типову велику кімнату (вітальню) у ВПБ (серія 111-162-1п, 2п, 3п) розмірами 5250 × 3250 мм.

По периметру кімнати пропонується встановлення трубобетонних стійок. Ці стійки можуть займати всю висоту стіни або лише її верхню частину у вигляді консолей. Кріплять їх за допомогою шпильок; у деяких випадках можна заглибити в стіну або ж використовувати як несучий каркас замість стіни.

Поверх стійок монтують субкаркас, що буде опорою для майбутньої плити перекриття. Цей субкаркас спрощує монтаж і збільшує площу спирання. Можливий також варіант конструктивного рішення, за якого субкаркас і плита перекриття знаходяться на одному рівні. Балки до стін кріплять також шпильками. У разі потреби кількість стійок можна збільшити для забезпечення необхідної жорсткості конструкції.

Важливим елементом такої системи є додаткова балка, розташована по центру прольоту кімнати. Завдяки їй змінюється схема роботи всієї плити перекриття: вона починає працювати як плита, оперта по контуру. Це призводить до значного зменшення згинальних моментів у плиті, що позитивно впливає на несучу здатність та економічність конструкції.

Схематично цей приклад показано на рис. 3, без детального опрацювання вузлів.

Нами було проведено експеримент із визначення деформацій трубобетонної балки, заповненої як стандартним бетоном класу С16/20 (Вар. В-2), так і спеціально розробленим складом (Вар. В-3), а також порожньою трубою без заповнення (Вар. В-1).

Спеціальний склад включає бетон С16/20 з додаванням 1,5 % металевої фібри та 15 % модифікатора на основі шламу мокрого газоочищення виробництва феросиліцію, а також суперпластифікатора СП-1.

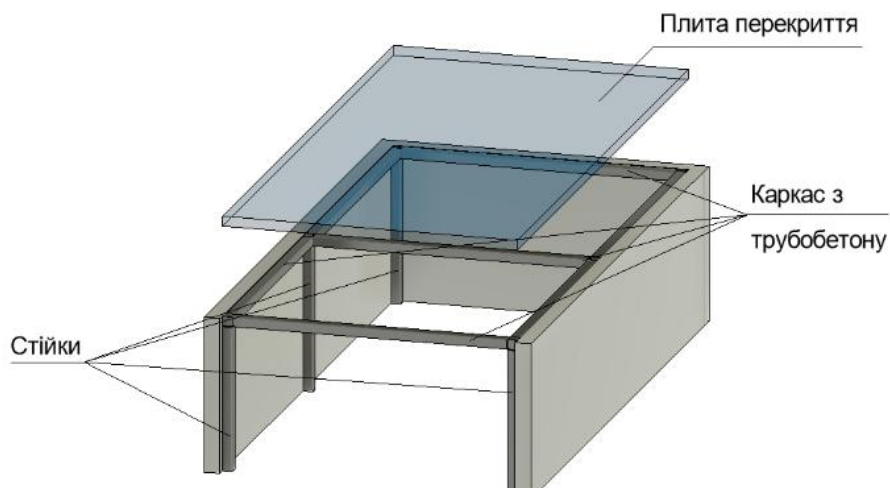


Рис. 3. Схема перекриття

Для дослідження виготовляли конструкції з такими параметрами (кожен зразок по три одиниці):

- поперечний переріз: $100 \times 100 \times 3$ мм (труба квадратна, $t_{\text{стінки}} = 3$ мм);
- довжина: 1300 мм.

Випробування проводили на гідравлічному пресі з прольотом 1200 мм,

навантаження прикладали у третинах прольоту, створюючи зону чистого згину (фото і схему експерименту подано на рис. 4, 5).

Результати вимірюних деформацій наведено в табл. 1, 2.

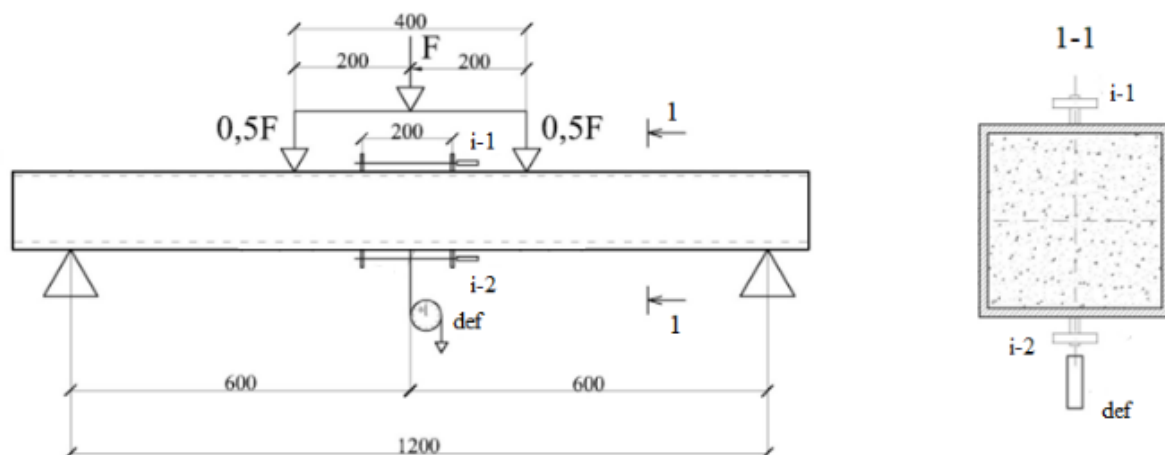


Рис. 4. Схема експериментального дослідження



Рис. 5. Згинальний елемент трубобетону після випробування

Таблиця 1

Максимальні прогини балок у серії експериментів

Серія зразків	Максимальний прогин f , мм	Відповідне навантаження F , кН	Середнє значення Δf , мм
B1-1	10,06	90	9,83
B1-2	9,8	75	
B1-3	9,63	75	
B2-1	9,5	86	10
B2-2	10,7	95	
B2-3	9,8	89	
B3-1	9	97	9,33
B3-2	10,2	10,8	
B3-3	8,79	95	

Таблиця 2

Значення поздовжніх деформацій

Згинальний момент M , кНм	Деформації $\varepsilon_a \cdot 10^{-5}$					
	B-1		B-2		B-3	
	i-1	i-2	i-1	i-2	i-1	i-2
6	16	-20	13	-16	7	-9
10	30	-50	20	-30	12	-17
12	40	-72	25	-37	16	-20
14	70	-120	30	-50	18	-24
20	-	-	170	-180	30	-42
26	-	-	-	-	70	-99

Як впливає з таблиці, застосування запропонованої методики майже на 50 % ефективніше, ніж використання виключно металевих конструкцій, і на 30 % ефективніше, ніж класичний трубобетон.

Змоделюємо вибране перекриття (рис. 3) у програмному комплексі «Ліра». Як плити використаємо пластину з

параметрами бетону товщиною 150 мм, як запропонований субкаркас – стрижень із заданою жорсткістю, обумовленою експериментальними дослідженнями [11, 12], що відповідають трубобетонній балці В-3. У результаті розрахунку знайдено максимальні навантаження на перекриття і прогини (рис. 6, 7).

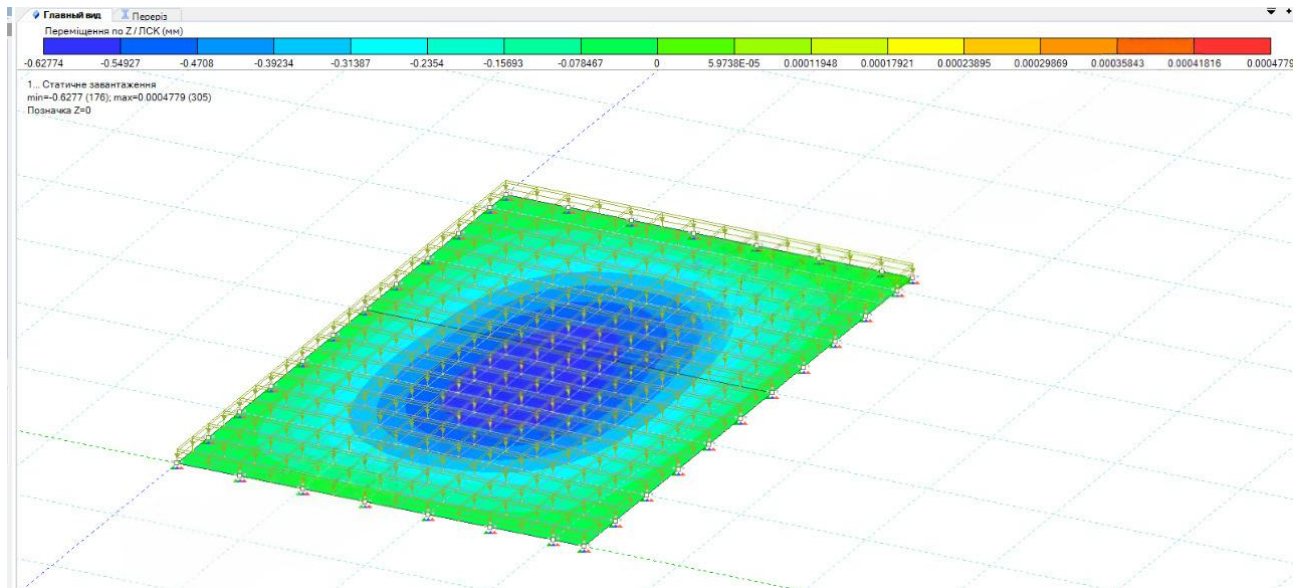


Рис. 6. Прогин запроєктованого перекриття

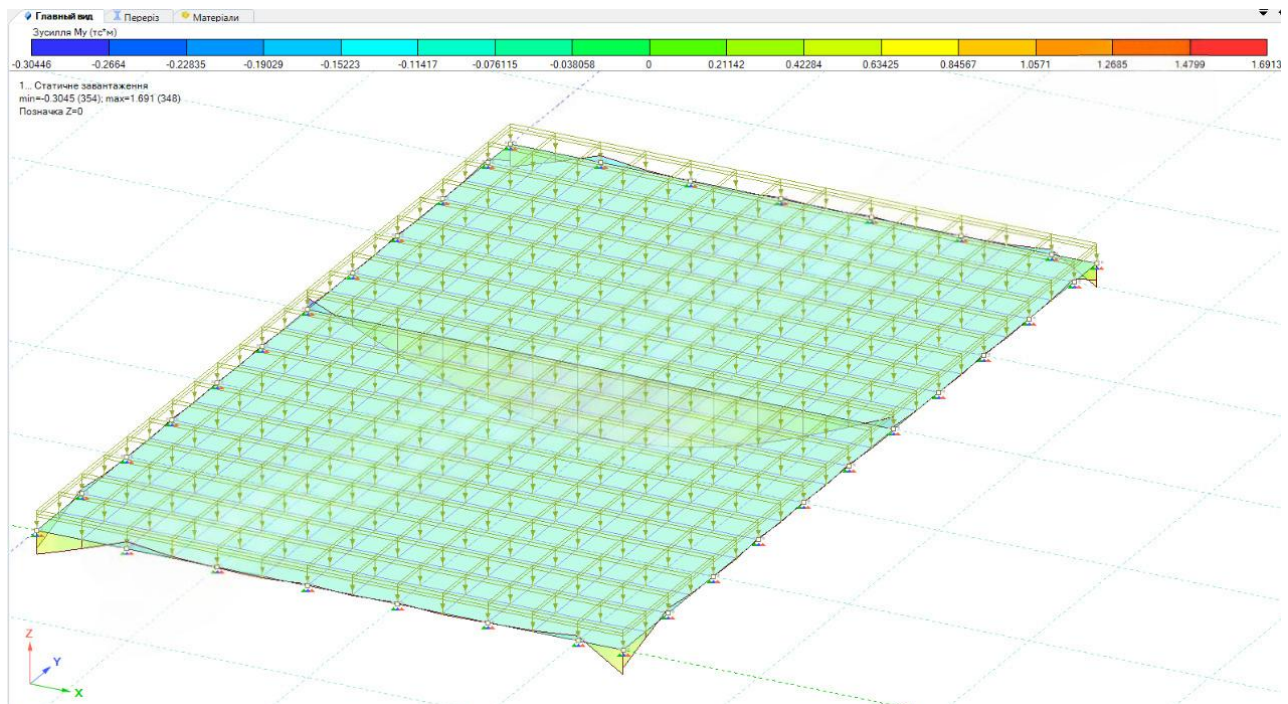


Рис. 7. Згинальний момент запроєктованого перекриття

Отримані результати свідчать про можливість використання такого рішення для відновлення перекриття, максимально допустимий прогин не перевищує допуски [14] $3250/200 = 16 \text{ мм} > 6 \text{ мм}$.

Також нами запропоновано варіант реалізації перекриття з використанням трубобетонної балки та залізобетонної плити перекриття (рис. 8). На схемі показані трубобетонні балки, на які врізана

залізобетонна плита перекриття, щоб знизити товщину загального перекриття. Для більшої жорсткості арматурні стрижні плити приварюють до трубобетонної балки. Такі варіанти схематичні, у них потрібно детальніше розібрати вузли, а також показники звукоізоляції таких перекриттів. Як пропозиція, низ такого перекриття можна закрити натяжною стелею.

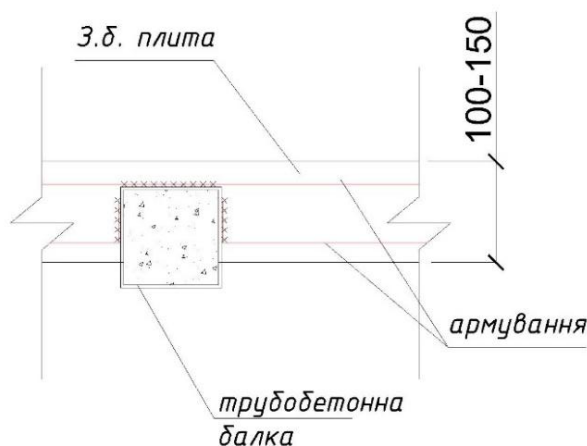


Рис. 8. Схема реалізації перекриття

Висновки. Отримання результатів показує перспективність використання трубобетонних конструкцій. Створений субкаркас має значну перспективу для реконструкції перекриттів, насамперед за рахунок більшої жорсткості за мінімального перерізу, що є особливо актуальним для ВПБ через особливості його конструкцій.

Отже, нами запропоновано економічний і досить ефективний метод відновлення експлуатаційних характеристик перекриття ВПБ. Його застосування дасть змогу у стислий термін відремонтувати пошкоджені житлові будинки, що сприятиме оперативному розв'язанню проблеми розселення людей у післявоєнний період.

Список використаних джерел

1. Chernii V. As a result of the shelling, about 600 residential buildings in Kharkiv were destroyed and cannot be rebuilt. 50 schools were bombed. Terekhov URL: <https://censor.net/ua/n3325026> (дата звернення: 24.05.2025).
2. Semko O., Hasenko A., Filonenko O., Mahas N. Civil building frame-struts steel carcass optimization by efforts regulation. *Academic Journal Industrial Machine Building Civil Engineering*. 2020. № 1(54). С. 47–54. DOI: 10.26906/znp.2020.54.2269.
3. Deng Z., Sun T., Li J. Flexural performance of ultra-high performance concrete-filled high-strength steel tube beams. *Journal of Tianjin University Science and Technology*. 2021. Vol. 54. P. 1111–1120. DOI: 10.1016/j.jcsr.2017.01.017.

4. Zhanbin. Flexural behavior of composite beams with concrete filled steel tube flanges and honeycombed steel webs. *Frontiers in Materials*. 2022. Vol. 9. DOI: 10.3389/fmats.2022.991584.
5. Popovych M. M., Kliuchnyk S. V. Features of the stressed-strain state of a steel-reinforced-concrete span structure with preliminary bending of a steel beam. *Science and Transport Progress*. 2022. № 1(97). P. 80–87. DOI: 10.15802/stp2022/265333.
6. Shaik H., Rizwan S., Dadapeer A.B.S. A detailed experimental study on the flexural behaviour of concrete filled steel tube beams. *International Journal of Scientific Research in Science and Technology*. 2018. P. 196–203. DOI: 10.1061/41142(396)19.
7. Farhan K. A., Shallal M. A. Experimental behaviour of concrete-filled steel tube composite beams. *Archives of Civil Engineering*. 2020. Vol. 66. P. 235–251. DOI: 10.24425/ace.2020.131807.
8. Zhao P., Liu X., Liang Z. Destruction feature extraction of prefabricated residential building components based on BIM. *Scientific Programming*. 2022. P. 1-12. DOI: 10.1155/2022/5798625.
9. Левченко Н. М., Бейнер П. С., Бейнер Н. В. Реконструкція будівель з використанням BIM технологій при відновленні міст в Україні. *Металознавство та термічна обробка металів*. 2022. № 4. С. 64–70. DOI: 10.30838/J.PMHTM.2413.271222.64.912.
10. Mahdi H., Shallal M. The effect of filling materials on the behaviour of filled steel tube composite beam. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. Vol. 1895. № 1. Article 012057. DOI: 10.1088/1742-6596/1895/1/012057.
11. Izbash M., Kazimagomedov F., Izbash Y. Improving strength and deformation characteristics of concrete-filled steel tubular elements in bending. *International Science Journal of Engineering & Agriculture*. 2022. Vol. 1(5). P. 57–64. DOI: 10.46299/j.isjea.20220105.07.
12. Казімагомедов Ф. І. Ефективні трубобетонні згинальні елементи: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.21.01. Харків: УкрДАЗТ, 2015. 20 с.
13. Ватуля Г. Л., Лобяк О. В., Черногіль В. Б. Моделювання роботи трубобетонних елементів при короткочасному та тривалому навантаженні. *Зб. наук. праць Укр. держ. ун-ту залізнич. трансп.* Харків: УкрДУЗТ, 2017. Вип. 170. С. 32–41. DOI:10.18664/1994-7852.170.2017.111273.
14. ДБН В.1.2-2:2006. Навантаження і впливи. Норми проектування. Чинний від 2020-06-01. Київ: Мін-во розвитку та тер. України, 2020. 70 с.

Казімагомедов Фіраз Ібрагімович, кандидат технічних наук, доцент кафедри міського будівництва, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова. ORCID iD: 0000-0003-4978-4654. Тел.: +38 (097) 030-96-54. E-mail: firaz1988@gmail.com.

Вяткін Костянтин Ігорович, кандидат технічних наук, доцент кафедри міського будівництва, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова. ORCID iD: 0000-0002-3002-5669. E-mail: vyatkin.k.i@gmail.com.

Мороз Наталія Валеріївна, старший викладач кафедри міського будівництва, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова. ORCID iD: 0000-0001-6093-9376. E-mail: moroz-nv@ukr.net.

Селезньов Михайло Михайлович, фахівець. ORCID iD: 0009-0003-6645-0565. E-mail: seleznyovmm@icloud.com.

Kazimagomedov Firaz, PhD (Tech.), Associate Professor, Associate Professor Department of Urban Construction, O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. ORCID iD: 0000-0003-4978-4654. Tel.: +38 (097) 030-96-54. E-mail: firaz1988@gmail.com.

Viatkin Kostiantyn, PhD (Tech.), Associate Professor, Associate Professor Department of Urban Construction, O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. ORCID iD: 0000-0002-3002-5669. E-mail: vyatkin.k.i@gmail.com.

Moroz Natalia, Senior Lecturer, Department of Urban Planning, O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. ORCID iD: 0000-0001-6093-9376. E-mail: moroz-nv@ukr.net.

Seleznov Mykhailo, Specialist. ORCID iD: 0009-0003-6645-0565. E-mail: seleznyovmm@icloud.com.

Статтю прийнято 18.09.2025 р.

УДК 625.143.036:620.19

**ПОРІВНЯЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПОТЕНЦІАЛІВ НА
КОРОЗИЙНІ ПРОЦЕСИ В ЗАЛІЗНИЧНИХ ШПАЛАХ ІЗ БЕТОНУ ЗІ СТАЛЕВОЮ
ТА КОМПОЗИТНОЮ АРМАТУРОЮ**

Д-р техн. наук А. А. Пługін, аспіранти М. А. Муригін, С. М. Мусієнко,
доктори техн. наук І. О. Редько, Е. С. Геворкян

**COMPARATIVE STUDIES OF THE INFLUENCE OF ELECTRIC POTENTIALS ON
CORROSION PROCESSES IN CONCRETE RAILWAY SLEEPERS WITH STEEL
AND COMPOSITE REINFORCEMENT**

Dr. Sc. (Tech.) A. A. Plugin, postgraduate students M. A. Murygin,
S. M. Musienko, Dr. Sc. (Tech.) I. O. Redko, Dr. Sc. (Tech.) E. S. Gevorkian

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.213.2025.341989>

***Анотація.** Для зниження електропровідності залізничних шпал із бетону, запобігання стіканню з рейок тягових струмів і їхнього електрокорозійного впливу на конструкції запропоновано замінити в шпалах сталеву арматуру композитною. Проаналізовано шляхи протікання електричних струмів через шпали, а також традиційні методи досліджень корозії під впливом струмів витоку. За результатами цього аналізу для порівняльних досліджень електрокорозійної поведінки шпал зі сталевую та композитною арматурою розроблено комплексну методіку досліджень процесів, які протікають у бетоні та арматурі в разі впливу електричних потенціалів. Методика полягає в накладанні електричних потенціалів – постійного або пульсуючого однонаправленого – на зразки-моделі шпал і дослідженні вилучених із моделей зразків комплексом методів включно з наноіндентуванням та електронною мікроскопією з елементним мікроаналізом. Наноіндентування дає змогу отримувати величини мікромеханічних властивостей цементного каменю – модуль пружності M і мікротвердість H , які залежать від ступеня її електроміграційного вилугування. Експериментально встановлено, що внаслідок електроміграційного вилугування M і H знижуються, починаючи з грані зразка, на яку під час експозиції накладали негативний потенціал. Усередині моделі зберігаються максимальні величини M і H , а їхні залежності від відстані від зазначеної грані добре апроксимовані ступеневими рівняннями та поліномами. Встановлено величини невилуженого і максимально вилуженого цементного каменю з характерним для бетону шпал B/C , а також залежність характеру цих залежностей та інтенсивності електрокорозійних процесів у бетоні від характеру накладеного електричного потенціалу (постійного або пульсуючого однонаправленого) і виду арматури (сталеві чи композитної).*

***Ключові слова:** залізобетонна шпала, композитна арматура, цементний камінь, постійний електричний потенціал, електрокорозія, наноідентація.*

***Abstract:** To reduce the electrical conductivity of concrete railway sleepers, minimize the leakage of traction currents from the rails, and mitigate their electrocorrosive impact on structural elements, the replacement of conventional steel reinforcement with composite reinforcement has been proposed. An analysis of current flow paths through the sleepers and a review of conventional methods for investigating corrosion caused by stray currents were performed. Based on this analysis, a comprehensive experimental methodology was developed to comparatively evaluate the*

electrocorrosion behavior of concrete sleepers and other reinforced elements with steel and composite reinforcement. The methodology focuses on processes occurring in concrete and reinforcement under the influence of externally applied electrical potentials. The experimental program involves applying either direct electrical potential or pulsating unidirectional electrical potential to specimens – sleeper models and subsequently examining extracted specimens using a combination of techniques, including nanoindentation and scanning electron microscopy with energy-dispersive X-ray spectroscopy (SEM-EDS). Nanoindentation was employed to determine micromechanical properties of the cement paste, namely the elastic modulus (M) and microhardness (H), which are sensitive to the degree of electromigration-induced leaching. Experimental results showed that M and H decrease progressively from the surface exposed to the negative potential during the test. The highest values were retained in the core of the specimen, and their dependence on the distance from the negatively polarized surface was well approximated by power-law and polynomial functions. Baseline and maximum leaching values of M and H were established for cement paste with a water-to-cement ratio of 0.35, which is typical for sleeper concrete. It was further observed that the shape of the M and H profiles, and therefore the intensity of electrocorrosion processes in concrete, depends on both the type of applied electrical potential (constant or pulsating unidirectional) and the type of reinforcement (steel or composite).

Keywords: reinforced concrete sleeper, composite reinforcement, cement paste, direct electrical potential, electrocorrosion, nanoindentation.

Актуальність теми дослідження. На залізницях світу основними типами підрейкових основ є залізобетонні та дерев'яні шпали. Залізобетонні шпали порівняно з дерев'яними не зазнають біопшкоджень і менше зношуються в підрейковому майданчику, отже мають більший ресурс (довговічність). Залізобетонні шпали більш надійно забезпечують стабільність колії через більшу масу та міцність утримання деталей рейкових скріплень, тому саме вони переважні для ділянок із більшою вантажонапруженістю і швидкістю руху, а також безстикової колії. Але в залізобетонних шпал є й низка недоліків. Через їхню більшу масу потрібні більш потужні засоби механізації та енергоресурсовитрати на укладання і утримання колії. Шпали електропровідні, що у вологу погоду, особливо в разі зносу деталей ізоляції та наявності мікротріщин у бетоні, призводить до збільшення втрат тягового струму на ділянках, електрифікованих як перемінним, так і постійним струмом. Впливає на шляхи протікання струмів і наявність випусків арматури на торцях шпал, обумовлених

технологією їх виготовлення. Постійні струми витоку обумовлюють електрокорозійні процеси в металевих деталях, арматурі та навіть бетоні шпал і розташованих на шляху струмів витоку металевих і залізобетонних конструкціях.

Раніше авторами запропоновано на ділянках залізниць, електрифікованих постійним струмом, укласти шпали з композитною арматурою, яку виготовляють із базальтових або скляних волокон, склеєних епоксидною смолою. Припущено і теоретично обґрунтовано, що заміна в бетонних шпалах сталевих арматур композитною підвищить їхній електричний опір; знизить струми витоку (зокрема втрати тягового струму); усуне корозійні процеси, пов'язані з протіканням електричного струму і впливом агресивних середовищ; дасть змогу пом'якшити вимоги щодо тріщиностійкості шпал і знизити зусилля попереднього напруження арматури. Проте фактична поведінка шпал із композитною арматурою в разі електричних впливів залишалася майже недослідженою експериментально. Тому порівняльні дослідження таких впливів на шпали зі сталевих та композитною арматурою є актуальними.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Відомо, що з впливом постійних струмів, зокрема струмів витоку з електрифікованих рейкових колій залізниць, металеві конструкції та арматура залізобетонних конструкцій [1, 2], зазнають електрокорозії [3, 4]. Електрокорозійні пошкодження спостерігають також у сталевібробетоні [5].

У роботі [1] та інших роботах автори доводять, що з впливом постійного або однопольового пульсуючого електричного

потенціалу утворюються струми витоку (рис. 1, а) і відбуваються процеси електрокорозії бетону, які полягають у багатократній інтенсифікації відомих видів корозії, залежних від процесів перенесення іонів – вилугування (рис. 1, б), внутрішньої корозії від лужно-кремнеземистої реакції (рис. 1, в) тощо. У роботі [6] доведено, що електричні потенціали прискорюють вилугування за рахунок перенесення іонів і призводять до утворення градієнтів властивостей бетону в конструкціях.

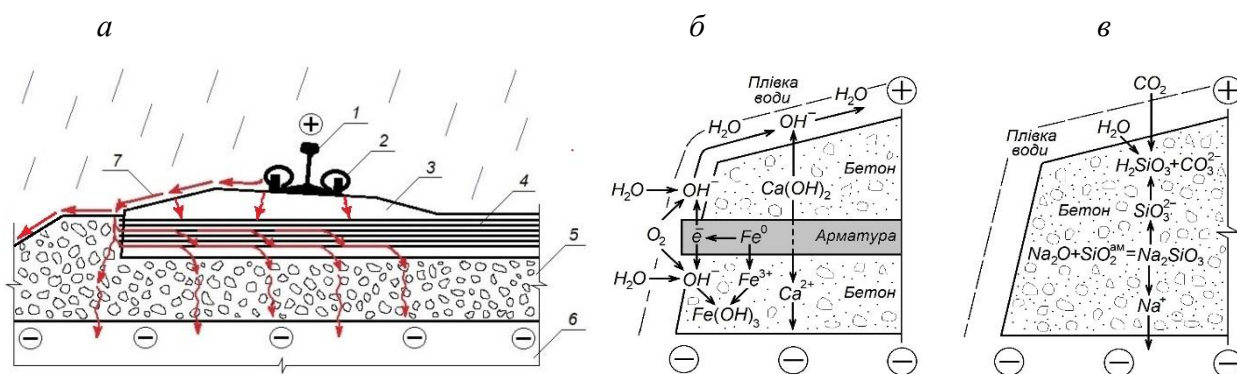


Рис. 1. Схема протікання струму витоку у вологу погоду [1]:

1 – через шпалу та баласт; б – через бетон і сталеву арматуру шпали; в – через бетон шпали з інтенсифікацією його корозії від ASR; 1 – рейка; 2 – рейкове скріплення; 3 – бетон шпали; 4 – арматурний дріт; 5 – баласт; 6 – земляне полотно; 7 – струм витоку

Для досліджень електрокорозійних процесів використовують різні теоретичні та експериментальні методи аж до методу скінченних елементів [7, 8]. Але за цими методами вивчають переважно електрокорозію арматури. У роботі [1] та інших роботах автори корозійний вплив електричного струму на бетон досліджували за допомогою визначення зміни щільності та міцності бетону, електричних вимірювань, рН-метрії, оптичної та електронної мікроскопії, рентгенофазового аналізу, інфрачервоної спектроскопії. Ці методи не завжди точні, але є незалежними і доповнюють один одного.

У роботі [9] встановлено кореляцію між відношенням Ca/Si і мікромеханічними

властивостями цементного каменю та запропоновано використовувати цю кореляцію для вивчення наслідків вилугування, для визначення мікромеханічних властивостей використано метод наноіндентування. У роботі [10] обґрунтовано застосування цього методу для дослідження наслідків електричних впливів на бетон. Вважаємо, що цей метод як незалежний добре доповнює відомі методи дослідження електрокорозійних процесів у бетоні та дає змогу підвищити достовірність результатів досліджень.

Мета роботи – встановлення і порівняння наслідків електричних впливів від струмів витоку та інших агресивних впливів на бетонні шпали зі сталевую

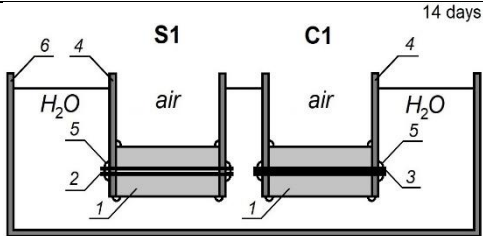
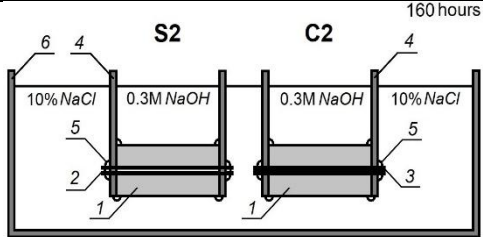
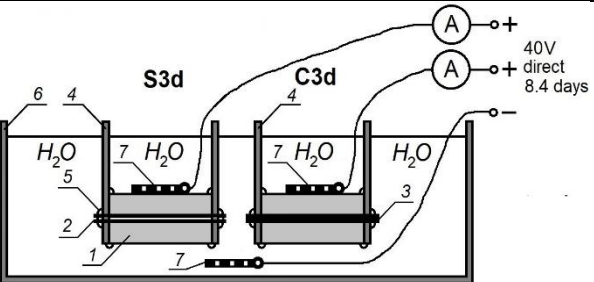
дротяною та композитною арматурою із застосуванням комплексу методів досліджень включно з наноіндентуванням.

Завдання досліджень: розробити методику порівняльного дослідження впливу постійного та пульсуючого однонаправленого електричних потенціалів на шпали з бетону зі сталевую та композитною арматурою на моделях; дослідити нейтралізацію цементного каменю, визначити глибину проникнення хлоридів, дослідити корозію арматури, визначити зміну мікромеханічних властивостей цементного каменю в разі впливу електричних потенціалів у моделях; виконати електронно-мікроскопічні дослідження моделей.

Основна частина дослідження
Методи досліджень впливу електричних потенціалів на корозійні процеси. Порівняльні дослідження електричних впливів від електричних потенціалів (струмів витoku) та інших агресивних впливів на бетонні шпали зі сталевую дротяною та композитною арматурою виконували комплексним дослідженням наслідків цих впливів на зразки, що моделювали такі шпали в умовах експлуатації (табл. 1). Електричні та інші агресивні впливи створювали за допомогою експериментальних установок, наведених у табл. 1.

Таблиця 1

Агресивні впливи на шпали з бетону в електрифікованій колії, позначення та схеми експериментальних установок і зразків, що їх моделюють

Номер впливу	Опис агресивного впливу	Позначення установки та зразка з арматурою	
		сталевую дротяною S	композитною C
1	2	3	
1	Капілярне підняття води з обводненого баласту від підшви до верху шпали		
2	Дифузія хлорид-іонів (розчину солі, добрив, що просипаються на колію) у вологу погоду від підшви до верху шпали		
3d	Струм витoku від постійного електричного потенціалу на рейці +40 В у вологу погоду (рис. 1, а) протягом 8,4 доби		

Продовження табл. 1

1	2	3
4d	Електроміграційне перенесення хлорид-іонів за дії постійного електричного потенціалу на рейці +40 В (рис. 1, а) протягом 94 год	
3р	Струм витоку від ПОЕП +40 В у вологу погоду (рис. 1, а) протягом 14 діб	
4р	Електроміграційне перенесення хлорид-іонів від ПОЕП +40 В (рис. 1, а) протягом 160 год	

Примітки: ПОЕП – постійний однонаправлений електричний потенціал (15 хв увімкнено, 10 хв вимкнено), що відповідає проходженню електрорухомого складу секцією електрифікованої колії; 160 год впливу ПОЕП за кількістю електрики відповідає 96 год безпосереднього електричного впливу; 1 – цементний камінь або розчин зразка; 2 – сталева дротяна арматура; 3 – композитна арматура; 4 – полівінілхлоридна труба; 5 – силіконовий герметик; 6 – поліетиленовий контейнер; 7 – сталевий накладний електрод.

Зразки виготовляли із цементного каменю з В/Ц = 0,35 (зразки S1, C1, S3, C3) і цементно-піщаного розчину 1:1, В/Ц = 0,35 (S2, C2, S4, C4) у вигляді циліндрів діаметром 100 мм і висотою 40 мм, поміщених у полівінілхлоридні труби внутрішнім діаметром і висотою 100 мм. У труби через просвердлені у стінках на висоті 20 мм отвори встановлювали сталеву дротяну арматуру 4Ø3 мм (S1, S2, S3) або композитну базальтово-епоксидну арматуру

Ø8 мм (C1, C2, C3) довжиною 130 мм (рис. 2, а) і заповнювали їх на висоту 40 мм цементним тістом/розчином з ущільненням на стандартному лабораторному вібротрамблері (рис. 2, б). Зразки піддавали тепловологісній обробці в лабораторній пропарювальній камері. Після твердіння контакти розчину і арматури з трубою герметизували силіконовим герметиком.

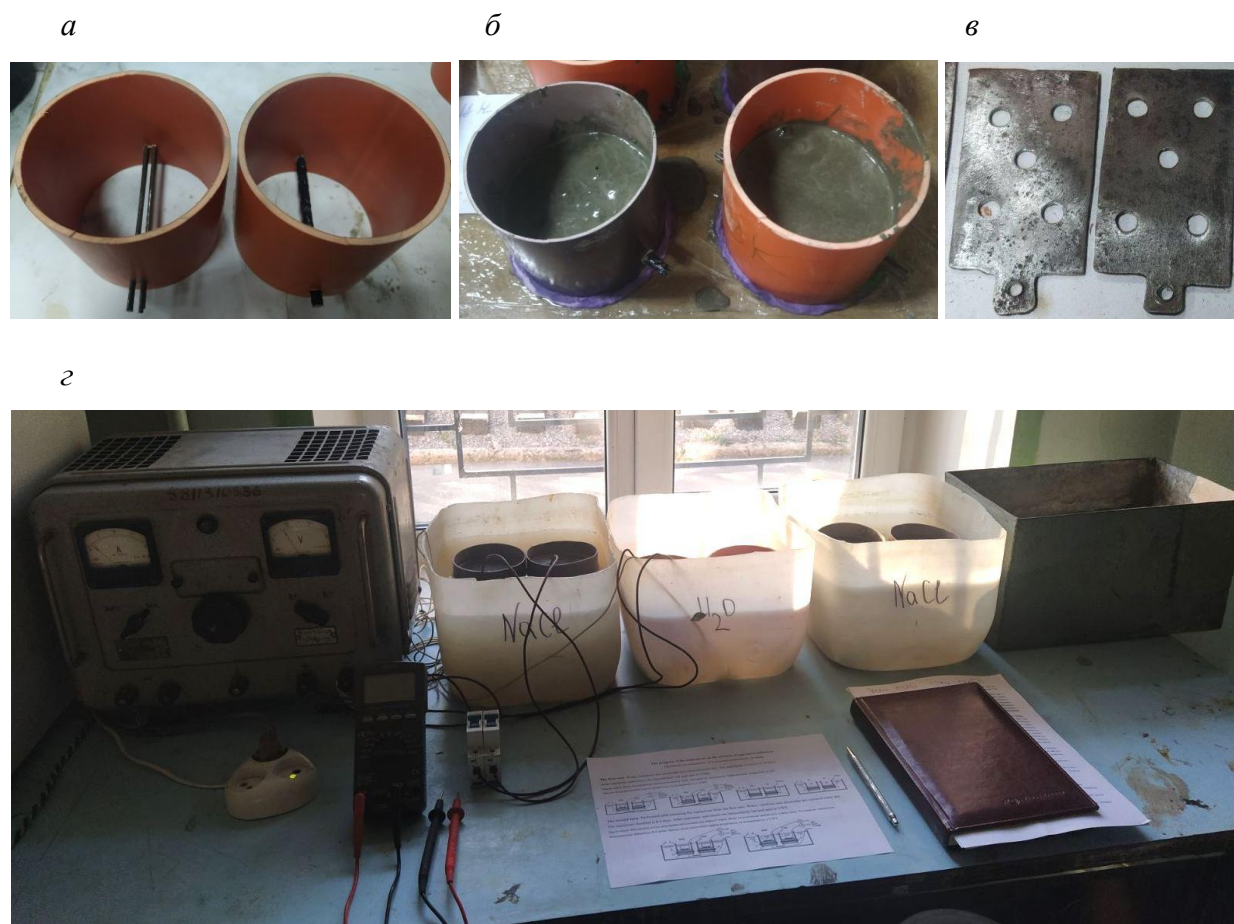


Рис. 2. Підготовка зразків і експериментальних установок зі створення електричних і корозійних впливів:

а – установлення арматури у форми; *б* – заповнення форм цементним тістом/розчином; *в* – сталеві накладні електроди; *г* – загальний вигляд установок

Вплив електричних потенціалів створювали за допомогою сталевих накладних електродів (рис. 2, *в*) і блока живлення постійного струму з програмованим вимикачем (рис. 2, *г*). Протягом електричного впливу вимірювали силу струму через зразки та електричний опір зразків за схемами, наведеними в табл. 1, за допомогою цифрового мультиметра Sanwa 1000 (рис. 2, *г*).

Для досліджень моделей після агресивних впливів їх розрізали на зразки-призми розміром $40 \times 40 \times 20$ мм та інші за схемою, наведеною на рис. 3, *а*. Зразки,

експозиція яких відбувалася у воді – С1, S1, С3d, S3d, СЗр, SЗр, розрізали з водяним охолодженням. Зразки, експозиція яких відбувалась у розчинах NaCl і NaOH – С2, S2, С4d, S4d, С4р, S4р, для запобігання вимивання хлоридів розрізали насухо.

Як передбачувані наслідки цих впливів, визначали нейтралізацію цементного каменю та цементно-піщаного розчину, проникнення хлоридів, корозію арматури, зміну мікромеханічних властивостей і структури цементного каменю.

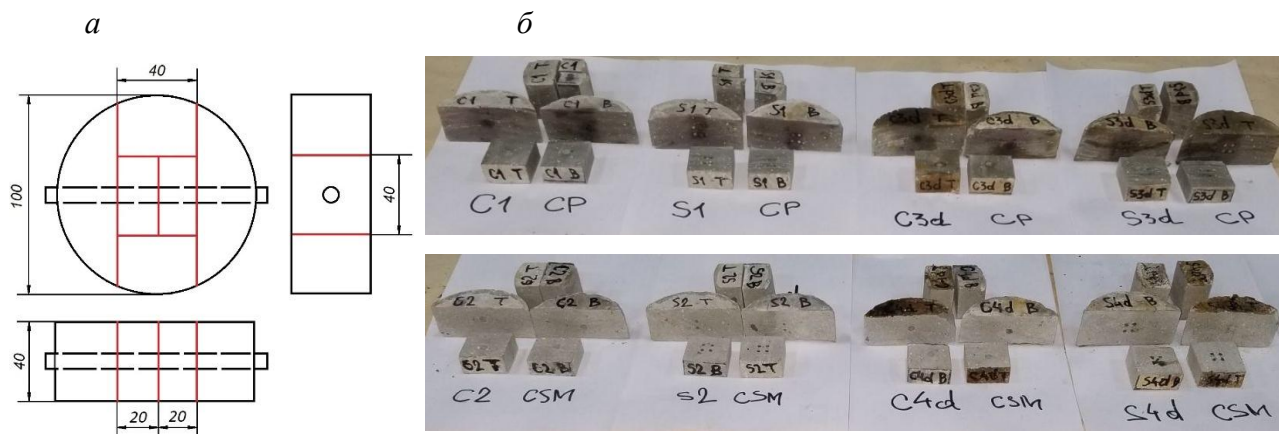
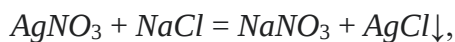


Рис. 3. Зразки для дослідження наслідків агресивних впливів:
а – схема розрізання моделі на зразки; б – зовнішній вигляд зразків

Нейтралізацію цементного каменю та цементно-піщаного розчину визначали нанесенням на зрізи всіх моделей 1 % розчину фенолфталеїну в етанолі. Забарвлення поверхні зрізу в малиновий колір характеризувало збереження лужного середовища, незабарвлення – нейтралізацію цементного каменю внаслідок вилугування CaOH_2 .

Глибину проникнення хлоридів визначали за допомогою розчину нітрату срібла. Хлориди, зокрема хлор-іони Cl^- , проникають у бетон (розчин) шляхом дифузії, а за наявності електричного потенціалу – електроміграційним шляхом. Для якісного визначення хлор-іонів застосовували нітрат срібла (азотнокисле срібло) AgNO_3 , зокрема реакцію його взаємодії з хлоридами:



де AgCl – білий сироподібний осад.

Для визначення глибини проникнення хлоридів у цементний камінь або цементно-піщаний розчин на зріз наносили 1 % водний розчин нітрату срібла, вимірювали глибину проникнення хлоридів як товщину шару, на якому утворився світлий наліт, за

результатами декількох вимірювань розраховували середнє значення x_x . 1 % водний розчин AgNO_3 : вода дистильована – 100 г (мл); нітрат срібла – 1 г.

Корозію арматури оцінювали оглядом випусків арматури та оптичною мікроскопією на відбиття контакту арматури з цементним каменем і розчином на зрізах зразків за допомогою світлового мікроскопа МБС-2 зі збільшенням 7,5–82,5.

Зміну мікромеханічних властивостей цементного каменю по висоті моделей, а також відміни міжфазної перехідної зони МПЗ між цементним каменем і арматурою в різних зразках визначали методом наноіндентування. Для цього з різних зон зразків алмазним диском вирізали фрагменти розміром $20 \times 20 \times (10-20)$ мм, поміщували їх із вакуумним просочуванням у циліндр із епоксидної смоли з модулем пружності 3–4 ГПа. Після твердіння епоксидної смоли верхню грань зразків зрівнювали алмазним диском і полірували за допомогою алмазних абразивних складів на масляній і спиртовій основі для запобігання подальшій гідратації цементу та вимиванню гідратних фаз до розміру нерівностей 0,25 мкм. Готові зразки наведені на рис. 4.

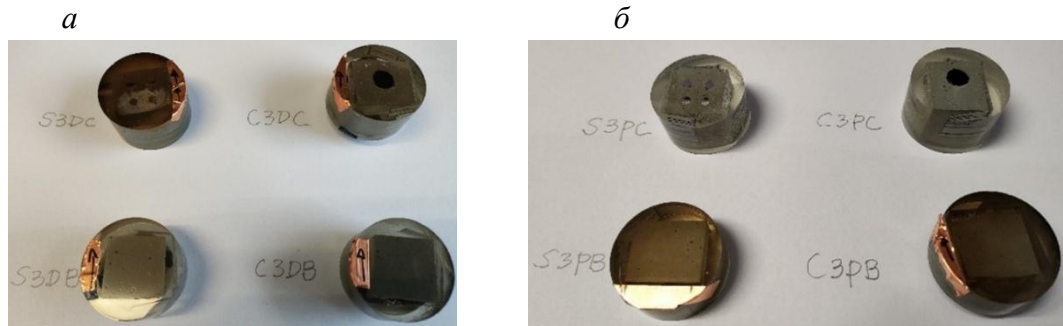


Рис. 4. Підготовлені для наноіндентування зразки зі сталевую та композитною арматурою після впливу у водному середовищі: *а* – постійного потенціалу; *б* – ПОЕП

Методом наноіндентування досліджено впливи, створені за схемами, і на зразки S3d, C3d, S3p, C3p. Наноіндентування здійснювали за допомогою приладу Agilent G200 Nano Indenter®, оснащеного алмазним наконечником індентора Berkovich. Прилад вдавлює індентор у поверхню досліджуваного матеріалу з безперервною реєстрацією сили і глибини вдавлювання. Після контакту індентора з поверхнею до нього прикладають зростаюче навантаження, що спричиняє проникнення його вістря в матеріал. Після досягнення попередньо визначеної величини максимального навантаження та короткого періоду його утримання навантаження знімають, а глибину проникнення зменшують завдяки пружному відновленню деформованого матеріалу. За величинами сили і глибини програмне забезпечення приладу визначає мікроемеханічні властивості – модуль пружності M , ГПа, і мікротвердість H , МПа.

Вимірювали в зонах, розташованих на різних відстанях h від його нижньої під час експозиції грані (табл. 1), а також у МПЗ. По висоті зразка досліджували тестові смужки шириною до 1000 мкм, висотою 30 мкм. У МПЗ досліджували області за сіткою з кроком близько 30 мкм за 30–40 вимірюваннями. Індентор занурювали на глибину до 2 мкм. Для кожної точки визначали середнє значення M і H в інтервалі глибини вдавлювання 0,3–1 мкм. Для тестових смужок поверхні цементного каменю розраховували середнє значення, середньоквадратичне

відхилення, коефіцієнт варіації. За результатами вимірювань будували графіки залежності M і H від відстані h . За характером цих графіків робили висновки про градієнти мікроемеханічних властивостей цементного каменю по висоті зразка, а отже, вплив електричного потенціалу на електрокорозійні процеси.

Електронно-мікроскопічні дослідження виконували тих самих зразків, які розрізали алмазним диском на менші об'ємом 1–2 см³ так, щоб відкрити поперечні перерізи по вертикалі відносно орієнтації зразків в умовах електричного впливу, полірували алмазною суспензією різного розміру, що зменшувався до розміру 1 мкм, і покривали вуглецем. Дослідження проводили за допомогою сканувального електронного мікроскопа Hitachi Regulus 8230 у режимах візуалізації вторинних електронів і зворотного розсіювання електронів (SE і BSE). Елементний мікроаналіз проводили за допомогою системи Oxford Instruments Aztec EDS. Режим зйомки: прискорювальна напруга – 20 кВ, робоча відстань – 15 мм, отримання карти протягом 5–15 повторюваних кадрів і 600 с для лінійного сканування. Дані лінійного сканування були експортовані у формат CSV, що містить відстань і загальну кількість елементів Si та Ca. Відношення Ca/Si було розраховано як просте арифметичне співвідношення кількості детекторів і нанесено на графік залежності від відстані починаючи з низу зразка.

Результати досліджень впливу електричних потенціалів на корозійні процеси. Результати вимірювань сили

струму через зразки та електричного опору зразків впродовж експозиції наведено на рис. 5 і узагальнено в табл. 2.



Рис. 5. Зміна в часі впродовж впливу постійного та пульсуючого (у перерахунку на тривалість безпосереднього електричного впливу) електричного потенціалу: *а* – сили струму у зразках S3d, C3d, S4d, C4d; *б* – те саме у зразках S3p, C3p, S4p, C4p; *в* – електричного опору зразків S3d, C3d, S4d, C4d; *з* – те саме зразків S3p, C3p, S4p, C4p

Таблиця 2

Показники корозійного ураження зразків після експозиції

Середовище	Показник	Показник корозійного ураження зразків з арматурою					
		сталевую дрітвяною			композитною		
		після експозиції зі впливом					
		тільки середовища (без електричного)	постійного потенціалу	ПОЕП	тільки середовища (без електричного)	постійного потенціалу	ПОЕП
у воді	Зразок	S1	S3d	S3p	C1	C3d	C3p
	Сила струму під час експозиції						
	- на початку I_0 , А		0,090	0,057		0,101	0,072
	- наприкінці I_i , А		0,042	0,008		0,031	0,011
	$(I_0-I_i)/I_0$, %		58,3	86,0		69,3	84,7
	Вилуговування (нейтралізація)	немає	немає	немає	немає	немає	немає
	Корозія арматури:						
	- кінців	немає	значне руйнування	немає	немає	немає	немає
	- посередині	немає	немає	немає	немає	немає	немає
у розчині NaCl	Зразок	S2	S4d	S4p	C2	C4d	C4p
	Сила струму під час експозиції						
	- на початку I_0 , А		0,350	0,126		0,481	0,333
	- наприкінці I_i , А		0,035	0,074		0,145	0,216
	$(I_0-I_i)/I_0$, %		90,0	41,3		69,9	35,1
	Вилуговування (нейтралізація)	немає	немає	немає	немає	немає	немає
	Глибина проникнення хлоридів						
	- мм	21,6	40	40	16,2	40	40
	- %	54,1	100	100	40,4	100	100
	Корозія арматури:						
	- кінців	слабка поверх.	повне розчин.	повне розчин.	немає	немає	немає
	- посередині	немає	так	так	немає	немає	немає

Під час експозиції розчин NaOH зверху зразків S4d, C4d, S4p, C4p інтенсивно забарвлювався продуктами корозії електродів у непрозорий коричневий колір (рис. 6). Електроди впродовж експозиції розчинялись і один раз були замінені. Вода зверху зразків S3d, C3d, S3p, C3p також забарвлювалася, але набагато менш інтенсивно, електроди розчинялися, але також менш інтенсивно, і не були замінені.

Після експозиції зрізи всіх зразків забарвлювали розчином фенолфталеїну в малиновий колір (рис. 7), отже нейтралізації цементного каменю і цементно-піщаного розчину від будь-якого електричного впливу встановленої для дослідження тривалості на помітну глибину від поверхні не спостерігали.

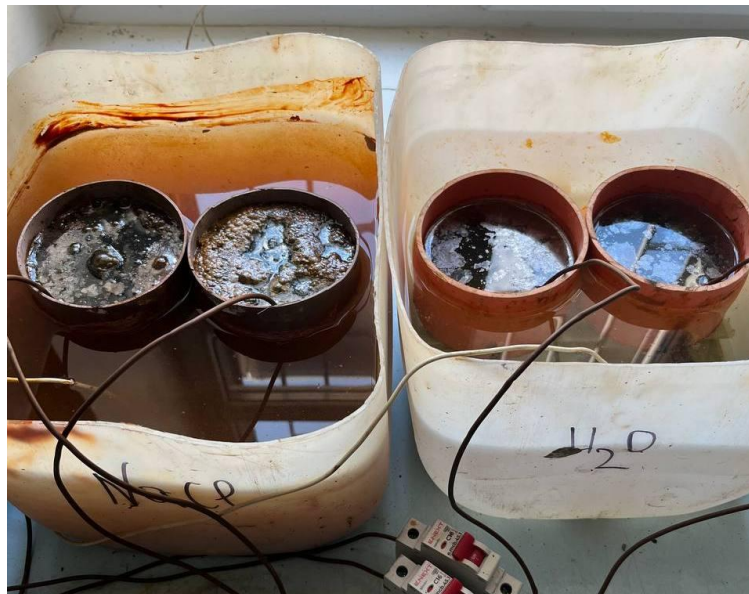


Рис. 6. Зразки C4p, S4p та C3p, S4p (зліва – направо) після восьми діб експозиції під впливом ПОЕП



Рис. 7. Поверхня зрізів зразків C3p після експозиції за агресивних і електричних впливів, оброблена розчином фенолфталеїну (таке саме забарвлення на всю товщину спостерігали на зрізах усіх зразків)

Результати визначення глибини проникнення хлоридів вибірково наведено на рис. 8 та узагальнено в табл. 2. Із рис. 8, а видно, що за рахунок тільки дифузії без електричного впливу у зразках S2 глибина проникнення хлоридів складає 14,8–27,7 мм (рис. 8, а), у середньому 21,6 мм, у зразках C2 – 13,1–19,5 мм (рис. 8, б), у середньому 16,2 мм. У зразках S4d, C4d, S4p, C4p за рахунок електроміграційного перенесення глибина проникнення хлоридів сягнула

40 мм, отже на всю товщину зразка (рис. 8, в).

Зовнішній вигляд розрізаних після експозиції зразків наведено на рис. 3, б і 9. Випуски сталевий дріт арматури зразка S1 слідів корозії майже не мали (рис. 9, а), зразка S2 – зазнали незначної поверхневої корозії (рис. 9, в), зразка S3d – зазнали суттєвого корозійного руйнування (рис. 9, б), зразка S4d – зазнали повного корозійного розчинення (рис. 9, з).

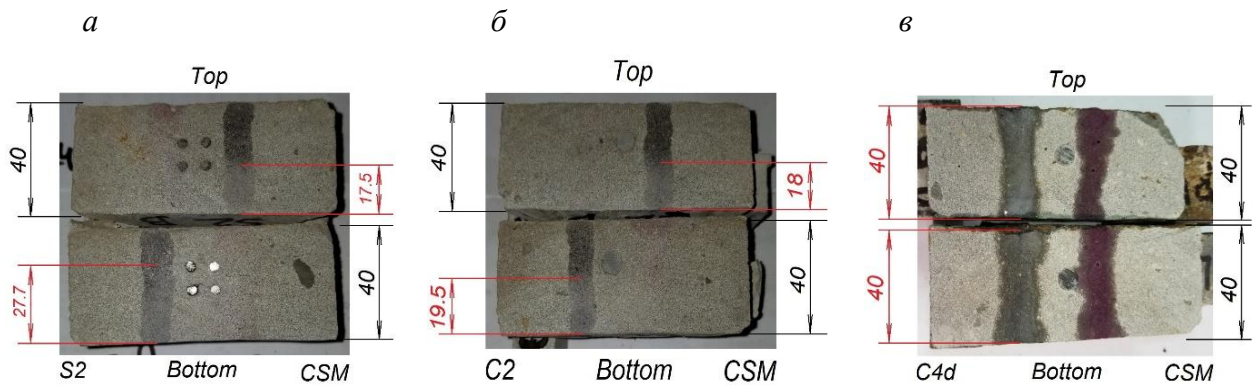


Рис. 8. Визначення за допомогою розчину нітрату срібла глибини проникнення хлоридів внаслідок експозиції в розчині $NaCl$: *а* – без електричного впливу у зразку S2 зі сталевую дрітвяною арматурою; *б* – те саме C2 із композитною арматурою (*б*); *в* – із впливом постійного електричного потенціалу у зразку C4d із композитною арматурою (у зразку S4d зі сталевую дрітвяною арматурою також спостерігали проникнення на всю товщину зразка)

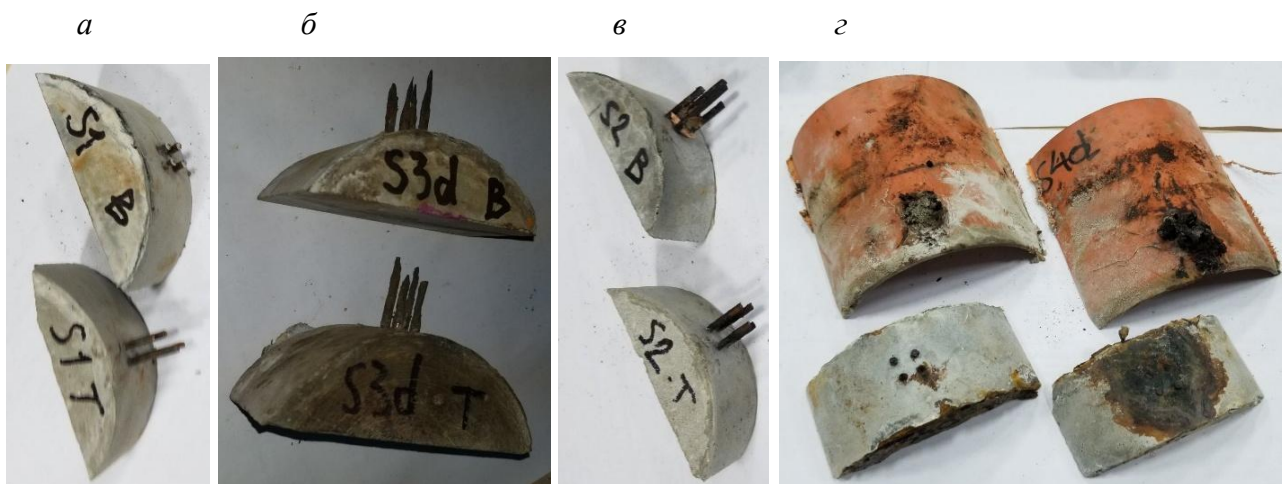


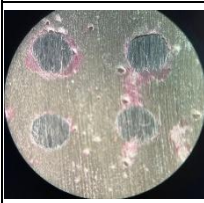
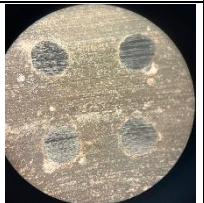
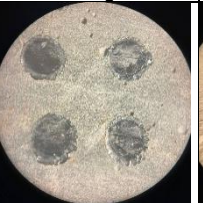
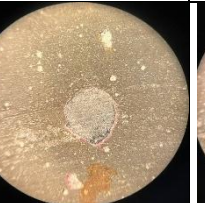
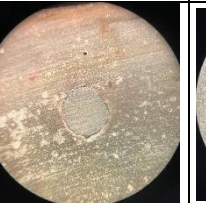
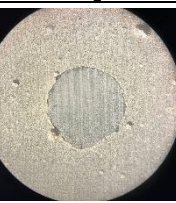
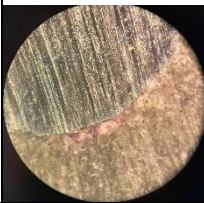
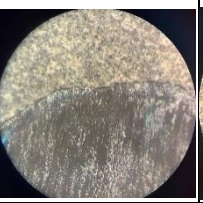
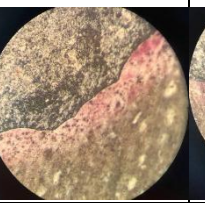
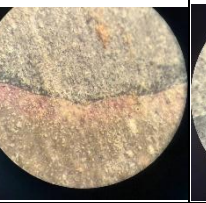
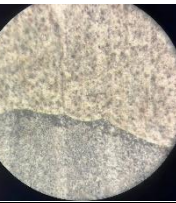
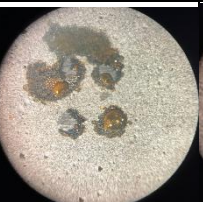
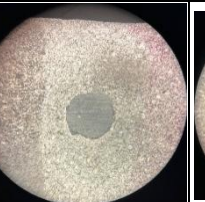
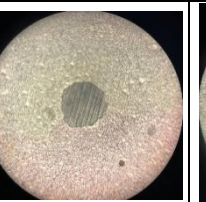
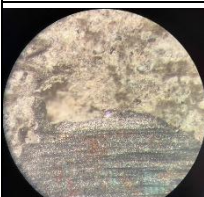
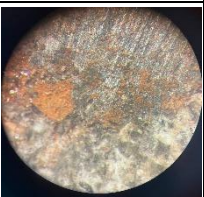
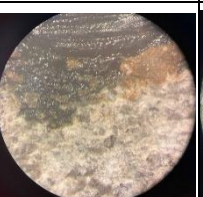
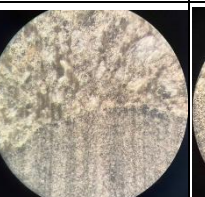
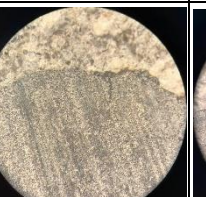
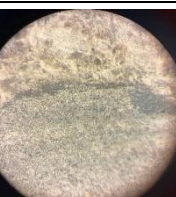
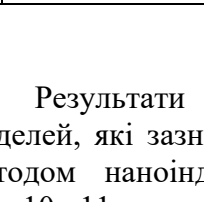
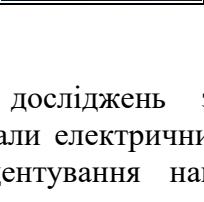
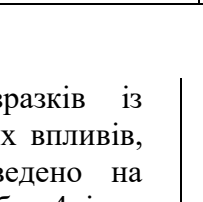
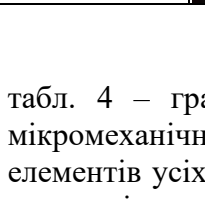
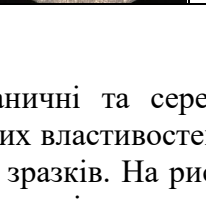
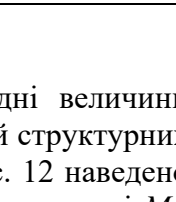
Рис. 9. Стан випусків сталеві дрітвяної арматури зі зразків після експозиції: *а* – у воді без електричного впливу S1 без слідів корозії; *б* – те саме з впливом постійного потенціалу S3d із суттєвим корозійним руйнуванням; *в* – у розчині $NaCl$ без електричного впливу S2 із незначною поверхневою корозією; *г* – те саме з впливом постійного потенціалу з повним корозійним розчиненням

Мікроснімки зрізів зі збільшенням 7,5 і 82,5 наведені на рисунках у табл. 3. Корозії сталеві дрітвяної арматури всередині зразків S1, S2, S3d не спостерігали, у зрізах зразків S4d, S4p неозброєним оком

спостерігали ознаки корозії – винесені продукти корозії у вигляді коричневого ареолу, а у зразка S4d – ще й радіальні мікротріщини.

Таблиця 3

Мікроснімки зрізів зразків зі сталеву дрютяною та композитною арматурою
після експозиції

Середовище	Мікроснімки зрізів зразків з арматурою					
	сталеву дротяною			КОМПОЗИТНОЮ		
	після експозиції зі впливом					
	тільки середовища (без електричного впливу)	постійного потенціалу	ПОЕП	тільки середовища (без електричного впливу)	постійного потенціалу	ПОЕП
Вода – вода	S1	S3d	S3p	C1	C3d	C3p
						
						
Розчин NaOH – розчин NaOH	S2	S4d	S4p	C2	C4d	C4p
						
						
Розчин NaCl – розчин NaCl	S5	S6d	S6p	C3	C5d	C5p
						

Результати досліджень зразків із моделей, які зазнали електричних впливів, методом наноіндентування наведено на рис. 10, 11 та узагальнено в табл. 4 і на рис. 12. Зокрема, на рис. 10, 11 подано зображення оптичної мікроскопії деяких досліджених зон разом із відповідними їм картами мікроемеханічних властивостей – модуля пружності M і мікротвердості H , у

табл. 4 – граничні та середні величини мікроемеханічних властивостей структурних елементів усіх зразків. На рис. 12 наведено отримані залежності модуля пружності M і мікротвердості H цементного каменю від відстані h від нижньої грані зразка, до якої прикладали негативний полюс постійного потенціалу та ПОЕП.

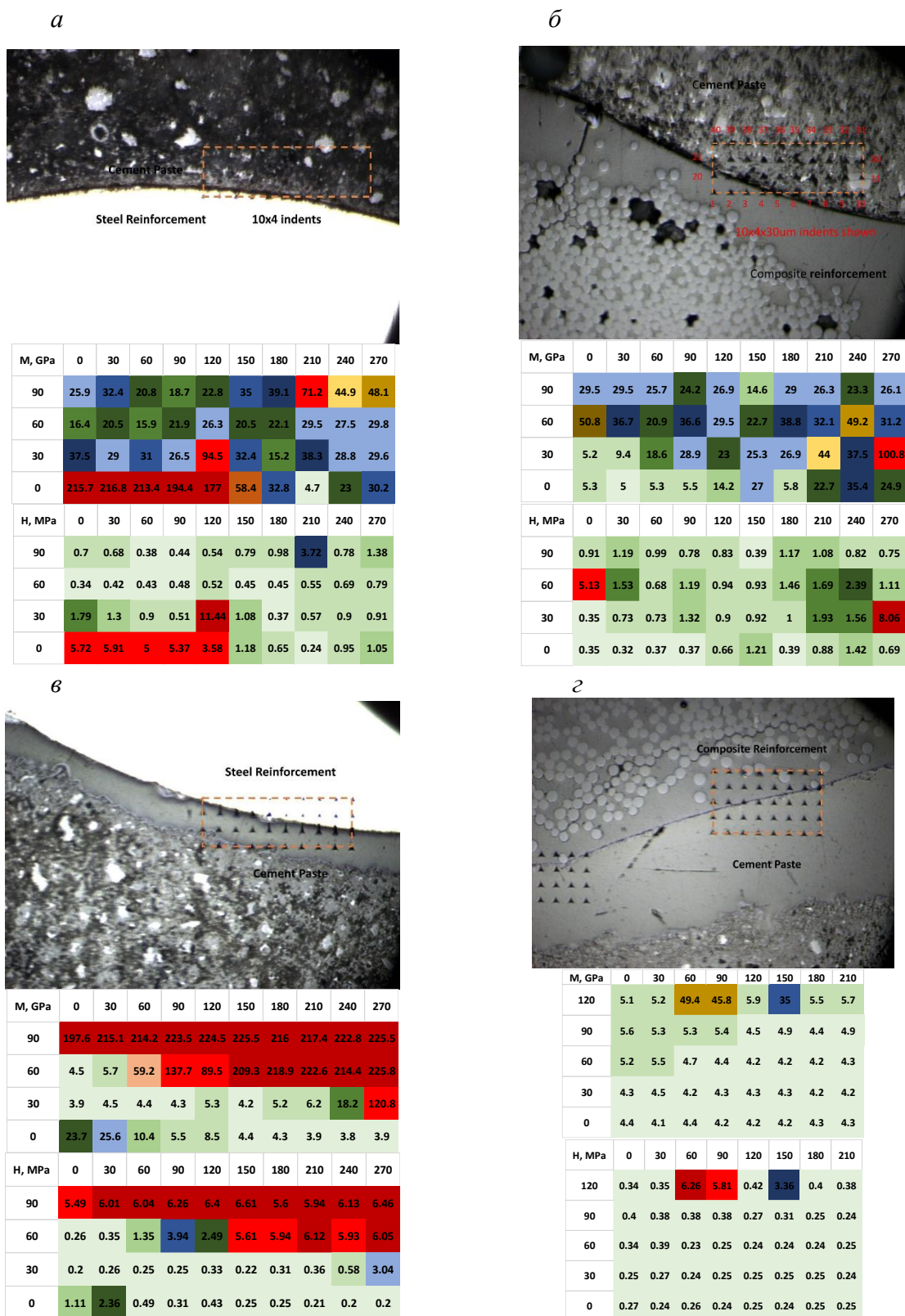


Рис. 10. Поверхні зрізів зразків і карти механічних властивостей після впливу постійного потенціалу у водному середовищі: *a* – МПЗ над сталеву дрютяною арматурою; *б* – те саме композитною арматурою; *в* – МПЗ під сталеву дрютяною арматурою; *г* – те саме композитною арматурою

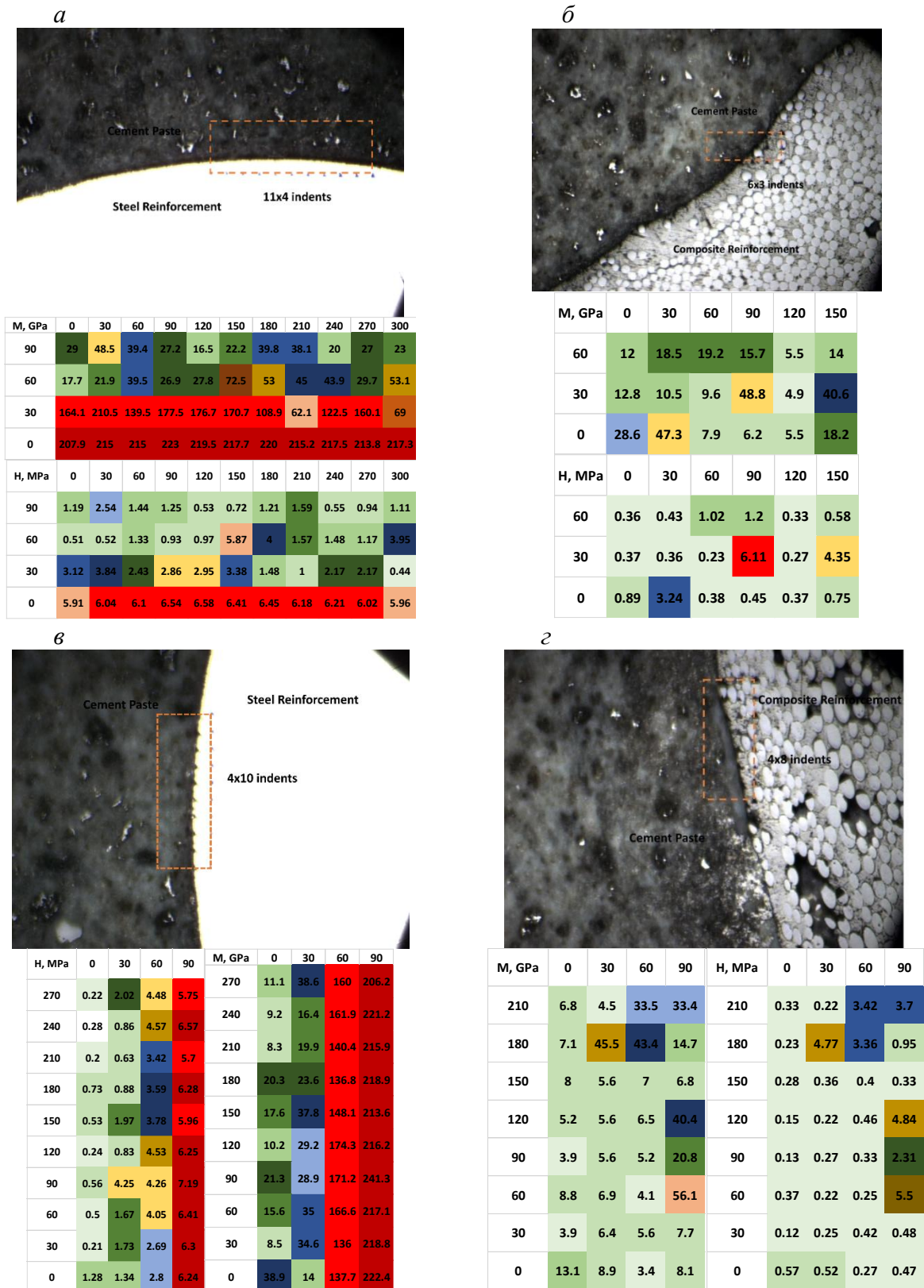


Рис. 11. Поверхні зрізів зразків і карти механічних властивостей після впливу ПОЕП у водному середовищі: *а* – МПЗ над сталеву дрітвяною арматурою; *б* – те саме композитною арматурою; *в* – МПЗ ліворуч від сталеву дрітвяною арматури; *г* – те саме композитної арматури

Таблиця 4

Мікромеханічні властивості структурних елементів зразків

Структурний елемент		Модуль пружності					Мікротвердість				
		М, ГПа			S, ГПа	V, %	H, МПа			S, МПа	V, %
		min	max	сер			min	max	сер		
Цемент-ний камінь	Зернисті продукти гідратації	3,9	94,5	21,5	9,7	49,9	0	11,4	1,02	1,0	98,4
	Гомогенні продукти гідратації	3,8	8,9	5,1	1,0	18,9	0,20	0,49	0,29	0,1	21,9
	Негідратовані частинки клінкеру			101					8,06		
Сталевий дріт		198	241	216	5,3	2,4	5,00	7,19	6,08	0,3	5,6
Композитна арматура	Епоксидний полімер	4,1	7,6	5,5	0,7	12,6	0,22	0,46	0,35	0,1	17,7
	Базальтова фібра	33,4	60,7	45,1	5,8	12,9	3,36	6,29	5,00	0,7	13,9

Примітки: S – середньоквадратичне відхилення; V – коефіцієнт варіації.

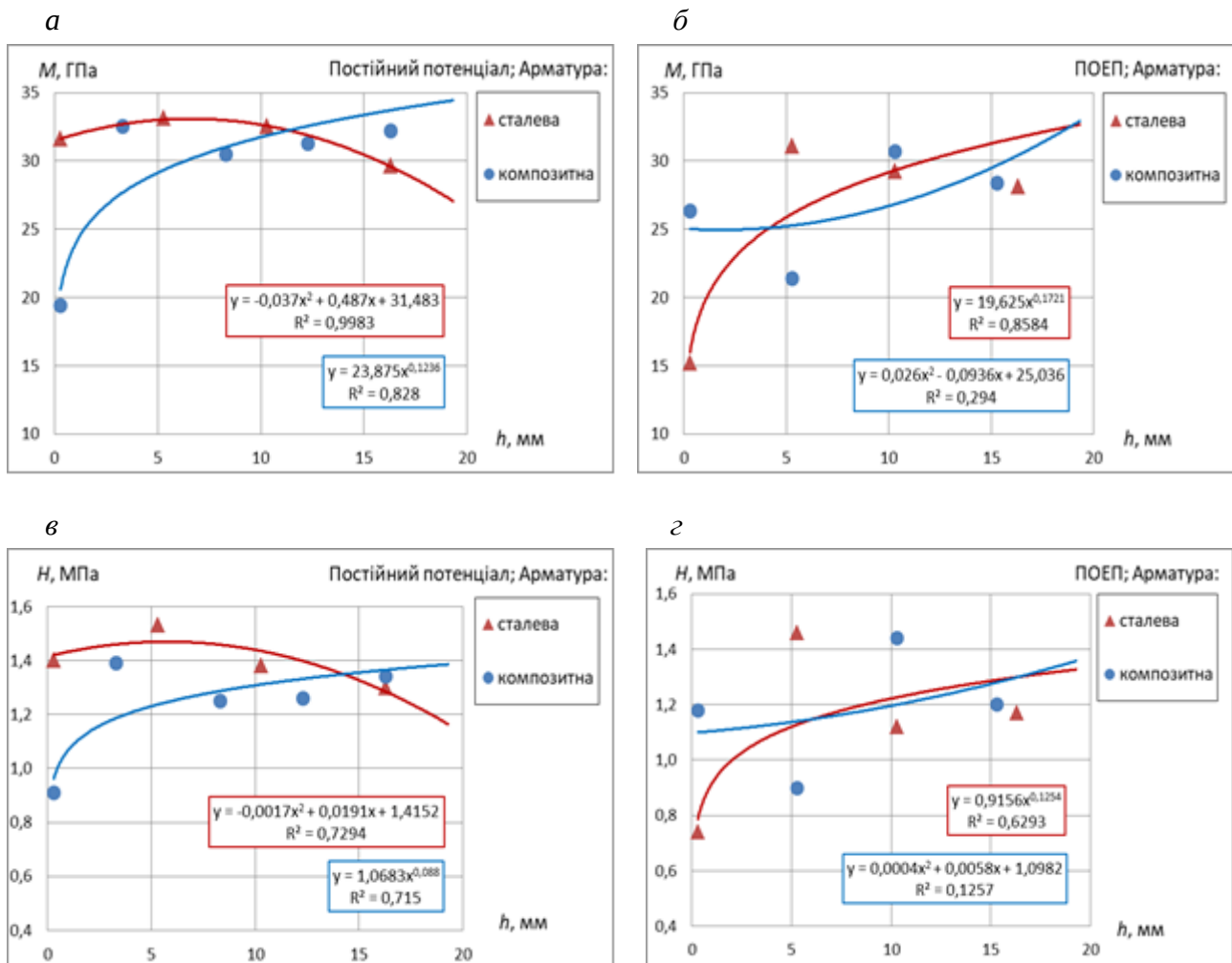


Рис. 12. Залежність від відстані h від нижньої грані (негативного потенціалу):
 а – модуля пружності M цементного каменю після впливу постійного потенціалу; б – те саме після впливу ПОЕП; в – мікротвердості цементного каменю H після впливу постійного потенціалу; г – те саме ПОЕП

Результати електронно-мікроскопічних досліджень цементного каменю зразків зі сталевую дротяною та композитною арматурою, які зазнали електричних впливів постійного потенціалу та ПОЕП, наведені на рис. 13. Під електронно-мікроскопічними знімками наведено залежності відношення вмісту кальцію до вмісту кремнію Ca/Si від відстані від нижньої грані зразка, до якої прикладали негативний полюс потенціалу.

Обговорення результатів досліджень впливу електричних потенціалів на корозійні процеси. Із рис. 3 і табл. 2 видно, що сила струму протягом обох видів електричних впливів для всіх зразків зменшувалась, електричний опір зразків зростав. Унаслідок впливу постійного потенціалу сила струму зменшилася на 58–69 %, ПОЕП – 85–86 %. Це може бути обумовлене поляризацією колоїдних частинок продуктів гідратації цементу, збільшенням електричного опору внаслідок колюментації порового простору неелектропровідними продуктами корозії. Також це може свідчити про вилугування, яке призводить до зменшення концентрації іонів Ca^{2+} у поровому електроліті цементного каменю. Проте з рис. 7 видно, що лужне середовище після експозиції зберігається по всій висоті зразка, отже вилугування на збільшення електричного опору зразка в цілому не впливає.

Із рис. 8 і табл. 2 видно, що внаслідок тільки дифузії глибина проникнення хлоридів не перевищує 16–21 мм (40–54 % товщини зразка), тоді як під впливом як постійного потенціалу, так і ПОЕП проникнення внаслідок електроміграційного перенесення відбулося на всю товщину зразків 40 мм.

Із рис. 3, б і 9, табл. 2 видно, що сталева дротяна арматура зазнає корозії зі зростанням інтенсивності: без електричного впливу в середовищі, що містить хлориди, – у разі впливу постійного потенціалу, у водному середовищі – у разі впливу як постійного потенціалу, так і ПОЕП у середовищі, що містить хлориди. Композитна арматура не зазнала пошкоджень за будь-яких із цих умов.

Із рис. 10, 11 видно, що у зразках розрізняються основні структурні елементи (табл. 4) – цементний камінь і арматура. На зображеннях у цементному камені розрізняють дисперсні та гомогенні продукти гідратації цементу. Для цих структурних елементів розраховано середні значення M і H , їхні середньоквадратичні відхилення S і коефіцієнти варіації V . Дисперсні продукти гідратації за мікромеханічними властивостями дуже неоднорідні – їхній модуль пружності M коливається від 3,9 до 94,5 ГПа, середнє значення – 21,5 ГПа, коефіцієнт варіації 49,9 %. Гомогенні продукти гідратації спостерігають на границі розподілу з арматурою, вони утворилися, очевидно, у місцях утворення карманів води замішування під арматурою під час виготовлення моделей. Їхній модуль пружності M незначний, коливається від 3,8 до 8,9 ГПа, середнє значення – 5,1 ГПа, коефіцієнт варіації 18,9 %. У зерна клінкеру, яке проглядали очевидно, M склав 101 МПа. Сталевий дріт є однорідним, модуль пружності M від 198 до 241, у середньому 216 ГПа, коефіцієнт варіації 2,4 %. Композитна арматура складається з базальтових волокон із модулем пружності M від 33,4 до 60,7, у середньому 45,1 ГПа, коефіцієнт варіації 12,9 %, та епоксидної смоли з M від 4,1 до 4,6, у середньому 5,5 ГПа, коефіцієнт варіації 12,6 %.

Отже, навколо обох типів армування є міжфазні області з різними механічними властивостями. Наприклад, відносно слабкі та широкі МПЗ навколо сталеві арматури спостерігають на рис. 10, в, навколо композитної – на рис. 10, б, г, тоді як відносно міцні та вузькі МПЗ навколо сталеві арматури відмічаються на рис. 10, а, 11, а, в, навколо композитної – на рис. 11, б, г. Як і очікували, МПЗ на верхній частині арматури виявилися міцнішими порівняно з тими, що знаходяться під арматурою. Переважно це відбувається через те, що зайва вода замішування затримується під арматурою, що робить ділянку більш пористою. Саме ці ділянки МПЗ найбільш уразливі для корозійних процесів (мікрофотознімки зразків S4d, S4p у табл. 2).

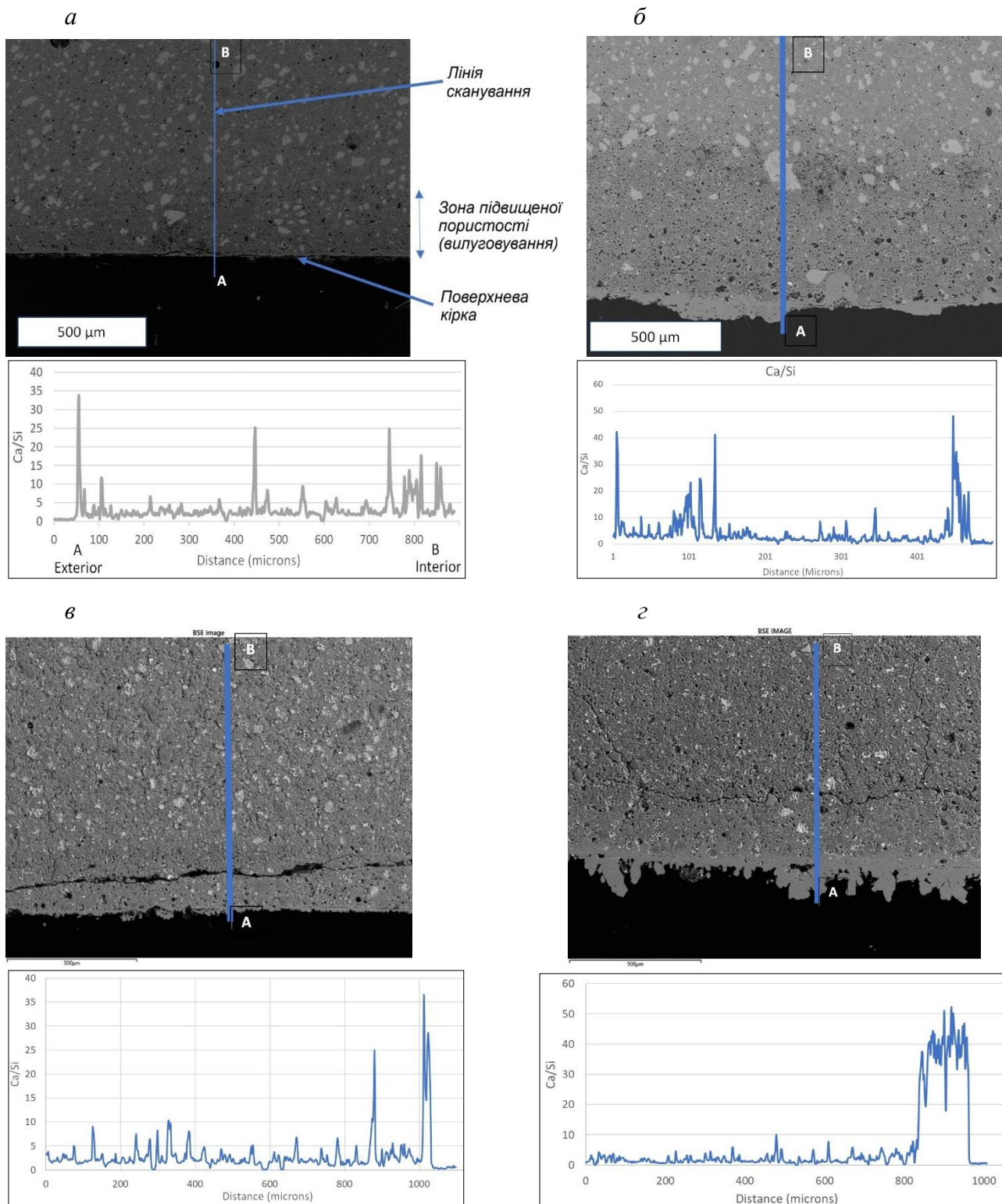


Рис. 13. Електронно-мікроскопічні знімки та розподіл відношення Ca/Si по висоті зразка:
a – S3d зі сталеву арматурою, що зазнав впливу постійного електричного потенціалу;
б – S3d із композитною арматурою, що зазнав впливу постійного потенціалу; *в* – S3р зі сталеву арматурою, що зазнав впливу ПОЕП; *г* – S3р із композитною арматурою, що зазнав впливу ПОЕП

Навколо композитної арматури спостерігають ділянки з товстим шаром полімеру (рис. 10, *г*, 11, *г*). Таке полімерне покриття може впливати на властивості МПЗ і погіршувати зчеплення цементного каменю з арматурою.

На рис. 12 наведено розподіл мікромеханічних властивостей цементного каменю (дисперсних продуктів гідратації) по висоті зразка – залежності M і H від відстані від його нижньої грані, яка була з боку негативного потенціалу. Як видно з рис. 12, більшість із них добре або задовільно апроксимована (із коефіцієнтами кореляції R від 0,55 до 1,0, одиничний випадок 0,35) поліномами другого ступеня або ступеневими рівняннями. Видно також, що розподіл мікромеханічних властивостей цементного каменю по висоті зразка для моделей зі сталевую дріткою і композитною арматурою, які зазнавали впливу постійного потенціалу (S3d, C3d) та ПОЕП (S3р, C3р) суттєво відрізняється. Для зразків C3d і S3р шар над нижньою гранню товщиною близько 0,3 мм має значно нижчі значення M і H порівняно з іншими тестовими смужками, на кілька міліметрів вище. Отже, впливи постійного та пульсуючого електричних потенціалів на зазначений шар цементного каменю моделі зі сталевую та композитною арматурою різні:

1) під впливом постійного потенціалу в зразку зі сталевую арматурою S3d зміна мікромеханічних властивостей по його висоті задовільно описана поліномами другого ступеня і є несуттєвою – M і H по всій висоті зразка складають близько 32 ГПа і 1,4 МПа відповідно;

2) під впливом постійного потенціалу в зразку з композитною арматурою C4d M по висоті зразка збільшується від 20 до 34 ГПа, а H – від 1 до 1,4 МПа, зміна добре описана ступеневими рівняннями з коефіцієнтами кореляції 0,85 і 0,91;

3) під впливом ПОЕП в зразку зі сталевую арматурою S3р M по висоті зразка збільшується від 15 до 32 ГПа, а H – від 0,8 до 1,3 МПа, зміна добре описана

ступеневими рівняннями з коефіцієнтом кореляції 0,79 і 0,93;

4) під впливом пульсуючого однонаправленого потенціалу в зразку з композитною арматурою C3р зміна мікромеханічних властивостей задовільно описана поліномами другого ступеня і є несуттєвою – M і H по всій висоті зразка складають близько 26 ГПа і 1,2 МПа відповідно.

Як видно із графіків рис. 12, електричні впливи призвели до утворення градієнтів мікромеханічних властивостей цементної пасти, обумовлених винесенням катіонів Ca^{2+} і розкладанням $Ca(OH)_2$ і гідросилікатів кальцію. У глибині моделей, де вилуговування не спричинило відчутних наслідків, модуль пружності M складає 27–33 ГПа, а мікротвердість H – 1,2–1,4 МПа. Поблизу нижньої грані, де винесена максимальна кількість іонів Ca^{2+} , M і H знижуються до 15–20 ГПа і 0,8–1 МПа відповідно.

Отже, під впливом постійного потенціалу в моделі зі сталевую арматурою електрокорозійні процеси в цементному камені майже не відбуваються, очевидно, через стікання струму через випуски арматури (рис. 1). У моделі з композитною арматурою, у якій стікання струму через арматуру не відбувається, він весь протікає через цементний камінь, навпаки, електрокорозійні процеси в цементному камені протікають.

Під впливом ПОЕП у зразку зі сталевую арматурою, незважаючи на стікання струму з випусків арматури, електрокорозійні процеси в цементному камені протікають інтенсивно, очевидно, через процеси поляризації і деполяризації арматури і шару цементного каменю між арматурою і нижньою гранню. У моделі з композитною арматурою, навпаки, електрокорозійних процесів у цементному камені майже не спостерігають, можливо, через відсутність участі арматури в поляризації та вдвічі більшу товщину шару цементного каменю, який поляризований.

Скануюча електронна мікроскопія показала, що нижній шар цементного каменю всіх зразків товщиною до 1 мм значно більш пористий, ніж інші частини вище. Це є чіткими ознаками вилугування, хоча й помірною, судячи зі збереження лужної реакції фенолфталеїну, але прогресуючого. Для зразків S3d і C3r різниця в значеннях M і H на різній висоті від низу істотно не відрізнялася. Скануючою електронною мікроскопією виявлено кальцит у нижній частині зразків. Вважають, що кальцит утворюється внаслідок карбонізації кальцію, який вимивається з внутрішньої частини цементного тіста. Оскільки значення M і H кристалів кальциту значно вищі, ніж у фаз гідратованого цементного тіста, вони могли вплинути на результати M і H нижнього шару.

Висновки. Розроблено оригінальну методику порівняльного дослідження впливу постійного та пульсуючого однонаправленого електричних потенціалів на шпали з бетону зі сталеву та композитною арматурою на моделях, що включає новий метод досліджень – наноіндентування, який дає змогу визначати мікромеханічні властивості цементного каменю – модуль пружності M та мікротвердість H , які залежать від ступеня її електроміграційного вилугування.

Експериментально встановлено, що сила струму протягом обох видів електричних впливів для всіх зразків зменшувалася, електричний опір – зростав. Це пояснено поляризацією колоїдних частинок продуктів гідратації цементу і збільшенням електричного опору внаслідок колюментації порового простору неелектропровідними продуктами корозії.

Електричні впливи протягом передбаченого методикою строку експозиції повну нейтралізацію цементного каменю по більшості глибини не спричинили.

Встановлено, що внаслідок тільки дифузії протягом передбаченої експозиції

глибина проникнення хлоридів не перевищує 16–21 мм, тоді як під впливом постійного потенціалу і ПОЕП проникнення внаслідок електроміграційного перенесення відбулося на всю товщину зразків.

Сталева дротяна арматура зазнала корозії в порядку зростання інтенсивності: без електричного впливу в середовищі, що містить хлориди, – у разі впливу постійного потенціалу, у водному середовищі – у разі впливу постійного потенціалу і ПОЕП у середовищі, що містить хлориди. Композитна арматура не зазнала пошкоджень за будь-яких із цих умов.

Методом наноіндентування встановлено, що під впливом постійного потенціалу у зразку зі сталеву арматурою електрокорозійні процеси в цементному камені майже не відбуваються через стікання струму через випуски арматури. У моделі з композитною арматурою, у якій стікання струму через арматуру не відбувається, він увесь протікає через цементний камінь, навпаки, електрокорозійні процеси в цементному камені протікають.

Під впливом ПОЕП у зразку зі сталеву арматурою, незважаючи на стікання струму з випусків арматури, електрокорозійні процеси в цементному камені протікають інтенсивно через процеси поляризації і деполяризації арматури і шару цементного каменю між арматурою і нижньою гранню. У зразку з композитною арматурою, навпаки, електрокорозійних процесів у цементному камені майже не спостерігають через відсутність участі арматури в поляризації та вдвічі більшу товщину шару цементного каменю, який поляризований.

Подяки. Ці дослідження виконані в Українському державному університеті залізничного транспорту спільно з University of the West of Scotland у складі робочого пакета III Залізничні шпали дослідницького проєкту у рамках UUK і UK-Ukraine R&I twinning grant, Project #11150 «Integrated rail freight optimisation in

Ukraine: Railway sleepers, rolling stock and logistics» (ДРН 0123U102700, ДОН 0224U031548). Автори щиро дякують професору Дмитру Пługину (УкрДУЗТ) за допомогу у створенні експериментальних установок з електричних впливів на моделі

шпал в УкрДУЗТ, доктору Wenzhong Zhu за проведення досліджень методом наноіндентування і доктору John Hughes за проведення електронно-мікроскопічних досліджень в UWS.

Список використаних джерел

1. Розвиток уявлень про електрокорозію конструкцій залізничної колії та удосконалення способів їхнього захисту з застосуванням електропровідних композицій / А. А. Пługін, О. С. Борзяк, О. А. Пługін. *Зб. наук. праць Укр. держ. ун-ту залізнич. трансп.* 2023. 204. 35-52. <http://doi.org/10.18664/1994-7852.204.2023.283877>.
2. Liu Y.-C., Chang E., Shyu, J., Chen X. Dynamic analysis of the leakage current corrosion for the non-grounded DC railway systems. *International Journal of Electrical Energy*. 2015. 3(4). 257-261. <https://doi.org/10.18178/IJOEE.3.4.257-261>.
3. Bertolini L., Carsana M., Pedferri P. Corrosion behaviour of steel in concrete in the presence of stray current. *Corrosion Science*. 2007. 49. 1056–1068. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2006.05.048>.
4. Chen Z., Koleva D. Corrosion behavior of reinforcing steel undergoing stray current and anodic polarization. *Materials*. 2021. 14(2). 261. <https://doi.org/10.3390/Fma14020261>.
5. Tang K. Stray current induced corrosion of steel fibre reinforced concrete. *Cement and Concrete Research*. 2017. 100. 445-456. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.08.004>.
6. Babaahmadi A., Tang L., Abbas Z., Zack T., Martensson P. Development of an electro-chemical accelerated ageing method for leaching of calcium from cementitious materials. *Materials and Structures*. 2016. 49:705–718. <https://doi.org/10.1617/s11527-015-0531-8>.
7. Duranceau S. J., Johnson W. J., Pfeiffer-Wilder R. J. A study examining the effect of stray current on the integrity of continuous and discontinuous reinforcing bars. *Experimental Techniques*. 2011. 35. 53-58. <https://doi.org/10.1111/j.1747-1567.2010.00656.x>.
8. Eichler T., Isecke B. Stray current-induced corrosion in cathodic protection installations of steel-reinforced concrete structures: FEM study of the critical parameters. <https://doi.org/10.1002/maco.202011620>.
9. Howind T., Hughes J.J., Zhu W. Correlation of Ca/Si and micromechanical properties in leached grey and white cement pastes. *34th International Conference on Cement Microscopy, ICMA 2012*. https://www.researchgate.net/publication/288709407_Correlation_of_CASI_and_micromechanical_properties_in_leached_grey_and_white_cement_pastes.
10. Plugin A. A., Zhu W., Murygin M. A., Plugin D. A. and Murygina N. O. New research methods of electro-corrosion processes in concrete structures. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 1376 (2024) 012018. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1376/1/012018>.

Пługін 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.

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.

Мусієнко Сергій Миколайович, аспірант кафедри залізничної колії і транспортних споруд, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0009-0002-5418-6886. Тел.: +38 (095) 060-70-06. E-mail: serb_86@ukr.net.

Редько Ігор Олександрович, доктор технічних наук, професор кафедри теплотехніки, теплових двигунів та енергетичного менеджменту, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0009-0005-1556-0830. Тел.: +38 (050) 533-68-85. E-mail: redko@kart.edu.ua.

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.

Plugin Andrii, 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: aapugin@gmail.com.

Murygin Maksym, 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.

Musyenko Sergii, Postgraduate Student of the Department of Railway Track and Transport Structures, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0009-0002-5418-6886. Tel.: +38 (095) 060-70-06. E-mail: serb_86@ukr.net.

Redko Ihor, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Heat Engineering, Heat Engines and Energy Management, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0009-0005-1556-0830. Tel.: +38 (050) 533-68-85. E-mail: redko@kart.edu.ua.

Gevorkyan Edvin, 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.

Статтю прийнято 20.09.2025 р.

ГЕОДЕЗІЯ ТА ЗЕМЛЕУСТРІЙ (193)

УДК 332.2

ОРГАНІЗАЦІЯ ТА ЕКОЛОГО-ЕКОНОМІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ОРГАНІЧНОГО ВУГЛЕЦЕВОГО ЗЕМЛЕРОБСТВА НА ЗЕМЛЯХ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

Д-р екон. наук Г. І. Шарий, канд. техн. наук В. В. Щепак,
старш. викл. Т. С. Одарюк

ORGANIZATION AND ECOLOGICAL-ECONOMIC FEATURES OF ORGANIC CARBON FARMING ON AGRICULTURAL LANDS

Dr. Sc. (Econ.) H. I. Sharyi, PhD (Tech.) V. V. Shchepak,
Sen. Lecturer T. S. Odariuk

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.213.2025.342010>

Анотація. У статті досліджено особливості органічного вуглецевого землеробства, визначено основні фактори зовнішнього впливу на функціонування органічного вуглецевого землеробства в Україні (природно-кліматичні, інституційно-землевпорядні, фінансово-економічні та соціальні).

Розглянуто світові тенденції розвитку органічного землеробства в країнах Європейського Союзу. Цінним є досвід біологічної (екологічної) системи землеробства Франції, за якої різко скорочують застосування мінеральних добрив, особливо легкорозчинних, а основне джерело живлення рослин становлять органічні добрива.

Аналіз органічного вуглецевого землеробства, яке впроваджене на ПП «Агроекологія» (Полтавська область), показав, що органічне вуглецеве землеробство більш ефективне. Економія витрат на сільськогосподарське виробництво спонукає до зниження енергозатрат на обробіток полів. При цьому урожайність сільськогосподарських культур знижується, але за органічного землеробства – на 20 %, а традиційного – 40-50 %.

Виокремлено основні принципи організації органічного вуглецевого землеробства: застосування ґрунтозахисних технологій (обробіток на глибину до 15 см); використання сидератів і пожнивних решток; внесення органічних добрив; вологоакумуляція (насичення родючого шару ґрунту органічними речовинами); застосування біологічних методів для захисту посівів від хвороби та шкідників; контроль структури землекористування.

Основною особливістю органічного виробництва є тривалий перехідний період (три роки) для надання сільськогосподарським угіддям органічного статусу. Запропоновано чотири етапи переходу від традиційного до органічного вуглецевого землеробства: маркетинг, формування земельного банку для органічного землеробства; впровадження заходів із меліорації; маркування та сертифікація полів і продукції.

В умовах погіршення стану ґрунтів і зниження природної родючості запропоновано три напрями розвитку органічного вуглецевого землеробства: екологічний (підвищення родючості ґрунтів, вологоакумуляційні поліпшення); інституціональний (впровадження державних стимулів і санкцій); економічний (зниження виробничих витрат, підвищення конкурентоспроможності сільськогосподарської продукції); соціальний (розвиток малих і

середніх агроформувань, які використовують органічне вуглецеве землеробство, забезпечення населення органічною сільськогосподарською продукцією).

Розвиток органічного вуглецевого землеробства дасть змогу вітчизняним сільськогосподарським товаровиробникам вести ефективне виробництво за максимального збереження природної родючості ґрунтів.

Ключові слова: органічне вуглецеве землеробство, стан ґрунтів, природна родючість ґрунтів, обробіток ґрунту.

Abstract. The article explores the features of organic carbon farming, identifying the main external factors influencing its functioning, including natural and climatic, institutional and land management, financial and economic, and social factors.

Global trends in the development of organic farming in the European Union countries are examined. Particularly valuable is the experience of France's biological (ecological) farming system, where the use of mineral fertilizers – especially highly soluble ones – is significantly reduced, and the main source of plant nutrition is organic fertilizers.

An analysis of organic carbon farming implemented at PE 'Agroecology' (Poltava region) has shown that organic carbon farming is more efficient. Cost savings in agricultural production encourage reduced energy consumption for field cultivation. Although crop yields decrease, the reduction under organic farming is around 20 %, while under traditional methods it reaches 40–50 %, highlighting the relative efficiency of organic practices.

The key principles of organizing organic carbon farming are outlined: the use of soil-protecting technologies (tillage to a depth of up to 15 cm); the use of green manure and nutrient residues; application of organic fertilizers; moisture accumulation (enriching the fertile soil layer with organic matter); use of biological methods for crop protection against diseases and pests; and control over land use structure.

A distinctive feature of organic production is the lengthy transition period (3 years) required to grant agricultural land organic status.

Four stages are proposed for transitioning from traditional to organic carbon farming: marketing, formation of a land bank for organic farming; implementation of land reclamation measures; field and product labeling and certification.

Keywords: organic carbon farming, soil condition, natural soil fertility, soil cultivation.

Вступ. Перед Україною в умовах мілітарних та економічних викликів постає питання збереження природної родючості сільськогосподарських земель, оскільки з кожним роком погіршується стан ґрунтів, відбувається дегуміфікація та ерозія їх, що спонукає до пошуку та запровадження сучасних методів раціонального землеробства, зокрема органічного вуглецевого землеробства. Такий підхід базований на ґрунтозахисних технологіях, відтворенні родючості ґрунтів, використанні органічних добрив і моделюванні структури посівів за умови

максимального накопичення в ґрунтах органічних сполук з акумуляцією вуглецю.

На Полтавщині з 1975 року ТОВ «Агроєкологія» веде органічне вуглецеве землеробство, за якого не вносять мінеральні добрива і не використовують хімічні сполуки, що забезпечує виробництво екологічно чистої сільськогосподарської продукції.

Зазначене потребує широкого впровадження і стимулювання державою захисту, підтримки та розповсюдження досвіду нетрадиційної форми ведення землеробства.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Наукова та прикладна проблема особливостей органічного вуглецевого землеробства висвітлені в роботах закордонних і вітчизняних учених.

У 1924 році Р.Штайнер описав концепцію біоорганічного землеробства [1]. У Великій Британії в 1940 році Нортберн дав визначення органічному сільському господарству [2]. Ж.Родейл був одним із перших прихильників сталого сільського господарства та органічного землеробства у Сполучених Штатах [3].

Питання організаційно-технологічного впровадження органічного землеробства розглянуто в працях С. Антонця, В. Писаренка, Л. Моклячук, М. Шикучи [4-7]. Вагомий внесок у дослідження еколого-економічних особливостей вуглецевого та органічного землеробства зробили О. Бородіна, О. Шкуратов, О. Гуроров та інші вчені [8-10].

Визначення мети та завдання дослідження. Сучасні екологічні виклики вимагають зміни суспільних підходів у сфері використання земельних ресурсів. Європейське співтовариство ставить за мету екологічну нейтральність, тобто вуглецевий баланс, акумуляцію вуглецю і виділення його в навколишнє середовище.

В Україні постає нагальна потреба стимулювати і впроваджувати органічне вуглецеве землеробство. Організаційною проблемою такого впровадження є орендні відносини та фрагментація земель, як наслідок паювання, їх обіг за рахунок оренди із частою зміною землекористувачів.

Метою роботи є виокремлення основних факторів зовнішнього впливу на функціонування органічного вуглецевого землеробства на землях сільськогосподарського призначення, визначення еколого-економічних особливостей та основних принципів його організації, формування етапів переходу від традиційного до органічного вуглецевого землеробства і основних напрямів його розвитку.

Основна частина дослідження. В умовах погіршення стану ґрунтів і зниження природної родючості необхідний перехід на органічне вуглецеве землеробство, що дасть змогу вітчизняним сільськогосподарським товаровиробникам вести ефективне виробництво за максимального збереження природної родючості ґрунтів.

Відсутність зобов'язальних норм консолідацій і компенсацій невіддільних поліпшень і санкцій за стійкі погіршення земель формують стан невизначеності щодо вирішення землекористувальних потреб на державному рівні.

Землекористувачі, не маючи гарантій стабільності і повернення додаткових капіталовкладень зі впровадженням органічного вуглецевого землеробства, не бажають фінансово ризикувати. Опортунізм власників земельних ділянок ігнорує екологізацію, вони прагнуть отримати максимальний прибуток. У держави відсутні зобов'язальні норми консолідації та нормативи відшкодування невіддільних поліпшень і санкцій за стійкі погіршення орних земель.

На основі досліджень авторами виокремлено основні фактори зовнішнього впливу на функціонування органічного вуглецевого землеробства в Україні: природно-кліматичні, інституційно-землевпорядні, фінансово-економічні та соціальні (таблиця).

Кожний фактор має відповідні ознаки, які формують особливості органічного вуглецевого землеробства.

До природно-кліматичних факторів віднесено такі ознаки: деградація сільськогосподарських земель; низький рівень заходів із охорони земель щодо будівництва протиерозійних гідротехнічних споруд, залуження сильно деградованих і забруднених шкідливими речовинами ґрунтів, насадження полезахисних смуг; високе військово-техногенне навантаження на сільськогосподарські землі.

Таблиця

Фактори зовнішнього впливу на функціонування органічного вуглецевого землеробства в Україні

Фактор	Ознака
Природно-кліматичні	Деградація сільськогосподарських земель. Низький рівень заходів із охорони земель щодо будівництва протиерозійних гідротехнічних споруд, залуження сильно деградованих і забруднених шкідливими речовинами ґрунтів, насадження полезахисних смуг. Високе військово-техногенне навантаження на сільськогосподарські землі
Інституційно-землевпорядні	Фрагментація земель (паювання). Нестабільність землекористувань та обіг земельних ділянок за органічного вуглецевого землеробства. Недостатність законодавчого забезпечення ведення органічного землеробства. Недосконалість державного контролю за використанням та охороною сільськогосподарських земель за відсутності стимулів і санкцій. Низький рівень обслуговування установами проведення сертифікації. Складність сертифікації. Відсутність державної підтримки на період переходу до органічного землеробства
Фінансово-економічні	Висока вартість кредитних ресурсів. Відсутність можливості страхування ризиків органічного землеробства. Незначне перевищення цін на органічну продукцію відносно цін на продукцію, яку вирощено традиційними методами. Відсутність переважаючих норм просування органічної продукції на внутрішньому ринку
Соціальні	Низька купівельна спроможність населення. Низька інвайроментальна культура населення

Для інституційно-землевпорядних факторів характерні фрагментація земель (паюванням); недостатність законодавчого забезпечення ведення органічного землеробства; складність сертифікації; недосконалість державного контролю за використанням та охороною сільськогосподарських земель; низький рівень обслуговування установами проведення сертифікації; відсутність державної підтримки на період переходу до органічного землеробства та значний обіг земель і короткий термін оренди.

До фінансово-економічних факторів віднесено ознаки високої вартості кредитних ресурсів; відсутності можливості

страхування ризиків органічного землеробства; незначного перевищення цін на органічну продукцію відносно цін на продукцію, яку вирощено традиційними методами.

Для соціальних факторів характерними є низькі купівельна спроможність населення та інвайроментальна культура населення.

Під органічним вуглецевим землеробством на землях сільськогосподарського призначення розуміють метод ведення такого виробництва, коли, не використовуючи штучні синтетичні хімічні сполуки (мінеральні добрива, пестициди,

стимулятори росту рослин, кормові добавки), урожайність сільськогосподарських культур забезпечена за рахунок посилення впливу раціональних сівозмін, органічних добрив, поверхневих систем обробки ґрунтів [11].

Одна з екологічних особливостей органічного вуглецевого землеробства полягає в тому, що воно ґрунтується на засадах накопичення органічних речовин у ґрунті та продуктивної біоти, підтримуючи його природню родючість і підвищуючи врожайність сільськогосподарських культур.

Економічною особливістю є те, що, крім вирощування органічної сільськогосподарської продукції, необхідно забезпечувати обробку, пакування та маркування продукції. Кожний етап регламентований відповідними правилами, а діяльність проходить обов'язкову систематичну державну сертифікацію та потребує автономної унікальної логістики.

Результати досліджень показали, що починаючи з 2018 р. кількість операторів органічного землеробства в Україні скоротилася з 635 до 544 од. (-14,3 %). Відповідно використання площ угідь під органічне виробництво сповільнилось у 2019 р. і на початок 2023 р. становило 462,2 тис. га, або лише 1,1 % земель сільськогосподарського призначення.

Загальна площа сільськогосподарських угідь, скорочена за рахунок Запорізької, Херсонської та частини Харківської областей, дорівнювала не більше 36176 тис. га, а органічних і перехідних угідь – близько 334,5 тис. га, або 0,9 %.

Слід зазначити негативну тенденцію зі зменшення площ угідь із перехідним статусом як в абсолютному, так і відносному вимірі. Якщо на початку досліджуваного періоду площі перехідного статусу становили до 40 % угідь з органічним статусом, то за даними 2023 р. – лише 12,6 %.

У країнах Європейського Союзу на сьогодні площа органічних угідь становить

17,0 млн га із 70 млн га земель світових. Лідерами є Іспанія (2,4 млн га), Франція (2,2 млн га), Італія (2 млн га). Середня частка органічних угідь від наявних сільськогосподарських площ складає близько 8,1 %.

Сьогодні в Австрії цей показник становить 26 %, Естонії – 22 %, Швеції – 20 %. Україна суттєво поступається екологічному прогресу, який досягнутий у ЄС, але з ресурсної точки зору має значний потенціал для розширення органічного землеробства.

Світові тенденції розвитку органічного землеробства спостерігають в Австрії, де більше 35 млн га органічних полів. Цінним є досвід біологічної (екологічної) системи землеробства Франції, за якої різко скорочується застосування мінеральних добрив, особливо легкорозчинних, а основне джерело живлення рослин становлять органічні добрива.

Органічне добриво за цієї технології рекомендовано неглибоко закладати в ґрунт, оскільки з переважанням анаеробних процесів можливе утворення токсичних для насіння і коріння продуктів. Під час компостування органічні речовини проходять фазу аеробної ферментації, тільки після цього вносять у ґрунт. Розмелені водорості та базальтовий пил рекомендовано використовувати для зниження кислотності ґрунтів. Велике значення має поверхневий обробіток ґрунту, що підвищує біологічну активність.

Один з елементів біологічного землеробства є сівозмінна з режимом насичення ґрунту живими культурами та застосування сидератів.

За органічного вуглецевого землеробства стимулюють розвиток біологічного різноманіття, підтримують родючість ґрунту біологічними способами впливу (мінімізація обробітку ґрунту, боротьба зі шкідниками, внесення органічних добрив, урахування біологічних властивостей сільськогосподарських культур для обробітку ґрунту). Замінником

гною може бути компост, солома, сидерати (люпин, гірчиця, еспарцет, горох), торф, пташиний послід та інші органічні добрива. При цьому органічне вуглецеве землеробство знижує ризики глобального потепління за рахунок накопичених органічних мас у ґрунті та акумуляції вуглецю.

ПП «Агроекологія» Полтавського району Полтавської області має земельний фонд в обсязі понад 7 тис. га, на яких вирощують зернові та кормові культури без застосування агрохімікатів. ПП «Агроекологія» у перші роки після відмови від мінеральних добрив мала зниження урожайності сільськогосподарських культур, але з роками урожайність почала відновлюватися.

Протягом останніх 10 років на більшості площ ПП «Агроекологія» урожайність сільськогосподарських культур була на рівні інтенсивного землеробства: урожайність озимої пшениці перевищувала 70 ц/га, кукурудзи на силос становила 500 ц/га, на зерно – 80 ц/га, ячменю ярого – 48 ц/га, вівса – 60 ц/га, соняшнику – 35 ц/га. Порівняння урожайності соняшнику, вирощеного ПП «Агроекологія», і врожайністю культур по Україні, за даними Державної служби статистики, доводить, що органічне землеробство не тільки безпечне, а й економічно ефективне.

Досягнення високих показників урожайності соняшнику зумовлено раціональним проектуванням сівозмін, систем обробітку ґрунту, удобрення культур, догляду за посівами, оптимізації фітосанітарного стану посівів [5].

За результатами вивчення досвіду виробництва сільськогосподарської продукції на ПП «Агроекологія» авторами виокремлено основні принципи організації органічного вуглецевого землеробства:

- застосування ґрунтозахисних технологій, за яких обробіток відбувається на глибину до 15 см (поверхневий безплужний обробіток);

- використання рослин-сидератів і поживних органічних решток;
- внесення органічних добрив;
- вологоакумуляція за рахунок насичення родючого шару ґрунту органічними речовинами;
- застосування біологічних методів і впровадження сівозмін для захисту посівів від хвороби та шкідників;
- проектування і постійна корекція структури землекористування.

З широким впровадженням і стимулюванням державного захисту, підтримкою та розповсюдженням досвіду органічного вуглецевого землеробства необхідно забезпечити перехідний період для надання сільськогосподарським угіддям органічного статусу. За чинним законодавством, тривалість може складати три роки, а у виключних випадках скоротитися до двох, що є хибним з точки зору еколого-біологічних підходів спроможності рослин до виносу хімічних сполук із ґрунту.

Під час перехідного періоду на відповідних угіддях застосовують органічні методи виробництва з метою приведення показників забруднення ґрунту до безпечного рівня, а також поступового насичення органічними речовинами ґрунту для підтримки високої природної родючості.

Авторами сформовано чотири етапи переходу від традиційного до органічного вуглецевого землеробства (рисунки).

Перший етап – маркетинговий – пошук вигідних місць збуту органічної продукції не тільки на вітчизняному, але і міжнародному ринку, від чого залежить ефективність виробництва вирощуваних сільськогосподарських культур і фінансово-економічні показники діяльності підприємства.

На другому етапі (один-два роки) відбувається формування просторового базису (земельного банку) для органічного землеробства, що передбачає аналіз ґрунту за фізико-хімічними властивостями, наявністю поживних речовин, вмістом

гумусу; консолідацію земель; створення стабільного землекористування.

Третій етап (два-три роки) – впровадження заходів із меліорації, які нейтралізують і покращують стан ґрунтів після попереднього традиційного користування земельними масивами в господарстві, насичуючи ґрунт органічними речовинами, включаючи дощових черв'яків, грибів, що підвищує вологоємність ґрунту, освоєння сівозмін.

На четвертому етапі (один рік) відбувається маркування та сертифікація полів і сільськогосподарської продукції. Маркування органічної продукції відбувається через два-три роки після переходу від традиційного землеробства до органічного.

При цьому необхідний постійний контроль виконання етапів переходу від традиційного до органічного вуглецевого землеробства.

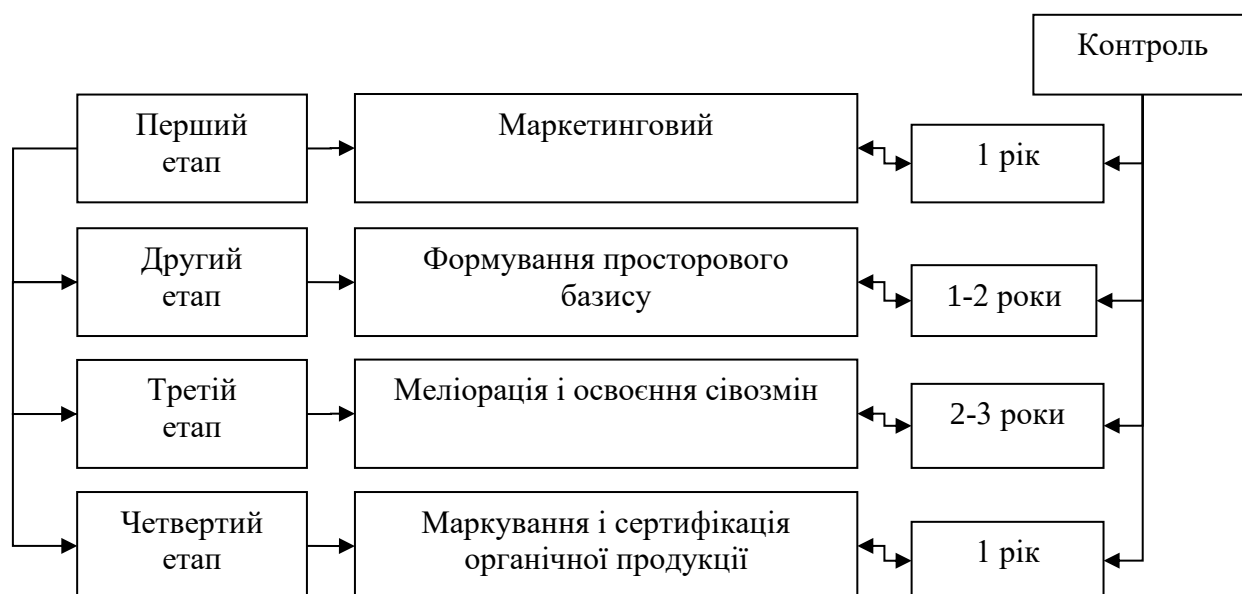


Рис. 1. Етапи переходу від традиційного до органічного вуглецевого землеробства

Етапи знаходяться в ієрархічній залежності, показують їхню підпорядкованість і слугують основою для ефективної організації органічного вуглецевого землеробства, що забезпечить його розвиток.

Сформовані етапи визначають терміни переходу від традиційного до органічного вуглецевого землеробства протягом п'яти-семи років, а не за два-три роки, як визначено законодавством.

Виокремлено напрями розвитку органічного вуглецевого землеробства:

– екологічний – мінімізація впливу виробничих процесів на довкілля; збереження і відновлення біорозмаїття в агроландшафтах і водоаккумуляції; підвищення родючості ґрунтів; гідрологічні поліпшення;

– інституціональний – державні стимули і санкції;

– економічний – поступове зростання природної родючості ґрунтів; зниження виробничих витрат завдяки відмові від застосування хімікатів; зменшення енергоємності виробництва; підвищення конкурентоспроможності продукції,

функціонування інвайроментальної економічної системи в Україні;

- соціальний – створення додаткових робочих місць у сільській місцевості; нові перспективи для малих і середніх агроформувань; оздоровлення населення.

Перспективи розвитку органічного землеробства можливі за рахунок:

- ефективності органічного вуглецевого землеробства;

- підвищення врожайності сільськогосподарських культур та ефективності тваринництва зі зменшенням енергетичних виробничих витрат;

- формування у свідомості населення потреб у здоровому способі життя і підвищення інтересу до споживання екологічно чистої органічної продукції;

- можливості експорту органічної продукції до країн світу;

- спрощення процедури сертифікації та маркування продукції;

- формування дієвої державної підтримки товаровиробників органічної продукції та розроблення для них пільгової системи фінансування.

Висновки. Отже, до факторів зовнішнього впливу на функціонування органічного вуглецевого землеробства віднесено природно-кліматичні, інституційно-землевпорядні, фінансово-економічні та соціальні. Серед основних ознак авторами виокремлено значну фрагментацію земель, нестабільність землекористувань та обіг земельних ділянок, що не дає змогу за термінами забезпечити окупність затрат на освоєння органічного землеробства.

Низька купівельна спроможність населення та невелика різниця в гуртових цінах між традиційною і органічною продукцією, відсутність державних стимулів за значних втрат урожаю порівняно з традиційним землеробством не сприяють веденню прибуткового органічного виробництва. Тому держава і органи місцевого самоврядування повинні сформувати нормативи стимулів щодо

просування органічної продукції у сфері дитячого та шкільного харчування, пропаганду здорового способу життя і відповідного харчування різних категорій населення, особливо в оздоровчих і лікарських закладах.

Головними еколого-економічними особливостями органічного вуглецевого землеробства є накопичення органічних речовин у ґрунті і продуктивної біоти, унікальність сертифікації і автономної системи зберігання та організації логістики.

Стимулом органічного вуглецевого землеробства стало посилення екологічних вимог санкцій і заборони на використання канцерогенних хімічних сполук у традиційному землеробстві України за прикладом Європи.

До основних принципів організації органічного вуглецевого землеробства авторами віднесено:

- застосування ґрунтозахисної системи землеробства, поверхневий обробіток ґрунту глибиною до 15 см;

- використання органічних добрив, рослин-сидератів, органічних рештків;

- насичення полів біотою для захисту від хвороби і шкідників і раціональних сівозмін.

Запропоновано чотири основні етапи переходу від традиційного до органічного вуглецевого землеробства: перший – маркетинговий (пошук ринків збуту, організація логістики); другий – формування просторового базису (один-два роки); третій – меліорація, освоєння сівозмін (два-три роки); четвертий – маркування і сертифікація органічної продукції (один рік).

Виокремлено основні напрями розвитку органічного вуглецевого землеробства: екологічний, інституціональний (формування на рівні держави стимулів і санкцій), економічний (формування і ефективне функціонування інвайроментальної економіки) і соціальний.

Органічне виробництво продукції рослинництва є найважливішим фактором

успішного і сталого розвитку сільського господарства. Збереження ґрунтів, довкілля та виробництво екологічно безпечної

продукції є одним із пріоритетних напрямів розвитку сільськогосподарського виробництва.

Список використаних джерел

1. Філіпчук С. В., Налєпа О. І., Голуб А. О., Баран Д. Я. Аналіз існуючих архітектурно конструктивних рішень захисних фортифікаційних споруд. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: зб. наук. праць*. Рівне: НУВГтаП, 2023. Вип. 43. С. 228–237. <https://doi.org/10.31713/budres.v0i43.25>.
2. John Paull. Attending the First Organic Agriculture Course: Rudolf Steiner's Agriculture Course at Koberwitz, 1924. *European Journal of Social Sciences*. 2011. Vol. 21, N 1. P. 64–70.
3. John Paull. Lord Northbourne, the man who invented organic farming, a biography. *Journal of Organic Systems*. 2014. 9 (1). P. 31–53.
4. Rodale J. I. How to grow vegetables and fruits by the organic method. Print Book. Rodale Books, Emmaus, Pa. 1961.
5. Антонець С. С., Антонець А. С., Писаренко В. М. Органічне землеробство: з досвіду ПП «Агроекологія» Шишацького району Полтавської області. Полтава: РВВ ПДАА, 2010. 198 с.
6. Писаренко В. М., Антонець А. С., Лук'яненко Г. В., Писаренко П. В. Система органічного землеробства агроєколога Семена Антонця. Полтава: Науково-практичне видання, 2017. 124 с.
7. Оцінка екологічних ризиків у зонах впливу складів отрутохімікатів / Л. І. Моклячук, І. М. Городиська, В. В. Монарх та ін. *Збалансоване природокористування*. Київ: Екоінвестком, 2017. № 3. С. 145–150.
8. Ґрунтозахисна біологічна система землеробства в Україні: монографія / за ред. М. К. Шикули. Київ: Оранта, 2000. 389 с.
9. Бородіна О. Агропродовольча система України у повоєнний період має перетворитися на соціально, екологічно та економічно сталу: вимога громадянського суспільства. *Український соціум*. 2022. № 4 (83). С. 112–118.
10. Shkuratov O. Methodology for estimation of ecological safety in the agricultural of Ukraine. *Scientific Papers: Series Management, Economic Engineering in Agriculture and Rural Development*. 2018. Vol. 18. Is. 3. P. 379–386.
11. Гуторов А. О. Інклюзивний розвиток економіки і аграрної сфери (теорія, методика, аналіз): монографія. Харків: Видавництво «Точка», 2019. 146 с.
12. Про основні принципи та вимоги до органічного виробництва, обігу та маркування органічної продукції: Закон України. *Відомості Верховної Ради*. 2018. № 36. Ст. 275. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2496-19#Text>.

Шарий Григорій Іванович, доктор економічних наук, завідувач кафедри автомобільних доріг, геодезії та землеустрою, Навчально-науковий інститут архітектури, будівництва та землеустрою, Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка». ORCID ID: 0000-0001-5098-2661. Тел.: +38 (050) 885-04-44. E-mail: shariy.grigoriy61@gmail.com.

Щепак Віра Василівна, кандидат технічних наук, доцент кафедри автомобільних доріг, геодезії та землеустрою, Навчально-науковий інститут архітектури, будівництва та землеустрою, Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка». ORCID ID: 0000-0003-2185-1181. Тел.: +38 (099) 704-67-08. E-mail: kanameshch@gmail.com.

Одарюк Тетяна Семенівна, старший викладач. ORCID ID: 0000-0003-0454-8615. Тел.: +38 (066) 120-59-37. E-mail: olga23071980@ukr.net.

Shary Hryhoriy Ivanovych, Doctor of Economics, Head of the Department of Roads, Geodesy and Land Management, Educational and Scientific Institute of Architecture, Construction and Land Management, National University «Poltava Polytechnic named after Yuriy Kondratyuk». ORCID ID: 0000-0001-5098-2661. Tel.: +38 (050) 885-04-44.

E-mail: shariy.grigoriy61@gmail.com.

Shchepak Vira Vasylivna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Roads, Geodesy and Land Management, Educational and Scientific Institute of Architecture, Construction and Land Management, National University «Poltava Polytechnic named after Yuriy Kondratyuk». ORCID ID: 0000-0003-2185-1181.

Tel.: +38 (099) 704-67-08. E-mail: kanameshch@gmail.com.

Odaryuk Tetyana Semenivna, senior lecturer. ORCID ID: 0000-0003-0454-8615. Tel.: +38 (066) 120-59-37.

E-mail: olga23071980@ukr.net.

Статтю прийнято 15.08.2025 р.

УДК 528:332.3:004

ГІС У СИСТЕМІ ГЕОПРОСТОРОВОГО МОНІТОРИНГУ ВИКОРИСТАННЯ ЗЕМЕЛЬ ЖИТЛОВОЇ ТА ГРОМАДСЬКОЇ ЗАБУДОВИ РЕГІОНІВ

Д-р екон. наук К. А. Мамонов, канд. екон. наук В. В. Гой, асп. В. В. Харів

GIS IN THE SYSTEM OF GEOSPATIAL MONITORING OF LAND USE FOR RESIDENTIAL AND PUBLIC BUILDINGS IN REGIONS

Dr. Sc. (Econ.) K. Mamonov, PhD (Econ.) V. Goi, postgraduate student V. Khariv

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.213.2025.341822>

Анотація. Доведено, що зараз особливе і важливе значення має застосування геоінформаційних систем для забезпечення геопросторового моніторингу використання земель житлової та громадської забудови регіонів. Встановлено тенденції та виокремлено трансформації, що відбуваються у сфері землекористування, забудови територій. У результаті систематизації сучасних наукових досліджень визначено напрями та охарактеризовано ГІС інструментарій для здійснення моніторингових процедур у сфері використання земель. Виявлено невирішені питання розроблення і реалізації геопросторового моніторингу використання земель житлової та громадської забудови на регіональному рівні, ураховуючи можливості, методи і моделі ГІС.

Ключові слова: геоінформаційні системи, геопросторовий моніторинг, використання земель житлової та громадської забудови регіонів, бази геоданих, геоінформаційні моніторингові карти.

Abstract. It has been proven that in modern conditions, the use of geographic information systems is of particular importance for ensuring geospatial monitoring of land use for residential and public development in regions. Trends have been identified and transformations in land use and development have been highlighted. As a result of systematising existing scientific research, directions have been identified and GIS tools for monitoring procedures in the field of land use have been characterised. Unresolved issues in the development and implementation of geospatial monitoring of land use for residential and public development at the regional level have been identified, taking into account the capabilities, methods and models of GIS.

The article achieves the research objective of developing directions and identifying the specifics of GIS application in the system of geospatial monitoring of land use for residential and public development in regions. To achieve this goal, the following tasks were solved: determining the directions for the application of geographic information systems to ensure geospatial monitoring of land use for residential and public buildings at the regional level; forming a geodata base; building geoinformation monitoring maps of residential and public land use at the regional level; identifying the characteristics of geospatial monitoring, taking into account the consequences of the Russian Federation's aggression.

The directions for the application of geoinformation systems to ensure geospatial monitoring of residential and public land use at the regional level have been determined.

Proposed areas for the development of a geodata base for the creation and implementation of geospatial monitoring of land use for residential and public development. GIS monitoring maps have been constructed showing the level of geoinformation provision for land for residential and public development and the impact of factors characterizing the consequences of Russian aggression.

Keywords: geoinformation systems, geospatial monitoring, land use for residential and public development in regions, geodata bases, geoinformation monitoring maps.

Вступ. Розвиток земельних відносин, зростання рівня та можливостей застосування сучасних технологій, трансформаційні процеси, що відбуваються в системі функціонування регіональних інституцій, потребують переосмислення підходів щодо підвищення ефективності використання земель. У цьому контексті актуальним питанням є розроблення і реалізація інструментарію моніторингу використання земель шляхом застосування геоінформаційних систем.

За останні роки спостерігають зниження ефективності використання земель, особливо у сфері житлової та громадської забудови. Зокрема, крайні два роки спостерігають уповільнення щільності територій (рис. 1) за рахунок негативних процесів, що відбуваються у сфері чисельності населення та землекористування. Встановлено зниження щільності територій за всіма регіонами, окрім Київського.

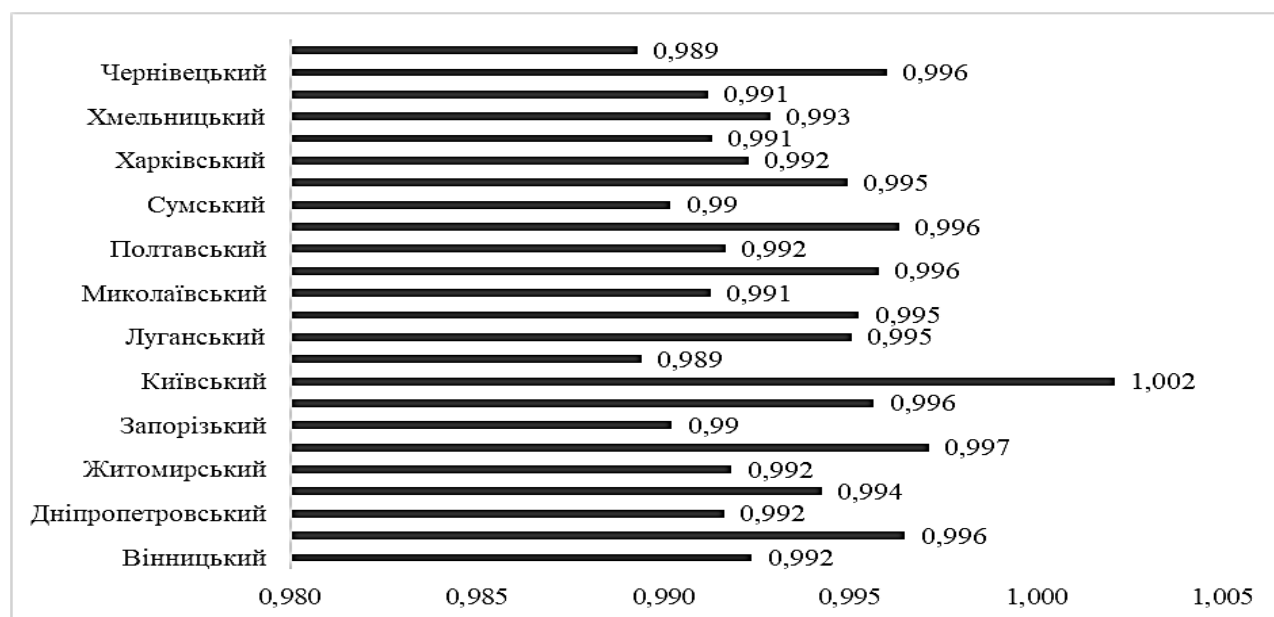


Рис. 1. Індекс змін щільності територій за регіонами, відн. од.

Найбільший рівень житлової та громадської забудови мають такі регіони: Київський, Львівський, Дніпропетровський, Вінницький, Харківський, Одеський. Разом із тим відбувається зниження рівня житлової та громадської забудови, що призвело до найнижчих його значень у Волинському, Житомирському,

Луганському, Миколаївському регіонах (табл. 1).

За останні роки на використання земель громадської та житлової забудови впливають негативні наслідки агресії РФ. У зв'язку з цим з'являється площа недоступних земель, питома вага в загальному їхньому обсязі показана на рис. 2.

Таблиця 1

Рівень громадської та житлової забудови за регіонами, відн. од.

Регіон	Значення показника
Вінницький	0,053
Волинський	0,028
Дніпропетровський	0,058
Донецький	0,034
Житомирський	0,028
Закарпатський	0,036
Запорізький	0,034
Івано-Франківський	0,047
Київський	0,068
Кіровоградський	0,045
Луганський	0,019
Львівський	0,062
Миколаївський	0,029
Одеський	0,051
Полтавський	0,049
Рівненський	0,036
Сумський	0,032
Тернопільський	0,049
Харківський	0,052
Херсонський	0,039
Хмельницький	0,043
Черкаський	0,035
Чернівецький	0,029
Чернігівський	0,025

У більшості регіонів виникли площі недоступних земель внаслідок агресії РФ: Волинський, Дніпропетровський, Донецький, Житомирський, Запорізький, Київський, Луганський, Миколаївський, Одеський, Рівненський, Сумський, Харківський, Херсонський, Чернігівський.

У деяких регіонах спостерігають відсутність недоступних земель, які знаходяться в західних або центральних територіях.

Значення індексу загальної площі житлових будівель на початок будівництва за останні періоди подані в табл. 2.

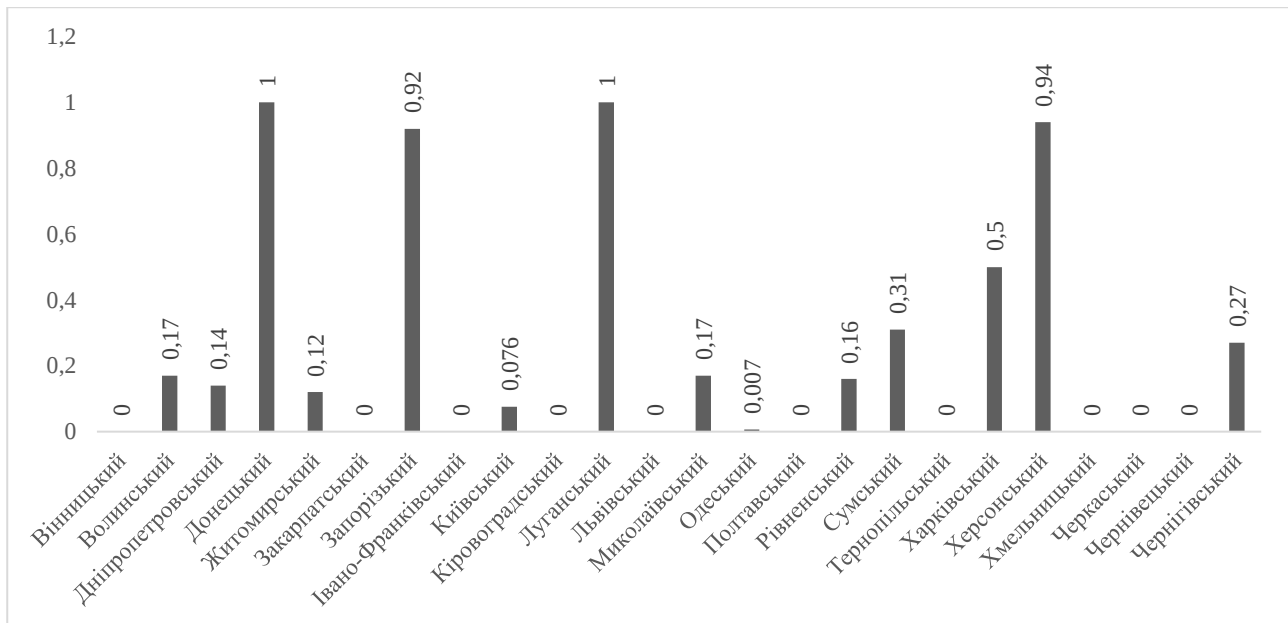


Рис. 2. Рівень недоступних земель внаслідок агресії РФ, відн. од. [1]

Таблиця 2

Індекс загальної площі житлових будівель на початок будівництва, відн. од. [2]

Регіон	Значення показника
Вінницький	1,77
Волинський	0,24
Дніпропетровський	0,75
Донецький	0,10
Житомирський	0,95
Закарпатський	1,79
Запорізький	0,10
Івано-Франківський	2,29
Київський	0,33
Кіровоградський	0,94
Луганський	0,10
Львівський	0,86
Миколаївський	0,10
Одеський	0,45
Полтавський	0,79
Рівненський	0,32
Сумський	0,10
Тернопільський	0,43
Харківський	0,61
Херсонський	0,10
Хмельницький	0,95
Черкаський	0,8
Чернівецький	3,75
Чернігівський	0,10

Протягом дослідженого періоду з'явилися позитивні тенденції у сфері формування площі житлових будівель за рахунок її зростання у Вінницькому, Закарпатському, Івано-Франківському, Чернівецькому регіонах. У більшості регіонів спостерігають негативні тенденції – зниження площі житлових будівель у Волинському, Дніпропетровському, Донецькому, Житомирському, Запорізькому, Київському, Кіровоградському, Луганському, Львівському, Миколаївському, Одеському, Полтавському, Рівненському, Сумському, Тернопільському, Харківському, Херсонському, Хмельницькому, Черкаському регіонах.

Поглиблюють такі процеси недостатній рівень застосування моніторингових інструментів у сфері земельних відносин, які базовані на використанні ГІС технологій і результатах математичного моделювання для створення відповідної кількісної основи.

Ураховуючи складність і неоднозначність процесів, що відбуваються у сфері житлової й громадської забудови, визначено актуальність теми дослідження відносно можливостей і перспектив застосування ГІС у системі геопросторового моніторингу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У сучасних наукових дослідженнях визначені напрями та особливості застосування геоінформаційних систем. Характеристика геоінформаційної системи здійснення моніторингу та оцінювання розвитку регіонів і територіальних громад визначена функціями геоінформаційної системи регіонального розвитку; структурою ГІС; завданнями геоінформаційної системи регіонального розвитку; функціями Агентства відновлення; організаційними засадами функціонування геоінформаційної системи регіонального розвитку; функціональними аспектами використання регіональної ГІС [3].

Для розвитку земельних відносин і побудови ефективної моніторингової системи в наукових розробках зосереджена увага на процесах розроблення і застосування регіональних ГІС [4–7].

Визначено напрями здійснення геопросторового моніторингу використання земель:

1. Моделювання узагальнюючих показників.
2. Створення бази геоданих показників використання земель об'єднаних територіальних громад.
3. Вибір просторової основи та прив'язка визначених показників.
4. Розподіл зон формування інтегрального та узагальнюючих показників використання земель ОТГ за регіонами.
5. Аналіз інтегрального та узагальнюючих показників.
6. Візуальне подання даних аналізу інтегрального та узагальнюючих показників на моніторинговій ГІС-карті.
7. Формування просторової основи показника зміни валового регіонального продукту на одиницю площі.
8. Побудова моніторингової ГІС-карти показника зміни валового регіонального продукту на одиницю площі.
9. Розроблення моніторингової ГІС-карти прогнозних значень показника зміни валового регіонального продукту на одиницю площі залежно від змін інтегрального чинника використання земель територіальних громад [8].

Особливості застосування методів і моделей у системі геопросторового моніторингу використання земель регіонів висвітлено в роботах [9, 10].

Напрями формування геопросторового забезпечення, особливості використання ГІС для територіального розвитку використання земель представлені у роботах [11, 12].

У наукових розробках запропоновані моделі здійснення геопросторового моніторингу: напрями обробки даних, економетричне моделювання,

геопросторове моделюванням, рівень взаємодії стейкхолдерів, управління та обмін даних [13].

Із розробленням моніторингової системи формується кількісна основа через застосування методів математичного моделювання, які виділені в розробках [14–16].

Отже, у наукових розробках визначені напрями та охарактеризовано ГІС інструментарій для здійснення моніторингових процедур у сфері використання земель. Проте залишаються невирішеними питання розроблення і реалізації геопросторового моніторингу використання земель житлової та громадської забудови на регіональному рівні, ураховуючи можливості, методи і моделі ГІС.

Визначення мети та завдання дослідження. Метою дослідження є розроблення напрямів і визначення особливостей застосування ГІС у системі геопросторового моніторингу використання земель житлової та громадської забудови регіонів. Для досягнення поставленої мети вирішують завдання:

- визначення напрямів застосування геоінформаційних систем для забезпечення геопросторового моніторингу використання земель житлової та громадської забудови на регіональному рівні;
- формування бази геоданих;
- побудови геоінформаційних моніторингових карт використання земель житлової та громадської забудови на регіональному рівні;
- особливостей геопросторового моніторингу, ураховуючи наслідки агресії РФ.

Основна частина дослідження. Визначено напрями застосування геоінформаційних систем для забезпечення геопросторового моніторингу використання земель житлової та громадської забудови на регіональному рівні:

- формування інформаційно-аналітичного, нормативно-правового і просторового забезпечення геопросторового моніторингу використання земель;

- характеристика інструментарію геоінформаційних систем, який застосовують для моніторингу;
- розроблення напрямів застосування Q GIS для геопросторового моніторингу використання земель житлової та громадської забудови;
- побудова алгоритму розроблення геопросторового моніторингу використання земель житлової та громадської забудови;
- визначення і систематизація інформаційних потоків;
- побудова структури бази геоданих;
- виокремлення чинників, що впливають на використання земель житлової та громадської забудови;
- формування шарів геоінформаційними системами;
- виокремлення функціональних аспектів моделювання засобами геоінформаційних систем;
- аналіз бази геоданих;
- застосування шарів;
- розроблення та надання карт геопросторового моніторингу;
- контроль за формуванням бази геоданих.

Запропоновано напрями розроблення бази геоданих щодо створення і реалізації геопросторового моніторингу використання земель житлової та громадської забудови на регіональному рівні:

- формування інформаційно-аналітичного забезпечення відносно системних просторових, функціональних, містобудівних та екологічних чинників;
- створення інформаційно-аналітичного забезпечення щодо інтегрального показника рівня формування і реалізації геопросторового моніторингу використання земель житлової та громадської забудови на регіональному рівні;
- формування просторового забезпечення територій, для яких розробляють геопросторовий моніторинг, а саме регіонів України;

– створення просторового забезпечення для Харківського регіону;
 – визначення чинників ведення агресивних дій, що впливають на рівень використання земель житлової та громадської забудови.

На основі застосування математичного інструментарію і розробленого методу для оцінювання інтегрального показника рівня геоінформаційного забезпечення земель житлової та громадської забудови побудована відповідна моніторингова карта (рис. 3).



Рис. 3. ГІС моніторингова карта рівня геоінформаційного забезпечення земель житлової та громадської забудови, відн. од.

Встановлено низький або несуттєвий рівень геоінформаційного забезпечення земель житлової та громадської забудови на регіональному рівні, що негативно впливає на можливості та напрями застосування геопросторового моніторингу, ефективності використання земель і ухвалення обґрунтованих рішень.

Для визначення ризиків, що виникають внаслідок агресії РФ, і впливу їх на використання земель житлової та громадської забудови визначено чинники, які характеризують обстріли Харківської області з різних засобів: артилерії, реактивних систем залпового вогню. Розроблено ГІС моніторингові карти можливостей і дальності ударів цих засобів у Харківському регіоні (рис. 4, 5).

Висновки. У результаті геопросторового аналізу визначено, що на використання земель житлової та громадської забудови негативно впливають військові засоби нанесення ударів. Зокрема, удари артилерії охоплюють майже половину території Харківського регіону, реактивні системи залпового вогню впливають на всю територію області. Внаслідок проведеного геопросторового моніторингу визначено вплив агресивних чинників на землекористування житлової та громадської забудови. Це знижує ефективність їх використання, формування і реалізацію земельних відносин на регіональному рівні.

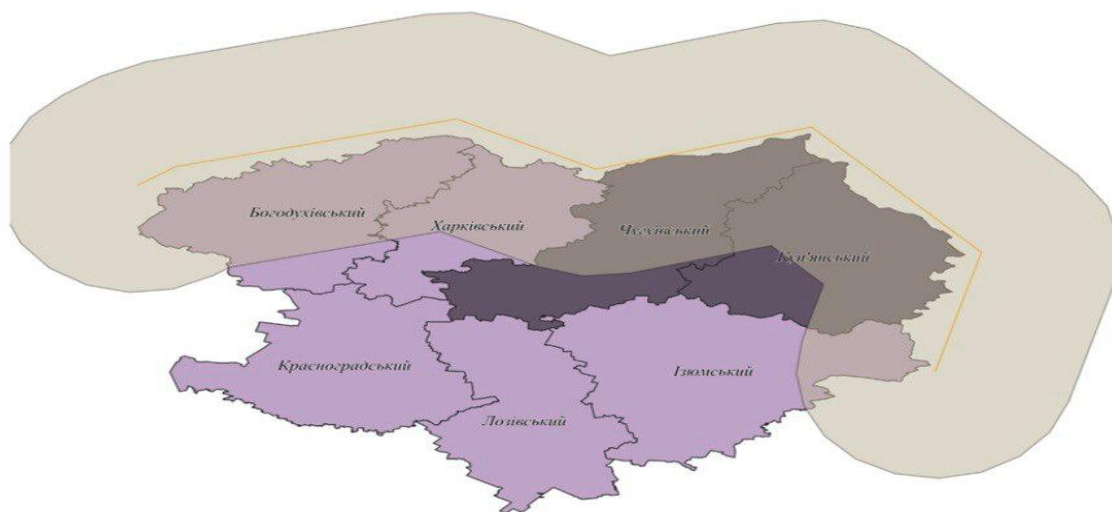


Рис. 4. Геоінформаційна моніторингова карта можливостей і дальності ударів артилерії

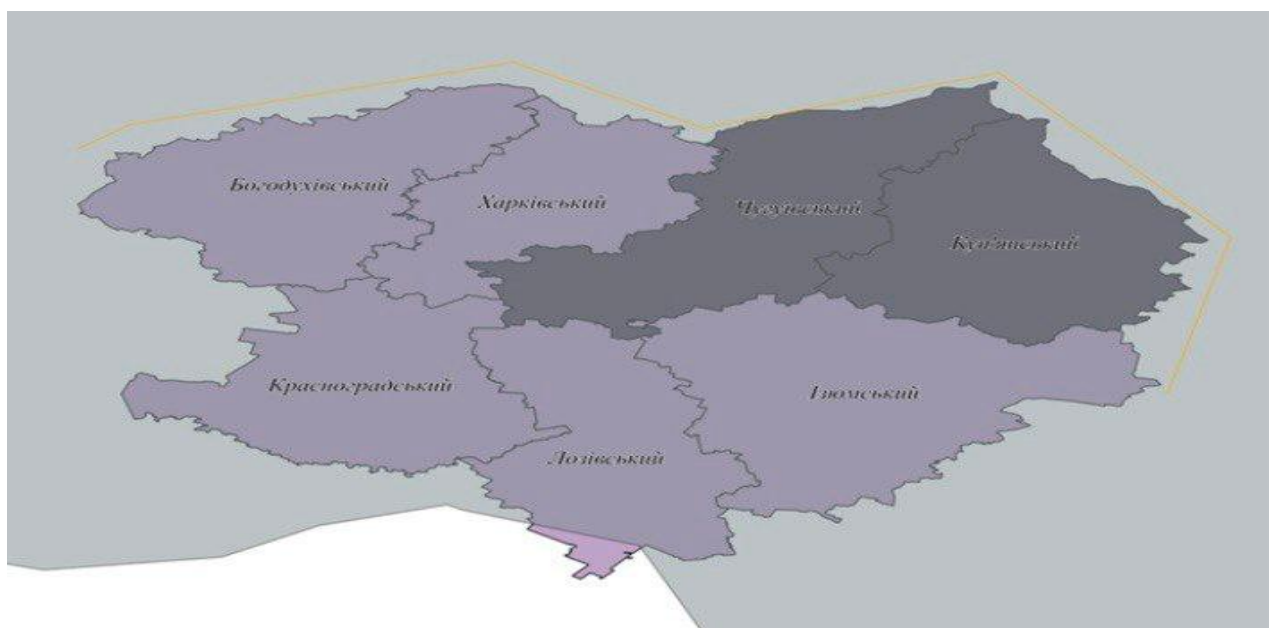


Рис. 5. Геоінформаційна моніторингова карта можливостей і дальності ударів РСЗВ

Визначено напрями застосування ГІС у геопросторовому моніторингу, які формують сучасну систему, що дає змогу візуалізувати процеси землекористування на регіональному рівні у сфері житлової та громадської забудови. Крім того, формують кількісну і просторову основу для моделювання і ухвалення обґрунтованих

рішень у сфері використання земель житлової та громадської забудови.

Встановлено негативний вплив наслідків агресії РФ на рівень та ефективність землекористування, що створює основу для ухвалення рішень і формування безпечових можливостей житлової та громадської забудови.

Список використаних джерел

1. Николук О. М., Чміль А. С., Топольницький П. П. Перспективи повернення у господарське використання земельного фонду України. Policy brief. URL: <https://kse.ua/wp-content/uploads/2024/06/Perspektivi-povernennya-u-gospodarske-vikoristannya-zemelnogo-fondu-Ukrai--ni-Policy-brief-2.pdf>.
2. Офіційний сайт Державної служби статистики України. URL: <https://www.ukrstat.gov.ua>.
3. Порядок функціонування єдиної геоінформаційної системи здійснення моніторингу та оцінювання розвитку регіонів і територіальних громад: Постанова Кабінету Міністрів України від 23 травня 2023 р. № 522. Документ 522-2023-п. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/522-2023-п#Text>.
4. Butenko O., Horelik S., Krasovska I., Zakharchuk, Y. Complex space monitoring data analysis to determine environmental trends of Poland-Ukraine border areas. *Architecture Civil Engineering Environment*. 2020. № 2. P. 39–56. DOI: <http://dx.doi.org/10.21307/ACEE-2020-016>.
5. Danshyna S. Yu., Nechausov A. S. Solution of the problem of placing medical facilities in city development projects. *Radio Electronics, Computer Science, Control*. 2020. № 3(54). P. 138–149. DOI: <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2020-3-13>.
6. Gilles André Natural hazard mapping across the world. A comparative study between a social approach and an economic approach to vulnerability. *Environment, Nature, Paysage*. 2012. URL: <http://cybergeog.revues.org/25297>.
7. Іванюта С. П. Геоінформаційна оцінка природно-техногенних загроз регіональній безпеці Івано-Франківської області. *Геоінформатика*. 2011. № 4. С. 78–84.
8. Мамонов К., Гой В., Штерндок А. Геопросторовий моніторинг використання земель об'єднаних територіальних громад. *Технічні науки та технології*. 2024. № 1 (35). С. 311–318. URL: <http://tst.stu.cn.ua/article/view/303072/295136>.
9. Мамонов К. А., Нестеренко С. Г., Вяткін К. І. ГІС-забезпечення у раціональному використанні земельних ресурсів міської забудови. *Науковий вісник будівництва*. 2016. Т. 86. № 4. С. 323.
10. 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. Ч. 2. С. 199–206. URL: http://publications.ntu.edu.ua/avtodorogi_i_stroitelstvo/115.2/199.pdf.
11. Мамонов К. А., Чайка Т. М., Вяткін Р. С., Гой В. В. Метод оцінки рівня геопросторового забезпечення використання земель промисловості регіонів. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*. 2025. Вип. 118. Ч. 1. С. 134–141. URL: http://publications.ntu.edu.ua/avtodorogi_i_stroitelstvo/118.1/134.pdf.
12. Mamonov K., Bieliatynskyi A., Gryanyk V., Kanivets O., Kovalenko L. Geospatial modeling of directions for the development and implementation of the land administration system at the regional level. *Civil and Environmental Engineering*. 2025. Vol. 0, Iss. 0. URL: <https://sciendo.com/article/10.2478/cee-2025-0072>.
13. Хосе Л. Розробка системи моніторингу територіального розвитку. URL: <https://decentralization.ua/news/13779>.
14. 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>.
15. 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>.

16. 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>.

Мамонов Костянтин Анатолійович, доктор економічних наук, професор, завідувач кафедри земельного адміністрування та геоінформаційних систем, Харківський національний університет міського господарства ім. О. М. Бекетова. ORCID iD: 0000-0002-0797-2609. Тел.: +38(099)291-73-54. E-mail: kostia.mamonov2017@gmail.com.

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.

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.

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.

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.

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 04.09.2025 р.

УДК 528.44:550.34

СУЧАСНІ МЕТОДИ ВИЩОЇ ГЕОДЕЗІЇ ТА ЇХ ЗАСТОСУВАННЯ В МОНІТОРИНГУ ДЕФОРМАЦІЙ ЗЕМНОЇ ПОВЕРХНІ

Канд. екон. наук Д. Д. Хайнус, д-р тех. наук С. Г. Могильний,
кандидати екон. наук С. О. Винограденко, Н. О. Капінос

MODERN METHODS OF HIGHER GEODESY AND THEIR APPLICATIONS IN MONITORING EARTH'S SURFACE DEFORMATION

PhD (Econ.) D. Khainus, Dr. Sc. (Tech.) S. Mohylnyi,
PhD (Econ.) S. Vynohradenko, PhD (Econ.) N. Kapinos

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.213.2025.341836>

Анотація. Метою дослідження є систематизація сучасних методів вищої геодезії та оцінювання їхньої ефективності для моніторингу деформацій земної поверхні. Розглянуто принципи роботи і технічні особливості GNSS, мереж CORS, інтерферометрії синтетичної апертури (InSAR) і гібридних підходів, що поєднують супутникові та наземні вимірювання. Наведено приклади застосування для контролю інженерних споруд, природних ландшафтів

та інфраструктури, включно з використанням безпілотних літальних апаратів у фотограмметричних зйомках. Оцінено точність, вартість і часову ефективність різних технологій. Запропоновано рекомендації щодо вибору оптимальних методів залежно від умов об'єкта, а також перспективи розвитку, включно з впровадженням GNSS PPP-RTK, штучного інтелекту та інтеграції з ГІС.

Ключові слова: вища геодезія, GNSS, InSAR, моніторинг деформацій, CORS-мережі, гібридні методи, дистанційне зондування.

Abstract. The purpose of this research is to systematize contemporary high-precision geodesy methods and assess their efficiency for monitoring Earth surface deformations. The study reviews operational principles and technical characteristics of Global Navigation Satellite Systems (GNSS), Continuously Operating Reference Station (CORS) networks, Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) techniques, and hybrid approaches that combine satellite-based and terrestrial measurements. Examples of practical applications are provided for monitoring engineering structures, natural landscapes, and infrastructure facilities, including the integration of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) for photogrammetric surveys. The analysis covers accuracy parameters, temporal resolution, spatial coverage, cost efficiency, and operational constraints of each method. Specific attention is given to error sources such as atmospheric delays, multipath effects, and limitations in dense urban or forested environments. The research proposes a comparative framework for selecting optimal monitoring techniques based on object-specific conditions, required precision, and resource availability. It also identifies trends shaping the future of geodetic monitoring, including the implementation of GNSS Precise Point Positioning in Real Time Kinematic mode (PPP-RTK), artificial intelligence integration for automated deformation detection and classification, multi-sensor data fusion (GNSS, InSAR, LiDAR, photogrammetry), and expanded access to free satellite radar imagery. The study emphasizes the importance of engineering and technical support, covering advanced GNSS receivers, high-precision total stations, digital levels, and specialized processing software for both GNSS and InSAR data. GIS integration is highlighted as a critical step for visualizing and analyzing deformation patterns within unified spatial analytical environments. The findings confirm that combining multiple geodetic techniques significantly increases the reliability and spatial completeness of deformation monitoring, supporting timely decision-making in safety-critical and geodynamically unstable areas.

Keywords: high-precision geodesy, GNSS, InSAR, deformation monitoring, CORS networks, hybrid methods.

Вступ. Стаття належить до галузі вищої та інженерної геодезії, дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) і геоінформаційних технологій, а за сферою застосування — до виробничих практик будівництва та експлуатації інженерних споруд, управління міською інфраструктурою, моніторингу гірничих територій і природно-техногенних ризиків. У цьому контексті геодезичний моніторинг деформацій розглядають як систему інструментальних і аналітичних процедур, спрямованих на виявлення, кількісне оцінювання та інтерпретацію просторово-часових змін положення

об'єктів із метрологічно підтвердженою точністю і відтворюваністю результатів.

Актуальність дослідження обумовлена кількома чинниками. Передусім зростає кількість інженерних об'єктів — мостів, дамб, тунелів, хмарочосів, для яких потрібний постійний або періодичний контроль переміщень [13]. Далі, в умовах глобальних змін клімату зростає частота і масштаб геодинамічних явищ — зсувів, карстових провалів, осідань ґрунту, підтоплень, що безпосередньо впливають на стійкість інженерних систем і безпеку населення [20]. Крім того, розвиток

ГНСС-обладнання (Global Navigation Satellite Systems) і програмного забезпечення зробив високоточні вимірювання доступнішими для широкого кола користувачів і суттєво знизив бар'єри для впровадження моніторингових рішень на різних рівнях — від локальних до регіональних [3].

Особливістю сучасної вищої геодезії є інтеграція різних методів вимірювань — GNSS, інтерферометрії синтетичної апертури (InSAR), оптичної фотограмметрії та класичних геодезичних технологій [1, 18]. Такий мультисенсорний підхід забезпечує комплементарність даних, підвищує надійність оцінок і дає змогу формувати повнішу картину деформаційних процесів у часі й просторі, включаючи як швидкоплинні події, так і повільні тренди осідання.

Ураховуючи наведене, мета цієї статті полягає в систематизації сучасних технологій геодезичного моніторингу деформацій, обґрунтуванні принципів їх інтеграції та формуванні практичних рекомендацій щодо вибору методів для типових сценаріїв інженерного моніторингу з урахуванням національних методичних і нормативних особливостей.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. За останні п'ять років суттєво просунуто методологію моніторингу деформацій на основі InSAR і високоточного позиціонування GNSS, зокрема в напрямках підвищення точності часових рядів, абсолютної прив'язки та інтеграції з ГІС. Системно узагальнено досягнення PPP-RTK, окресливши виклики (атмосферні моделі, затінення в міському середовищі) і напрями розвитку (мульті-GNSS/мультичастотність, низьковартісні приймачі), що прямо корелює з потребами інженерного моніторингу [15]. Паралельно з'являються прикладні дослідження InSAR у складних урбаністичних умовах (інтенсивна забудова, підземні комунікації), де валідовано підвищену метрологічну надійність на контрольних точках GNSS [7, 12].

InSAR підтвердив ефективність для картографування осідань великих агломерацій і транспортної інфраструктури з міліметровою річною чутливістю: для 35 китайських мегаполісів уздовж метро показано RMSE $\sim 3,75$ мм/р. відносно безперервних GNSS-станцій, що засвідчує високу відтворюваність оцінок швидкостей [12]. Масштабні регіональні оцінки (Техаське узбережжя Мексиканської затоки) демонструють роботу PS-InSAR на масивах $>1,7$ млн стійких відбивачів із калібруванням за 115 CORS-станціями як приклад поєднання площинної щільності InSAR з еталонною абсолютністю GNSS [7]. Разом ці праці визначають інструментарій для контролю повільних трендів осідання в містах і на об'єктах лінійної інфраструктури [7, 12].

Трендом є інтеграція InSAR і GNSS (а також GB-SAR) для складних інженерних задач. На гідротехнічних спорудах запропоновано схеми виявлення фазових «зривів» у довгих GB-SAR серіях на основі контрольних GNSS-рядів, що підвищує узгодженість деформаційних карт із числовими моделями [5]. Інший кейс — захисна система MOSE (Венеція), де безперервні GNSS-спостереження інтегровано з InSAR для контролю деформацій елементів інфраструктури у 2021–2023 рр., що демонструє практичну придатність мультисенсорного підходу у прибережно-урбаністичному середовищі [2]. Ці дослідження підтверджують: GNSS надає абсолютність і часову стійкість, InSAR — високу просторову роздільність, а разом вони підвищують надійність моніторингу [2, 5].

Визначення мети та завдання дослідження. Метою статті є систематизація сучасних методів вищої геодезії та обґрунтування принципів їх застосування та інтеграції (GNSS/CORS, InSAR, тахеометрія, прецизійне нівелювання) для моніторингу деформацій земної поверхні в складних природно-техногенних умовах із забезпеченням

єдиної системи координат, високої метрологічної достовірності та можливості подальшої автоматизації і включення результатів у системи раннього попередження. Для досягнення поставленої мети в роботі послідовно вирішено такі завдання: охарактеризовано теоретичні засади вищої геодезії, які забезпечують побудову референціальних систем і часових рядів деформацій; розглянуто сучасні методи і технології вимірювань (GNSS/CORS, InSAR, тахеометрія/нівелювання) з оцінюванням їхньої точності, роздільної здатності, латентності та відтворюваності за різних умов спостереження; запропоновано підхід для узгодження та об'єднання даних із різних джерел у єдиній системі координат без втрати точності з прозорою процедурою валідації; наведено репрезентативні приклади практичного застосування для моніторингу деформацій (міські осідання, лінійна та гідротехнічна інфраструктура, гірничі території), порівнюючи із наземними вимірюваннями; виконано порівняльний аналіз техніко-економічної ефективності методів і сформовано рекомендації щодо вибору технологій залежно від мети, умов об'єкта і бюджетних обмежень; окреслено вимоги щодо автоматизації моніторингу та інтеграції результатів у системи раннього попередження про небезпечні деформації.

Основна частина дослідження. Вища геодезія — це розділ геодезичної науки, зорієнтований на відтворюване визначення просторового положення точок земної поверхні з максимально можливою точністю, яка в сучасних практиках сягає міліметрового й субміліметрового діапазонів. Її предметне поле охоплює формування та підтримання референціальних систем координат, побудову високоточного часо-просторового каркаса для спостережень, а також кількісне моделювання рухів земної кори та деформацій інженерних споруд, що забезпечує наукові дослідження і критичні

виробничі застосування високоточного позиціонування.

Методологічним ядром є глобальні та національні системи відліку. WGS 84 використовують як базову операційну систему в навігаційних сервісах GPS; міжнародна реалізація ITRF забезпечує узгодженість у глобальній геоцентричній рамі з явним урахуванням тектонічних рухів і обов'язковим зазначенням епохи; українська УСК-2000 є сумісною з ETRS89 і застосовувана для топогеодезичних робіт у національному контексті. Коректність інтеграції багатоджерельних даних (GNSS, InSAR, наземні вимірювання) критично залежить від суворого дотримання цих рамок і прозорих процедур перетворення між ними (зокрема семипараметрових перетворень типу Гельмерта з фіксацією епохи).

Точність геодезичних визначень визначена сукупною дією кількох класів похибок. До супутникових належать неточності ефемерид і нестабільність бортових годинників, що зменшуються завдяки використанню точних орбітально-часових продуктів. Атмосферні впливи проявляються передусім у вигляді іоносферної та тропосферної затримок (рис. 1); їх мінімізують за рахунок багаточастотних спостережень, відповідних емпіричних і фізичних моделей і комбінованої фільтрації часових рядів. Багатопроменевість (multipath), спричинена відбиттям сигналів від навколишніх поверхонь у міському середовищі, контролюють підбиранням майданчиків, використовуючи антени з відсікачами та спектральні методи приглушення. Власний шум приймача та інші інструментальні ефекти знижують калібруванням апаратури, оптимізацією режимів спостереження, контролем якості (PDOP, AR-ratio тощо). Сукупне дотримання цих принципів робить можливим застосування сучасних методів вищої геодезії для високоточного моніторингу деформацій земної поверхні в найскладніших природних і техногенних умовах.

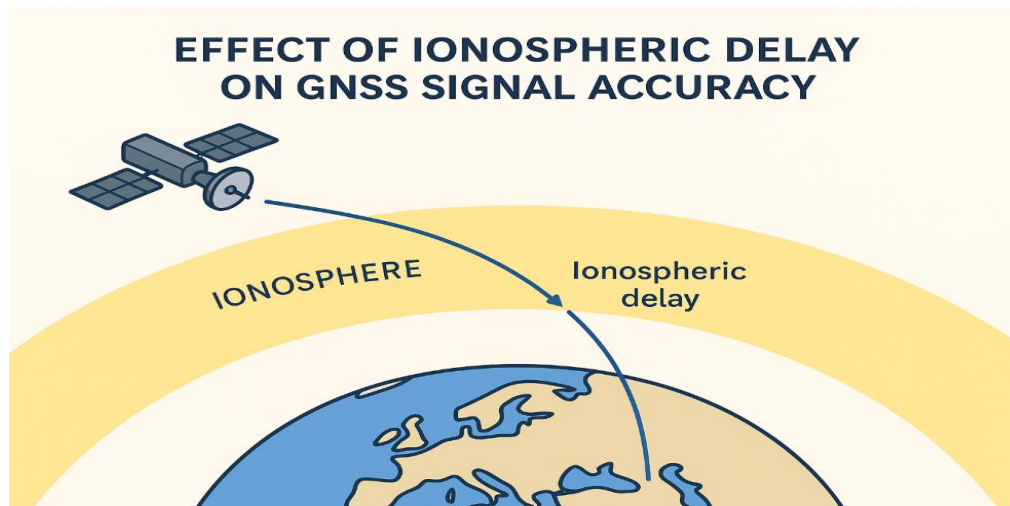


Рис. 1. Приклад впливу іоносферної затримки на точність GNSS-сигналу

Іоносфера є дисперсним середовищем, у якому радіосигнал GNSS зазнає частотно-залежної зміни ходу; величина затримки пропорційна повному вмісту електронів (TEC) і обернено пропорційна квадрату несучої частоти ($\sim \text{TEC}/f^2$) [9]. Для кодових вимірювань прояв домінує як додатна групова затримка, тоді як для фазових — як еквівалентне «випередження» фази; вплив зростає за малих кутів піднесення і під час іоносферних збурень/сцинтиляцій [1, 14]. Компенсація здійснюється іонозалежними комбінаціями дво-/трифреквентних вимірювань (ionosphere-free), із використанням глобальних і регіональних іоносферних продуктів (наприклад IGS GIM у реальному часі) і контролем якості через «геометрично-вільні» комбінації [8]. Для одночастотних приймачів можливе застосування емпіричних моделей типу Клобучара з параметрами, що трансльовані навігаційним повідомленням GPS. У поєднанні з чітко визначеною епохою в ITRF ці процедури забезпечують метрологічно коректне зіставлення часових рядів та інтеграцію даних GNSS і InSAR у глобальній референц-рамці [14].

Системи просторового відліку, що застосовувані у високоточних геодезичних роботах, взаємопов'язані через

семипараметрове перетворення Гельмерта (три трансляції, три обертання та масштаб) і його часовозалежні модифікації для задач підвищеної точності; коректність такої взаємодії потребує явного зазначення реалізації та епохи (табл. 1). Для пар ITRF $\leftrightarrow$ ITRF і WGS 84 $\leftrightarrow$ ITRF публікують офіційні параметри узгодження; історично ITRF2000 використовували як базову систему для формулювання національних трансформацій. У вітчизняному контексті затверджені транспозиційні параметри між УСК-2000 та ITRF2000 мають значення $\Delta X = 24,322$ м, $\Delta Y = -121,372$ м, $\Delta Z = -75,847$ м, тоді як обертання і масштаб приймають близькими до нуля за умови строгої фіксації епохи.

Взаємна відповідність WGS 84 і ITRF перебуває на сантиметровому рівні: сучасні реалізації WGS 84 (G1762, G2296) вирівняні до відповідних глобальних референц-рамок, тож різниці, релевантні для інженерних застосувань, зазвичай не перевищують кількох сантиметрів. УСК-2000 є геоцентричною національною системою України, інтегрованою з ITRF переважно через трансляційні члени; вона придатна для робіт у локальних проєкційних зонах (МСК) і забезпечує сантиметровий рівень точності за умови застосування регламентованих параметрів перетворення.

Таблиця 1

Порівняння параметрів основних референцних систем

Параметр	WGS 84	ITRF	УСК-2000
Тип системи	Глобальна геодезична система (геоцентрична)	Міжнародна геоцентрична система (реалізація ITRS)	Національна система України (геоцентрична, локальні зони проєкцій)
Походження та реалізація	Розроблена для глобального позиціонування	Постійно оновлювана (ITRF2000, ITRF2020 тощо); точність до сантиметрів	Синхронізована з ITRF (2020, 2000 тощо); забезпечена локальними зонами УСК-2000 / МСК-зонами
Точність відповідності	Дуже висока, відрізняється від ITRF лише на рівні сантиметрів	Висока: RMS-розбіжності між реалізаціями ~1 см	Різниця координат від ITRF/WGS84 до 10 м, у середньому 2–3 м

Джерелом координатно-часової інформації у вищій геодезії є глобальні навігаційні супутникові системи GNSS — GPS (США), GLONASS (РФ), Galileo (ЄС), BeiDou (КНР) і регіональні QZSS та IRNSS [10]. Високоточні визначення базовані на фазових спостереженнях, кількох несучих і сучасних методах оброблення (мережевий RTK, PPP/PPP-RTK), що за сприятливих умов забезпечує точність порядку 1–2 мм у плані та 3–5 мм за висотою на контрольних пунктах [9]. Сукупність наведених положень разом із міжсистемними співвідношеннями, зведеними в табл. 1, створює метрологічне підґрунтя для надійної інтеграції GNSS із InSAR і наземними геодезичними вимірюваннями в задачах моніторингу деформацій.

Оброблення GNSS-даних у вищій геодезії ґрунтовано на низці режимів, що вибирають з огляду на вимоги щодо точності, тривалість спостережень і оперативність отримання результатів. У статичному режимі координати визначають за тривалими сесіями спостережень (від кількох годин до доби) із постобробленням фазових вимірювань; цей підхід є еталонним

для закладання та згущення опорних геодезичних мереж завдяки високій стійкості фіксації неоднозначностей і можливості суворого контролю якості розв'язку. Швидкий статичний режим зменшує тривалість стояння на пункті до 15–60 хв, що робить його доцільним у польових знімальних роботах, для створення локальних опорних каркасів, коректно підібраної геометрії сузір'їв і антенних моделей; забезпечена сантиметрово-міліметрова точність у плані та кілька міліметрів — у висоті.

Для задач, де критичною є оперативність, застосовують кінематичні методи. RTK (Real-Time Kinematic) забезпечує визначення координат у реальному часі за рахунок передавання диференційних поправок від базової або віртуальної базової станції до роверсного приймача (типово через інтернет-сервіси NTRIP); за сприятливих умов фіксована роздільна здатність дає планову точність до ≈ 2 см і дає змогу оперативно контролювати положення об'єктів і марок на інженерних спорудах (рис. 2). PPK (Post-Processed Kinematic) реалізує той самий кінематичний принцип,

але з відкладеним розв'язанням фазових неоднозначностей у постобробленні; метод особливо ефективний у зніманні з безпілотних літальних апаратів, коли неперервний канал зв'язку з базовою станцією відсутній або нестабільний, а вимоги щодо точності — сантиметрового

рівня на всій траєкторії польоту. Сукупне використання цих режимів забезпечує відтворений баланс між точністю, латентністю і ресурсними витратами в комплексних схемах моніторингу деформацій.

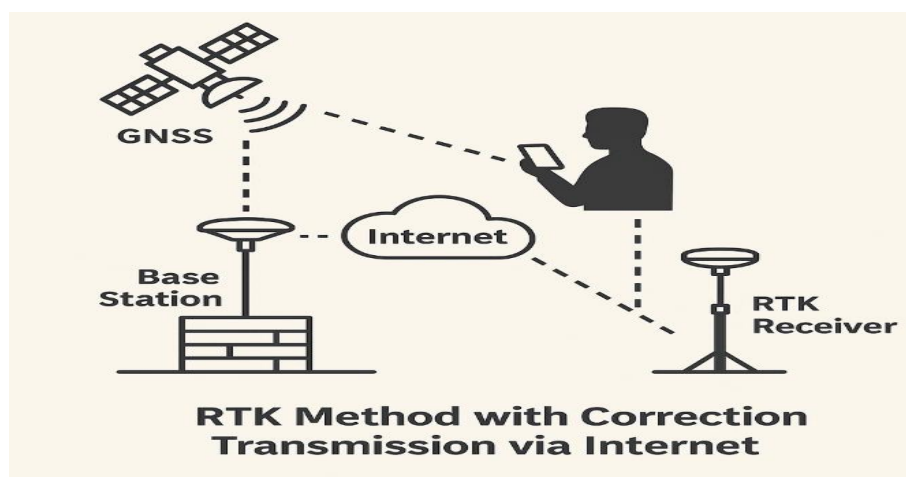


Рис. 2. Схема роботи RTK-методу з передаванням корекцій через інтернет

Постійно діючі референсні станції (CORS, Continuously Operating Reference Stations) формують регіональні та національні мережі, що забезпечують безперервне визначення поправок до навігаційних вимірювань і є стандартом просторово-часової прив'язки у вищій геодезії [3]. В Україні функціонує кілька сегментів таких мереж (зокрема UA-EUPOS, System.NET, GeoTerrace), які дають змогу отримувати високоточні координати без розгортання власної базової станції, а також підтримують мережеві RTK-сервіси з різними стратегіями формування поправок

(VRS, FKP, MAC) [3, 16]. Передавання диференційних GNSS-поправок здійснює протокол NTRIP (Networked Transport of RTCM via Internet Protocol), який забезпечує доступ мобільних приймачів до NTRIP-кастерів і потоків у форматах RTCM 2.3/3.x, автентифікацію користувачів і вибір потрібного mountpoint (точки доступу). Узагальнені характеристики охоплення й доступу наведено в табл. 2 (кількість станцій, географічне покриття, підтримувані формати поправок, умови доступу); ці дані є підставою для раціонального вибору сервісу в конкретному регіоні.

Таблиця 2

Порівняння характеристик CORS-мереж України

Назва мережі	Кількість станцій	Покриття	Формат поправок	Доступ
UA-EUPOS	60+	Уся країна	RTCM 3.x	Комерційний
System.NET	25+	Центр, Південь	RTCM 3.x	Комерційний
GeoTerrace	15+	Київ, область	RTCM 2.3/3.x	Безкоштовно для ЗВО

Метод InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar) ґрунтований на фазовій різниці між радарними знімками, отриманими з різних орбітальних епох, і дає змогу оцінювати лінійно-візувальні (LOS) зміщення поверхні з міліметровою чутливістю на великих просторових площах без розгортання наземної апаратури [6, 20]. У дослідженні застосовано кілька реалізацій InSAR: DInSAR для детекції змін між двома датами; PS-InSAR для стабільних відбивачів (будівлі, інженерні споруди) із

формуванням часових рядів швидкостей; SBAS для зменшення декореляції за рахунок підбору коротких базових ліній у просторі та часі. Результати PS-InSAR наведено на рис. 3, де подано карту осідань міської території з класами швидкостей (0 мм/р.; 1–2; 2–3; 3–4; >4 мм/р.): домінування червоних і помаранчевих маркерів у центральній частині свідчить про просторово зосереджені негативні тренди, які узгоджуються з гідрогеологічними умовами та конфігурацією інженерних комунікацій.

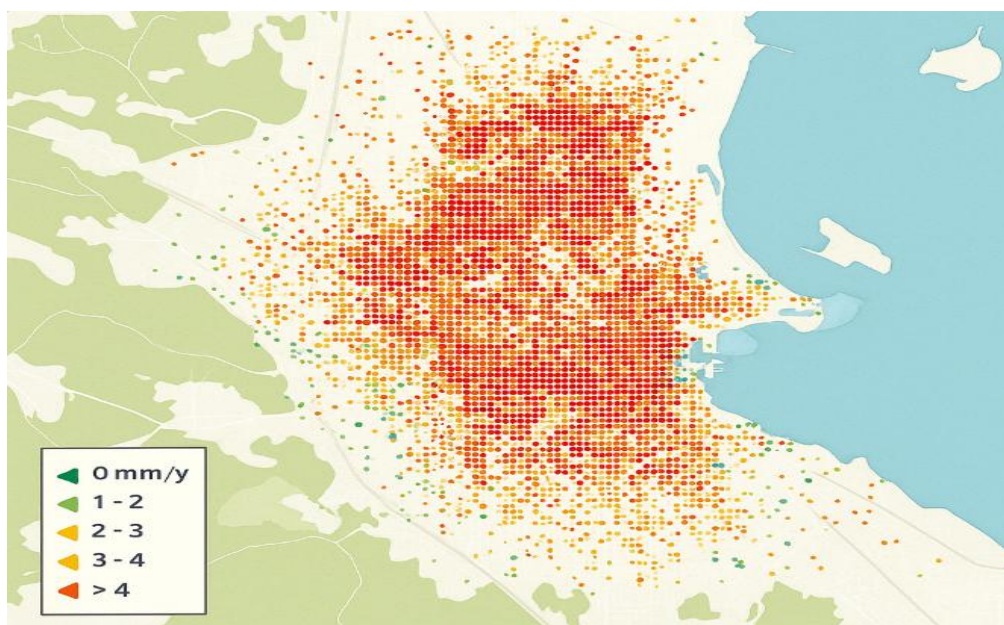


Рис. 3. Карта осідань ґрунту в районі великого міста, отримана методом PS-InSAR

У поєднанні з мережевими RTK-сервісами CORS ці InSAR-оцінки забезпечують як абсолютну прив'язку (через GNSS), так і високу площинну щільність спостережень (через PS/SBAS), що є критично важливим для виявлення і картографування повільних деформацій у міських агломераціях.

У сучасних схемах моніторингу деформацій дедалі ширше застосовують інтегровані підходи, що поєднують супутникові визначення (GNSS), радарну інтерферометрію (InSAR) і високоточні наземні спостереження (прецизійне

нівелювання, тахеометрія). Такі мультисенсорні конфігурації дають змогу одночасно забезпечити абсолютну прив'язку і часову безперервність (через GNSS), високу площинну щільність і регулярність покриття (через InSAR), локальну метрологічну верифікацію на критичних відмітках (через наземні вимірювання), що в підсумку підвищує точність, зменшує вартість широкомасштабного контролю і підтримує роботу в умовах складної радіонавігаційної обстановки (урбан-каньйон, екранування, лісові масиви) [1, 18].

Порівняльні характеристики окремих і комбінованих технологій подано в табл. 3. У типових виробничих умовах GNSS забезпечує локальний контроль із вертикальною точністю порядку 3–5 мм і латентністю до секунд (режими RTK/PPP-RTK), InSAR дає карти швидкостей на площах у десятки квадратних кілометрів із чутливістю близько 5–10 мм і періодичністю оновлення від днів до тижнів, тоді як гібридні конфігурації

завдяки взаємній калібрувально-валідаційній ролі складників досягають інтегрованої точності 2–3 мм за гнучких вимог щодо частоти оновлення та зі збереженням прийнятної собівартості. Саме така синергія лежить в основі оперативних карт деформацій і локальної діагностики «гарячих» ділянок, подібних до наведеної карти осідань міської території, отриманої методом PS-InSAR.

Таблиця 3

Порівняння GNSS, InSAR і гібридних методів для моніторингу деформацій

Метод	Просторове охоплення	Точність за висотою	Частота оновлення	Вартість
GNSS	Локальне	3–5 мм	Секунди	Висока
InSAR	Десятки квадратних кілометрів	5–10 мм	Дні/тижні	Середня
Гібридний	Локальне + регіональне	2–3 мм	Залежить від поєднання	Середня

Подальший розвиток інструментарію очікувано зосередиться на нарощуванні сузір'їв і частот GNSS, широкому впровадженні сервісів PPP-RTK із секундною конвергенцією, інтеграції алгоритмів штучного інтелекту для автоматизованого аналізу великих масивів часових рядів, розширенні відкритого доступу до радарних даних, що зменшує бар'єри масштабування моніторингових систем.

Реалізація високоточних спостережень спирається на узгоджений комплекс апаратно-програмних засобів і регламентованих процедур. Станція супутникової геодезії типово включає багаточастотний GNSS-приймач (L1/L2/L5), який забезпечує моделювання й приглушення іоносферних впливів, антену з протимультитупними характеристиками, польовий контролер/реєстратор із бездротовою комунікацією для керування сесіями та комунікаційні модулі для приймання мережових поправок у реальному часі (NTRIP через GSM/3G/4G/IPv6). Наземні

засоби залишаються обов'язковою складовою для калібрування та незалежної валідації: електронні тахеометри забезпечують кутову точність до 1" і дальномірну похибку $\pm(2 \text{ мм} + 2 \text{ ppm})$, тоді як цифрові нівеліри дають змогу визначати перевищення з точністю до 0,3 мм/км ходу. Рациональне поєднання цих компонентів із супутниковими та радарними спостереженнями формує відтворюваний виробничий пайплайн, сумісний із вимогами фахового моніторингу деформацій.

Для відтворюваного опрацювання та інтеграції геодезичних даних застосовують спеціалізовані програмні комплекси, що охоплюють увесь цикл — від первинної обробки вимірювань до побудови картографічних продуктів і звітної документації. У сегменті постоброблення GNSS-спостережень широко використовують RTKLIB — відкритий програмний пакет, придатний для статичних і кінематичних схем, фіксації фазових неоднозначностей, оцінювання якості (PDOP, AR-ratio) і моделювання

атмосферних затримок. Разом із ним застосовують комерційні програмні середовища, зокрема Trimble Business Center, Leica Geo Office і Topcon Magnet, які пропонують розширені засоби мережевого урівноваження, підтримку сервісів PPP/PPP-RTK, розвинені модулі контролю якості, управління метаданими та формування звітів.

Для інтерферометричного аналізу радарних знімків InSAR використовують набір галузевих інструментів: SNAP (ESA) для передоброблення, ко-реєстрації, формування інтерферограм і прикладних корекцій; StaMPS для методів стійких відбивачів (PSI) і часових серій; GMTSAR для побудови інтерферометричних ланцюжків і просторового аналізу. Ці пакети забезпечують повний технологічний ланцюг — від орбітальних продуктів і топокорекцій до розмотування фази, атмосферних поправок і побудови карт швидкостей деформацій із оцінюванням невизначеностей.

Інтеграцію результатів різнотипних спостережень і їхню подальшу візуалізацію виконують у середовищах ГІС. ArcGIS та QGIS забезпечують створення та ведення геоданих у структурі геобаз, узгодження результатів у заданій референційній системі (ITRF/ETRS/УСК-2000), розроблення

картографічних композицій із контрольованою символікою та масштабом, а також автоматизацію повторюваних процедур через моделі робочих процесів (ModelBuilder/Processing Toolbox).

Порівняння метрологічних характеристик типових приладів, що використовують у вищій геодезії, наведено в табл. 4. Дані подано за паспортними специфікаціями виробників і типовими умовами застосування: для багаточастотного GNSS-приймача (наприклад класу Trimble R12) у RTK-сценаріях декларована планова точність на рівні 1–2 мм за умови фіксованого розв'язку; електронний тахеометр (класу Leica TS16) забезпечує кутову точність до 1" і далекомірну похибку $\pm(2 \text{ мм} + 2 \text{ ppm})$, що уможливорює високоточні кутово-лінійні побудови та інтеграцію з GNSS-модулями; цифровий нівелір (класу Leica DNA03) забезпечує середню квадратичну похибку ходу близько 0,3 мм/км для прецизійних висотних визначень. Ці значення потрібно інтерпретувати як досяжні за умови дотримання регламентованих процедур спостереження і контролю якості. У виробничих умовах результати залежать від геометрії спостережень, стану рефракційного середовища, мультипуту і якості центрування приладів (табл. 4).

Таблиця 4

Порівняння точності основних приладів для вищої геодезії

Тип обладнання	Модель	Точність	Особливості
GNSS-приймач	Trimble R12	до 1-2 мм (RTK)	Багаточастотний, підтримка всієї GNSS
Електронний тахеометр	Leica TS16	кутова точність 1", дальність до 5 км	Інтеграція з GNSS-модулями
Високоточний нівелір	Leica DNA03	0.3 мм/км	Автоматичне визначення висот

Актуальний вектор розвитку геодезичного інструментарію визначено мініатюризацією та енергоефективністю апаратури, зростанням рівня сенсорної

інтеграції і переходом до хмароорієнтованих обчислень. У польових платформах, зокрема на БПЛА, дедалі ширше застосовують малогабаритні багаточастотні

GNSS-приймачі з низьким енергоспоживанням, що забезпечують сантиметрову точність за мінімальної маси корисного навантаження. Паралельно розвивають інтегровані навігаційно-вимірювальні комплекси, у яких модулі GNSS поєднано з інерціальними вимірювальними блоками (IMU) та оптичними сенсорами; така мультисенсорна архітектура підвищує надійність розв'язку у середовищах зі складною радіонавігаційною обстановкою. Оброблення великих масивів даних і організація спільної роботи команд дедалі частіше реалізовані у хмарних сервісах реального часу, що підтримують автоматизовані конвеєри (pipelines) від приймання даних до візуалізації та випуску звітів. Зростає роль робототехнічних засобів для автономного виконання повторюваних польових операцій, включно з автоматичною постановкою марок, періодичними обстеженнями та дистанційним інструментальним контролем.

Моніторинг деформацій є одним із основних застосувань сучасної вищої геодезії, оскільки забезпечує своєчасний

контроль стану інженерних споруд, природних ландшафтів і урбанізованих територій, що зазнають впливу геодинамічних процесів. Високоточні методи дають змогу детектувати зміщення порядку міліметрів, що критично для безпеки експлуатації та інженерного планування. Типовими об'єктами є мости, висотні будівлі, гідротехнічні споруди та елементи критичної інфраструктури, для яких супутникові технології GNSS забезпечують безперервне спостереження в режимі реального часу та оперативну діагностику.

У регіонах із підвищеною сейсмічною активністю, розвитком карсту або вираженими процесами осідання поверхні доцільним є комбіноване використання GNSS і InSAR [1, 18]. Перший забезпечує локальну абсолютну прив'язку та часову безперервність у контрольних точках, тоді як другий дає широкомасштабні карти швидкостей із високою просторовою деталізацією. Порівняльну характеристику можливостей обох підходів у карстових умовах наведено в табл. 5.

Таблиця 5

Порівняння результатів моніторингу осідань ґрунту за допомогою GNSS і InSAR у карстовій зоні

Параметр	GNSS-моніторинг	InSAR-моніторинг
Просторова роздільна здатність	Висока (точкові вимірювання)	Висока (до 5–10 м/піксель)
Точність вертикальних зміщень	1–3 мм	2–5 мм
Частота спостережень	Безперервна (реальний час)	Періодична (залежить від орбіти)
Покриття території	Локальне (біля станцій)	Широке (до сотень квадратних кілометрів)
Чутливість до погодних умов	Низька	Висока (залежить від хмарності)
Вартість впровадження	Висока	Середня
Виявлення дрібних деформацій	Висока	Висока
Складність обробки даних	Низька/середня	Висока (інтерферометрія)

Для моніторингу промислових об'єктів — нафтогазових платформ, гірничих виробок, залізничних колій — пріоритетними залишаються високочастотні схеми спостережень із секундною латентністю. Для цього доцільно застосовувати мережеві RTK-GNSS із безперервним каналом зв'язку з серверами поправок, доповнюючи їх періодичними інтерферометричними зйомками для площинної інвентаризації деформаційних полів. Така організація спостережень забезпечує як оперативне виявлення небезпечних змін, так і стратегічне оцінювання довготривалих тенденцій.

Показовим виробничим кейсом є впровадження мережевого RTK-моніторингу на об'єктах нафтогазової інфраструктури Полтавської області: безперервні GNSS-спостереження на марках бурових майданчиків забезпечують сантиметрову оперативну оцінку зміщень і дають змогу своєчасно фіксувати ознаки осідань і зсувних процесів із подальшим автоматизованим сповіщенням про перевищення порогових значень. Така організація спостережень скорочує латентність ухвалення інженерних рішень і підвищує надійність експлуатації.

Моніторинг інфраструктурних об'єктів і транспортних коридорів (залізничні колії, автомобільні дороги, аеродромні покриття) доцільно реалізувати у змішаній схемі, що поєднує GNSS-моніторинг із високоточними тахеометричними зйомками. GNSS забезпечує швидке і регулярне визначення зміщень опорних пунктів мережі контролю та дає часові ряди для виявлення трендів, тоді як тахеометрія виконує геометричне «дошліфування» положення критичних елементів інфраструктури (рейкові нитки, шви покриттів, крайки РД/ЗПС) із міліметровою деталізацією. Інтеграція обох підходів формує відтворюваний вимірвальний каркас із необхідним балансом просторової детальності, частоти оновлення та метрологічної достовірності.

Органічним продовженням змішаних GNSS- і тахеометричних схем є залучення безпілотних літальних апаратів як високо-ефективної платформи дистанційного зондування. БПЛА забезпечують швидке формування фотограмметричних моделей місцевості з просторовою роздільною здатністю до кількох сантиметрів, що робить їх придатними для детальної інвентаризації деформаційних процесів на лінійних і площинних об'єктах. Поєднання аерофотозйомки з GNSS-RTK/PPK-геоприв'язкою центрів проєкції дає змогу отримувати високоточні цифрові моделі рельєфу (ЦМР) і цифрові моделі поверхні (ЦМП) із контрольованим бюджетом похибок; подальший аналіз різницевих поверхонь – виявляти і кількісно оцінювати зміни висотного профілю насипів, укосів, відвалів і кар'єрних уступів.

У виробничій практиці така інтегрована технологія реалізована, зокрема, на кар'єрних полігонах: регулярні зйомки БПЛА в поєднанні з RTK-геоприв'язкою опорних міток (GCP) забезпечують метрологічно відтворювані оцінки балансів мас, швидкостей осідання та локальних зсувних зміщень. Наприклад, компанія «GeoDrone» у Харківській області впроваджує цикл повторних обстежень кар'єрів із використанням БПЛА, що істотно скорочує тривалість і собівартість робіт порівняно з виключно наземними методами, зберігаючи при цьому необхідний рівень точності та просторової детальності.

Разом із тим експлуатаційні умови мають низку обмежень, які необхідно враховувати із плануванням моніторингу. Метеорологічні чинники (хмарність, опади, поривчастий вітер) прямо впливають на якість знімання та стабільність GNSS-розв'язку; урбаністичне та природне екранування (забудова, лісові масиви) підсилює багатопроменевість і може знижувати надійність фіксації фазових неоднозначностей. Додатковими бар'єрами є капітальні та операційні витрати на

високоточне обладнання й ліцензійне програмне забезпечення, а також потреба у кваліфікованому персоналі для коректного виконання фотограмметричної обробки, валідації результатів та інтеграції даних у ГІС-середовище.

Перспективи розвитку практичного моніторингу пов'язані з розгортанням мереж 5G для низьколатентного передавання польових телеметричних даних і потоків поправок, ширшим використанням алгоритмів штучного інтелекту для автоматизованого виявлення й класифікації деформацій у великих часових серіях, а також із залученням мультиспектральних і гіперспектральних зображень для комплексного діагностування стану ґрунтів і конструкцій. Подальша інтеграція супутникових, безпілотних і наземних спостережень у єдине геоінформаційне аналітичне середовище створює передумови для побудови повномасштабних систем раннього попередження з відтворюваною методикою, прозорим оцінюванням невизначеностей і належною регламентацією процедур ухвалення рішень.

Висновки. У роботі узагальнено теоретико-методичні засади сучасної вищої геодезії та показано визначальну роль коректної референц-рамки (ITRF/WGS 84/УСК-2000) та епохозалежних перетворень Гельмерта для інтеграції багатоджерельних спостережень. Доведено, що суворе декларування реалізації та епохи системи координат є необхідною умовою метрологічної узгодженості часових рядів деформацій і відтворюваності результатів, що узгоджено з чинними рекомендаціями IERS та національною практикою.

Аналіз і апробація методів вимірювань підтвердили, що GNSS/CORS у статичних, швидкостатичних і кінематичних режимах забезпечує сантиметрово-міліметрову точність і високу темпоральну роздільну здатність, тоді як PS/SBAS-InSAR дає

площинні карти швидкостей із міліметровою чутливістю на великих територіях. Запропонований «end-to-end» каркас злиття GNSS і InSAR у єдиній референційній системі — з модельною компенсацією атмосферних впливів і валідацією за контрольними пунктами — зменшує систематичні зсуви, підвищує достовірність карт деформацій і забезпечує інтегровану чутливість на рівні 2–3 мм. Практичні приклади (оперативний RTK-контроль вузлових точок інженерних споруд і площинне картографування міських осідань за PS-InSAR) демонструють взаємодоповнюваність підходів і співмірні з опублікованими вітчизняними та закордонними результатами показники точності.

Техніко-економічне зіставлення свідчить на користь гібридних конфігурацій: використання InSAR як фонового широкомасштабного моніторингу із помірною собівартістю в поєднанні з GNSS/нівелюванням для абсолютної прив'язки, калібрування та високочастотного контролю на критичних відмітках забезпечує оптимальний баланс вартості, латентності, точності. Сформульовано вимоги щодо автоматизації виробничого циклу (порогові критерії спрацювання, регламенти валідації, інтеграція в ГІС-середовище) як основу для систем раннього попередження. Подальші дослідження доцільно зосередити на розширенні відкритих бенчмарків для порівняльної оцінки в різних інженерно-геологічних умовах, упровадженні сервісів PPP-RTK із малою конвергенцією, застосуванні методів штучного інтелекту для детекції аномалій у часових рядах і поглибленні процедур невизначеного моделювання, що підвищить точність, швидкодію і масштабованість геодезичного моніторингу та зміцнить його відповідність найкращим міжнародним практикам.

Список використаних джерел

1. Державна служба України з питань геодезії, картографії та кадастру. Офіційний вебсайт. URL: <https://www.land.gov.ua/> (дата звернення: 01.09.2025).
2. Fabris M., Floris M. Integrated GNSS and insar analysis for monitoring the shoulder structures of the MOSE system in venice, italy. *Remote sensing*. 2025. Vol. 17, No. 6. P. 1059. URL: <https://doi.org/10.3390/rs17061059> (date of access: 18.08.2025).
3. Ferretti A., Prati C., Rocca F. Permanent scatterers in SAR interferometry. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*. 2001. Vol. 39, No. 1. P. 8–20. URL: <https://doi.org/10.1109/36.898661> (date of access: 18.08.2025).
4. Gis technologies in land valuation: european experience for improving ukrainian practice / I. Sadovyy et al. *Municipal economy of cities*. 2025. Vol. 3, No. 191. P. 440–446. URL: <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2025-3-191-440-446> (date of access: 10.08.2025).
5. Ground-based InSAR and GNSS integration for enhanced dam monitoring / M. Rebmeister et al. *Applied geomatics*. 2025. URL: <https://doi.org/10.1007/s12518-025-00622-w> (date of access: 11.08.2025).
6. Hanssen R. F. Radar interferometry. Dordrecht : Springer Netherlands, 2001. URL: <https://doi.org/10.1007/0-306-47633-9> (date of access: 11.08.2025).
7. Identifying wind turbines from multiresolution and multibackground remote sensing imagery / Y. Zhai et al. *International journal of applied earth observation and geoinformation*. 2024. Vol. 126. P. 103613. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2023.103613> (date of access: 01.09.2025).
8. Klobuchar J. A. Ionospheric Time-Delay Algorithm for Single-Frequency GPS Users. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*. 1987. 23(3). 325–331.
9. Leick A., Rapoport L., Tatarnikov D. GPS satellite surveying. Hoboken, NJ. USA : John Wiley & Sons, Inc. 2015. URL: <https://doi.org/10.1002/9781119018612> (date of access: 02.09.2025).
10. Lichtenegger H., Hofmann-Wellenhof B., Wasle E. GNSS – global navigation satellite systems: GPS, GLONASS, galileo, and more. Springer. 2007. 518 p.
11. Mohylnyi S., Khainus D., Vynohradenko S. Analysis of the accuracy of cadastral surveys using UaVs. *Ukrainian journal of applied economics and technology*. 2024. Vol. 9, No. 1. P. 146–151. URL: <https://doi.org/10.36887/2415-8453-2024-1-24> (date of access: 04.09.2025).
12. Overview and analysis of ground subsidence along china's urban subway network based on synthetic aperture radar interferometry / S. Wang et al. *Remote sensing*. 2024. Vol. 16, No. 9. P. 1548. URL: <https://doi.org/10.3390/rs16091548> (date of access: 18.08.2025).
13. Petrov L. Study of the atmospheric pressure loading signal in very long baseline interferometry observations. *Journal of geophysical research*. 2004. Vol. 109, B3. URL: <https://doi.org/10.1029/2003jb002500> (date of access: 04.08.2025).
14. Petit G., Luzum B. (eds.). *IERS Conventions (2010)*. IERS Technical Note No. 36. Frankfurt am Main: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, 2010. 179 p.
15. Review of PPP–RTK: achievements, challenges, and opportunities / X. Li et al. *Satellite navigation*. 2022. Vol. 3, No. 1. URL: <https://doi.org/10.1186/s43020-022-00089-9> (date of access: 16.08.2025).
16. RTKLIB: an open source program package for GNSS positioning. *RTKLIB: An Open Source Program Package for GNSS Positioning*. URL: <https://www.rtklib.com/> (date of access: 16.08.2025).
17. Seeber G. Satellite geodesy: foundations, methods, and applications. de Gruyter GmbH, Walter, 2008.

18. State service of ukraine for geodesy, cartography and cadastre (stategeocadastre) | eurogeographics. *EuroGeographics*. URL: <https://eurogeographics.org/member/state-service-of-ukraine-for-geodesy-cartography-and-cadastre-stategeocadastre/> (date of access: 14.08.2025).
 19. STEP – science toolbox exploitation platform. *STEP – Science Toolbox Exploitation Platform*. URL: <https://step.esa.int/main/> (date of access: 04.09.2025).
 20. The use of GIS technologies for geodetic monitoring / D. D. Khainus et al. *IOP conference series: earth and environmental science*. 2023. Vol. 1254, No. 1. P. 012137. URL: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1254/1/012137> (date of access: 04.09.2025).
-

Хайнус Дмитро Дмитрович, кандидат економічних наук, доцент, доцент кафедри управління земельними ресурсами, геодезії та кадастру, Державний біотехнологічний університет, Харків, Україна.

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-6097-1464>. Тел.: +38 (095) 926-61-19. E-mail: dmitry.khainus@gmail.com.

Могильний Сергій Георгійович, доктор технічних наук, професор, професор кафедри управління земельними ресурсами, геодезії та кадастру, Державний біотехнологічний університет, Харків, Україна.

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-0158-5672>. E-mail: mogilnyy.sg@gmail.com.

Винограденко Сергій Олександрович, кандидат економічних наук, доцент, доцент кафедри управління земельними ресурсами, геодезії та кадастру, Державний біотехнологічний університет, Харків, Україна.

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-8520-6504>. Тел.: +38 (098)-465-04-18.

E-mail: s.vinogradenko15@gmail.com.

Капінос Наталія Олександрівна, кандидат економічних наук, доцент, завідувач кафедри геодезії та землеустрою, Сумський національний аграрний університет, Суми, Україна. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-9354-5311>. Тел.: +38 (066) 569-45-22. E-mail: nataliia.kapinos@snau.edu.ua.

Khainus Dmytro PhD (Econ.) Associate Professor, Department of Land Resources Management, Geodesy and Cadastre, State Biotechnological University, Kharkiv, Ukraine. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-6097-1464>.

Tel.: +38 (095) 926-61-19. E-mail: dmitry.khainus@gmail.com.

Mohylnyi Serhii Dr. Sc. (Tech.) Professor, Department of Land Resources Management, Geodesy and Cadastre, Kharkiv State Biotechnological University, Ukraine. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-0158-5672>.

E-mail: mogilnyy.sg@gmail.com.

Vynohradenko Serhii PhD (Econ.) Associate Professor, Department of Land Resources Management, Geodesy and Cadastre, Kharkiv State Biotechnological University, Ukraine. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-8520-6504>.

Tel.: +38 (098)-465-04-18. E-mail: s.vinogradenko15@gmail.com.

Nataliia Kapinos PhD (Econ.) Associate Professor, Department of Geodesy and Land Management, Sumy National Agrarian University, Sumy, Ukraine. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-9354-5311>. Tel.: +38 (066) 569-45-22.

E-mail: nataliia.kapinos@snau.edu.ua.

Статтю прийнято 18.09.2025 р.

ЗАЛІЗНИЧНИЙ ТРАНСПОРТ (273)

УДК 621.314

ОСОБЛИВОСТІ МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРОЦЕСІВ В ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМАХ ІЗ СИЛОВИМИ ТРАНСФОРМАТОРАМИ

Д-ри техн. наук В. Г. Ягуп, К. В. Ягуп, канд. техн. наук В. П. Нерубацький

FEATURES OF MODELING ELECTROMAGNETIC PROCESSES IN ELECTRICAL SYSTEMS WITH POWER TRANSFORMERS

Dr. Sc. (Tech.) V. H. Yahup, Dr. Sc. (Tech.) K. V. Yahup,
Cand. of Technical Sciences V. P. Nerubatskyi

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.213.2025.341845>

Анотація. Метою статті є дослідження електромагнітних процесів в електротехнічній системі з силовим трансформатором на основі моделі трансформатора, складеної за оригінальним алгоритмом формування її топології і визначення її параметрів із метою покращення показників електропостачання від мережі і умов роботи самого силового трансформатора завдяки симетруванню режиму. Методологія статті базована на розгляді математичних залежностей між струмами, напругами та потужностями трансформаторів у типових режимах випробувань, для яких визначено паспортні дані. На основі аналізу цих залежностей обґрунтована та математично доведена проста формула, яка визначає коефіцієнт зв'язку первинної та вторинної обмоток трансформатора через відносні значення струму холостого ходу і напруги короткого замикання. У результаті застосування запропонованої формули для визначення коефіцієнта зв'язку котушок трансформатора розроблено алгоритм розрахунку параметрів моделі трансформатора. Ці розрахунки дають змогу звести визначення параметрів будь-яких моделей трансформаторів до комп'ютерних програм для моделювання електротехнічної системи з силовим трансформатором. Запропонована методика визначення параметрів моделей трансформаторів відрізняється від відомих методик, поданих у технічній літературі. Огляд статей і монографій із зазначеної проблеми показав відсутність подібних досліджень, які б призвели до отримання зазначеної формули. Це надає оригінальності запропонованому алгоритму визначення параметрів моделей трансформаторів. Запропоновані теоретичні положення дослідження перевірені на візуальних моделях у системі MATLAB. Проаналізовані електромагнітні процеси в системі з реальним потужним трансформатором для електропостачання залізниці змінного струму. Результати моделювання та порівняння запропонованого методу з класичним показали високу адекватність і точність моделей із параметрами, визначеними за новим методом. Це дає змогу застосовувати запропоновану методику для практичних розрахунків зі складанням моделей електричних систем, які містять потужні трансформатори.

Ключові слова: електротехнічна система, електромагнітні процеси, силовий трансформатор, заступна схема, паспортні дані, параметри моделі.

Abstract. *Electrical systems with power transformers represent an important class of devices in electric power engineering and power electronics. Correct consideration of transformer parameters when studying electromagnetic processes in such electrical systems is an extremely important issue. Usually in engineering practice, a transformer is described by a number of parameters called passport data. However, when modeling processes in modern computer software packages, it is necessary to determine additional model parameters, which also depend on the equivalent power transformer circuit adopted in the modeling system. The task of obtaining such parameters is associated with the need to ensure the required accuracy and adequacy of the transformer model. The purpose of the article is to study electromagnetic processes in an electrical system with a power transformer based on a transformer model compiled according to the original algorithm for forming its topology and determining its parameters with the aim of improving the performance of power supply from the network and the operating conditions of the power transformer itself due to mode balancing. The methodology of the article is based on the consideration of mathematical dependencies between currents, voltages and powers of transformers in typical test modes, for which passport data are determined. Based on the analysis of these dependencies, a simple formula is justified and mathematically proven, which determines the coupling coefficient of the primary and secondary windings of the transformer through the relative values of the no-load current and short-circuit voltage. As a result of applying the proposed formula for determining the coupling coefficient of transformer coils, an algorithm for calculating the parameters of a transformer model has been developed. These calculations allow reducing the determination of the parameters of any transformer models to computer programs for modeling an electrical system with a power transformer. The proposed method for determining the parameters of transformer models differs from the known methods presented in the technical literature. A review of articles and monographs on the specified problem showed the absence of similar studies that would lead to obtaining the specified formula. This gives originality to the proposed algorithm for determining the parameters of transformer models. The proposed theoretical provisions of the study were tested on visual models in the MATLAB system. Electromagnetic processes in a system with a real powerful transformer for AC power supply of railways were analyzed. The results of modeling and comparison of the proposed method with the classical one showed high adequacy and accuracy of the models with the parameters determined by the new method. This makes it possible to apply the proposed method for practical calculations when compiling models of electrical systems containing powerful transformers.*

Keywords: *electrical system, electromagnetic processes, power transformer, equivalent circuit, passport data, model parameters.*

Актуальність теми дослідження.

Електротехнічні системи з силовими трансформаторами являють собою важливий клас пристроїв в електроенергетиці і силовій електроніці. Правильне врахування параметрів трансформатора в разі досліджень електромагнітних процесів у таких електричних системах є надзвичайно важливим питанням. Зазвичай в інженерній практиці трансформатор описано низкою параметрів, які називають паспортними даними. Однак із моделюванням процесів у сучасних комп'ютерних програмних

пакетах необхідно визначати додаткові параметри моделі, які до того ж залежать від прийнятої в системі моделювання заступної схеми силового трансформатора. Задача отримання таких параметрів пов'язана з необхідністю забезпечення потрібної точності і адекватності моделі трансформатора.

Вступ. Аналіз електромагнітних процесів в електротехнічних системах за рахунок комп'ютерного моделювання набув в останні роки широкого застосування. Цьому сприяв прогрес у розвитку апаратних засобів комп'ютерної техніки, а також поява

програмних комплексів для візуального моделювання динамічних систем, до яких належать і електротехнічні системи. У більшості електротехнічних систем важливими і часто вживаними компонентами є силові трансформатори. Так, у системах сигової електроніки і автоматизованого електропривода трансформатори забезпечують необхідні рівні напруг для функціонування виконавчих механізмів. У системах електропостачання трансформатори змінюють рівні напруг, застосовувані для передавання електроенергії на значні відстані і приведення напруг до безпечних рівнів напруги на боці споживачів. Моделювання електротехнічних систем із трансформаторами є актуальним завданням у плані проектування, а також дослідження режимів, що протікають в електротехнічних системах і комплексах. Адекватність моделювання багато в чому залежить від того, наскільки точно вдається відобразити властивості і характеристики реального трансформатора, перетворивши їх у параметри його математичної моделі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання відносно параметрів заступних схем трансформаторів активно обговорюють останнім часом [1–5]. У системах моделювання електричних і електронних систем знаходять застосування різні способи подання моделей трансформаторів. Так, у системах PSPICE, Micro-CAP, EWB-5.12, Desigh-Lab-8.0, OrCAD-9.2, Simscape і PSIM трансформатори подають у вигляді ідеальних котушок індуктивностей, магнітно зв'язаних між собою [6–8]. При цьому можуть бути задані і параметри магнітних осердь з урахуванням їхніх властивостей, що може мати значення в разі розгляду, наприклад, роботи на високих частотах і в режимі малого сигналу. Моделюючи силові електротехнічні системи у пакеті Simulink [9–16], у вікно властивостей моделі трансформатора необхідно ввести параметри Т-подібної

заступної схеми трансформатора. Тут у розпорядженні користувача є моделі однофазного і трифазних трансформаторів. Трифазні трансформатори подають як сукупність трьох однофазних трансформаторів, що можна побачити, розкриваючи маски цих моделей за допомогою опції Look Under Mask. У той же час у Simulink містяться і моделі індуктивно зв'язаних котушок індуктивностей. У системі моделювання тиристорних перетворювачів, складеної на основі застосування теорії сигнальних графів [7], передбачена можливість вводити інформацію про кілька котушок індуктивностей, кожна з яких може бути пов'язана з усіма іншими. Це дає змогу, наприклад, у багатофазному багатообмотковому трансформаторі визначити зв'язки між обмотками різних осердь трифазного трансформатора з урахуванням ослаблення магнітного потоку за рахунок шунтування третім стрижнем. Для трансформатора зазвичай задано паспортні (каталожні) дані заводу-виробника, які розміщені на щитку трансформатора, а також у відповідних довідниках. У зв'язку з цим у розробника, що користується ними в процесі проектування або дослідження будь-якої з комп'ютерних систем моделювання електротехнічних пристроїв і комплексів, виникає завдання вибору моделі і визначення параметрів цієї моделі трансформатора, які потрібні для застосовуваної системи комп'ютерного моделювання.

Як електротехнічну систему, у якій будуть досліджені електромагнітні процеси, прийнято систему енергозабезпечення залізниці змінного струму з потужним тяговим трансформатором. Як буде показано під час дослідження, режим роботи такої системи викликає появу суттєвої несиметрії, що впливає на енергетичні показники електропостачання і умови роботи самого трансформатора в цій системі.

Визначення мети та завдання дослідження. Метою статті є дослідження електромагнітних процесів в електротехнічній системі з силовим трансформатором на основі моделі трансформатора, складеної за оригінальним алгоритмом формування її топології, і визначення її параметрів, що дасть змогу покращити показники електропостачання від мережі і умови роботи самого силового трансформатора завдяки симетруванню режиму. Для досягнення мети було поставлено такі завдання:

– отримати математичний вираз, щоб за паспортними даними визначати коефіцієнт зв'язку первинної і вторинної обмоток трансформатора, і запропонувати конкретні алгоритми розрахунків параметрів заступних схем трансформатора на основі викладеної методики;

– розглянути варіанти використання моделей трансформатора на основі взаємно пов'язаних індуктивностей і порівняти запропоновані моделі трансформатора з класичними моделями в системі MATLAB;

– дослідити запропоновану модель трансформатора у складі моделі електропостачання залізниці змінного струму в режимах несиметричного споживання електроенергії і з увімкненням симетруючих реактивних елементів, проаналізувати отримані результати імітаційного моделювання електромагнітних процесів в електротехнічних системах із силовими трансформаторами.

Основна частина дослідження. Як досліджувану електротехнічну систему, до складу якої включені трансформатори, розглянуто систему постачання залізниці змінного струму. У ній силові трансформатори змушено працюють у несиметричному режимі енергопостачання, оскільки вхідна напруга подана як трифазна система напруг, а вихідна напруга споживання є фактично однофазною. Принципову схему електротехнічної системи живлення залізниці змінного струму наведено на рис. 1.

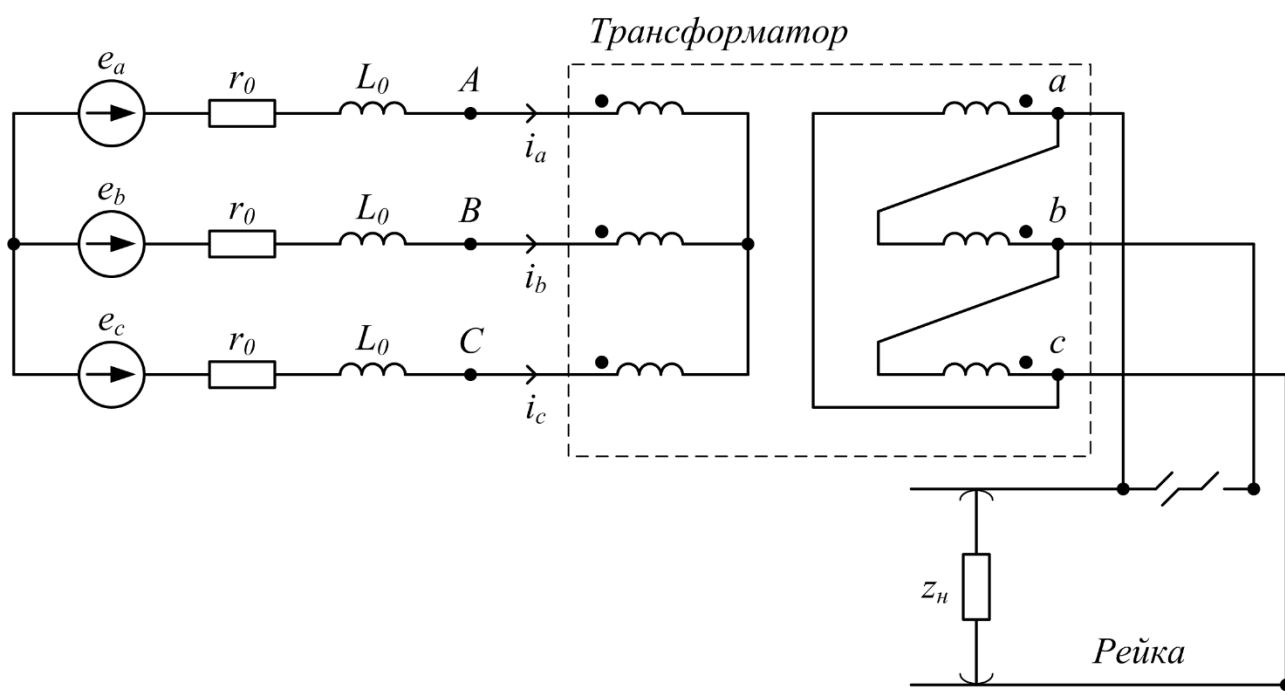


Рис. 1. Електротехнічна система живлення залізниці змінного струму з тяговим трансформатором

Трифазна високовольтна мережа живлення зображена як джерела напруги e_a , e_b , e_c , що генерують синусоїдальні напруги з частотою 50 Гц, амплітудами 89,915 кВ і зсунуті відповідно на 0, 240 і 120 ел. град. Це забезпечує лінійну напругу мережі величиною 110 кВ. Комплексний опір лінії електропередачі модельований активним опором 1 Ом та індуктивністю 0,01 Гн. Використані силовий трансформатор вважаємо тяговий трансформатор типу ТДНД 25000/110. Еквівалентом навантаження є комплексний опір Z_n .

Розглянемо можливість створення власної моделі силового трансформатора за спрощеною методикою визначення параметрів цієї моделі. Будемо виходити зі стандартних даних, які прописані в паспорті силового трансформатора:

S_n – номінальна потужність на три фази;

U_{1n} – номінальна напруга первинної обмотки;

U_{2n} – номінальна напруга вторинної обмотки;

u_k – відносне значення напруги короткого замикання;

P_k – потужність втрат за короткого замикання;

i_x – відносне значення струму неробочого ходу;

P_x – потужність втрат неробочого ходу.

Еквівалентну заступну схему, яку використовують як візуальну модель у системі SimPowerSystem математичного пакета MATLAB, наведено на рис. 2.

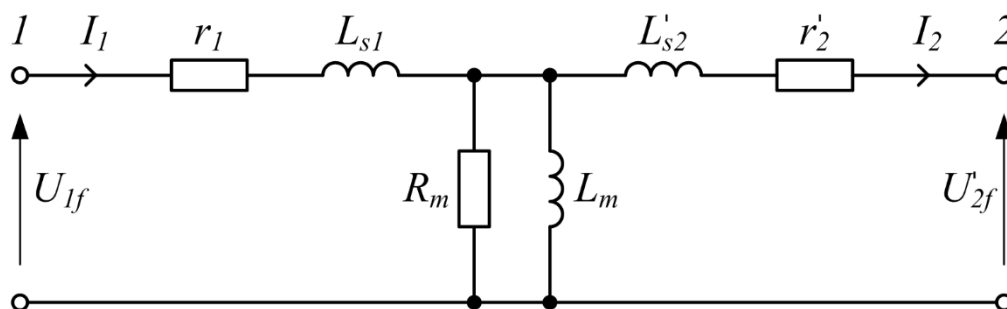


Рис. 2. Заступна схема моделі трансформатора в системі SimPowerSystem

У цій схемі активні опори r_1 і r_2 обмоток трансформатора зумовлюють наявність активних потужностей втрат короткого замикання P_k . Активний резистор R_m зумовлює наявність активної потужності втрат неробочого ходу P_x .

Зважатимемо, що потужності P_k і P_x у реальному силовому трансформаторі набагато менші відносно повної потужності S_n трансформатора і активної складової цієї

потужності. Тому раціонально на першому етапі знехтувати цими потужностями і впливом активних резисторів заступної схеми трансформатора. Опори r_1 і r_2 обмоток у цьому випадку слід замкнути, а резистор R_m – розімкнути. Такі припущення призводять до спрощеної заступної схеми, яка складається з індуктивностей розсіювання первинної і вторинної обмоток L_{s1} і L_{s2} . Оскільки коефіцієнт зв'язку обмоток у потужному

трансформаторі близький до одиничного значення, то, як показано в роботі [7], індуктивність розсіювання первинної обмотки L_{s1} і приведені значення індуктивності розсіювання вторинної обмотки $L'_{s2} = L_{s2}/n_{21}^2$ (де n_{21} – коефіцієнт трансформації, $n_{21} = U_{2H}/U_{1H}$) мають однакові значення: $L_{s1} = L'_{s2}$. Індуктивність намагнічування L_m є тією частиною магнітного потоку, яка забезпечує передавання електричної енергії на вторинну обмотку. Сума $L_{s1} + L_m$, як видно з заступної схеми, являтиме собою індуктивність первинної обмотки на неробочому ході. Звернімося за прийнятих припущень до розрахунку параметрів заступної схеми моделі силового трансформатора.

Ефективне значення номінального струму первинної обмотки

$$I_{1H} = \frac{S_H}{\sqrt{3} \cdot U_H}. \quad (1)$$

Напруга короткого замикання

$$U_\kappa = \frac{u_\kappa \cdot U_{1H}}{\sqrt{3}}. \quad (2)$$

Нехтуючи впливом індуктивності намагнічування на режим короткого замикання, знайдемо опір сумарної індуктивності розсіювання обмоток, поділивши фазну напругу короткого замикання на номінальний струм первинної обмотки:

$$x_s = \frac{u_\kappa \cdot U_{1H}}{\sqrt{3}} \cdot \frac{\sqrt{3} \cdot U_{1H}}{S_H} = \frac{u_\kappa \cdot U_{1H}^2}{S_H}. \quad (3)$$

Опір індуктивностей розсіювання обмоток

$$x_{s1} = x'_{s2} = \frac{x_s}{2} = \frac{u_\kappa \cdot U_{1H}^2}{2 \cdot S_H}. \quad (4)$$

Струм неробочого ходу в первинній обмотці

$$I_{1x} = \frac{i_x \cdot S_H}{\sqrt{3} \cdot U_{1H}}. \quad (5)$$

Індуктивний опір первинної обмотки обчислюють за режимом неробочого ходу:

$$x_{L1} = \frac{U_H}{\sqrt{3}} \cdot \frac{\sqrt{3} \cdot U_{1H}}{i_x \cdot S_H} = \frac{U_{1H}^2}{i_x \cdot S_H}. \quad (6)$$

Опір індуктивності намагнічування обчислюють як різницю між опором первинної обмотки і опором індуктивності розсіювання первинної обмотки:

$$x_m = x_{L1} - x_{s1}. \quad (7)$$

Коефіцієнт зв'язку обмоток трансформатора

$$k_{12} = \frac{x_m}{x_{L1}} = \frac{x_{L1} - x_{s1}}{x_{L1}} = 1 - \frac{x_{s1}}{x_{L1}}. \quad (8)$$

Ураховуючи попередні дві формули, отримаємо

$$k_{12} = 1 - \frac{u_\kappa \cdot U_{1H}^2}{2 \cdot S_H} \cdot \frac{i_x \cdot S_H}{U_{1H}^2}. \quad (9)$$

Скоротивши вираз (9) на S_H і U_{1H}^2 , отримаємо

$$k_{12} = 1 - \frac{u_\kappa \cdot i_x}{2}. \quad (10)$$

Отримана формула є новою в теорії трансформатора і дає змогу одразу визначити важливий параметр – коефіцієнт

зв'язку обмоток трансформатора, користуючись безпосередньо тільки двома значеннями параметрів із паспортних даних, тобто відносним значенням напруги короткого замикання u_k і відносним значенням струму неробочого ходу i_x . Визначимо добуток цих величин як

$$\gamma = u_k \cdot i_x. \quad (11)$$

Цей показник певною мірою характеризує якість трансформатора, у зв'язку з чим назвемо його фактором якості трансформатора. Чим менша ця величина, тим ближче коефіцієнт зв'язку до одиночного значення, і тим більш якісним є трансформатор.

Використовуючи формулу (10), можна легко визначити коефіцієнт зв'язку котушок. Це у свою чергу дає змогу побудувати модель із двома магнітно зв'язаними індуктивностями L_1 і L_2 на основі принципово нового алгоритму визначення топології моделі та її параметрів. Зв'язок котушок, пов'язаних загальним магнітним потоком, зазвичай визначений або коефіцієнтом зв'язку k_{12} , або так званою взаємною індуктивністю M_{12} .

Індуктивність L_1 первинної обмотки далі може бути визначена з виразу (6) для її індуктивного опору:

$$L_1 = \frac{x_{L1}}{\omega} = \frac{U_{1H}^2}{\omega \cdot i_x \cdot S_H}, \quad (12)$$

де ω – кругова частота живильної напруги з частотою 50 Гц, $\omega = 100 \cdot \pi$.

Позначимо коефіцієнт трансформації через відношення кількості витків w_2 вторинної обмотки до кількості витків первинної обмотки w_1 :

$$n_{21} = \frac{w_2}{w_1}. \quad (13)$$

Цей параметр у принципі є конструктивним. На практиці його часто заміняють відношенням напруг обмоток:

$$n_{21} = \frac{U_{2H}}{U_{1H}}. \quad (14)$$

Оскільки індуктивності обмоток пропорційні квадратам кількостей їхніх витків, то справедливе співвідношення

$$\frac{L_2}{L_1} = \frac{w_2^2}{w_1^2} = n_{21}^2. \quad (15)$$

Звідси індуктивність вторинної обмотки

$$L_2 = n_{21}^2 \cdot L_1 = \frac{n_{21}^2 \cdot U_{1H}^2}{\omega \cdot i_x \cdot S_H} = \frac{U_{2H}^2}{\omega \cdot i_x \cdot S_H}. \quad (16)$$

У деяких комп'ютерних системах застосовано модель магнітно зв'язаних котушок індуктивностей із використанням

взаємної індуктивності M_{12} . Її визначають за формулою

$$\begin{aligned} M_{12} &= k_{21} \cdot \sqrt{L_1 \cdot L_2} = k_{12} \cdot \sqrt{L_1 \cdot n_{21}^2 \cdot L_1} = k_{12} \cdot n_{21} \cdot L_1 = \left(1 - \frac{u_k \cdot i_x}{2}\right) \cdot \frac{U_{2H}}{U_{1H}} \cdot \frac{U_{1H}^2}{\omega \cdot i_x \cdot S_H} = \\ &= \left(1 - \frac{u_k \cdot i_x}{2}\right) \cdot \frac{U_{1H} \cdot U_{2H}}{\omega \cdot i_x \cdot S_H}. \end{aligned} \quad (17)$$

Для врахування впливу активних опорів обмоток слід скористатися значеннями активної потужності втрат у разі короткого замикання P_k . Втрати на одну фазу трансформатора складуть величину

$$P_{\kappa 1} = \frac{P_k}{3}. \quad (18)$$

Ця потужність порівну розподілена між первинною і вторинною обмотками.

Номинальне ефективне значення струму первинної обмотки I_{1H} визначають за формулою (3). Тоді активний опір первинної обмотки складе величину

$$r_1 = \frac{P_k}{2 \cdot 3} \cdot \frac{(\sqrt{3} \cdot U_{1H})^2}{S_H^2} = \frac{P_k \cdot U_{1H}^2}{2 \cdot S_H^2}. \quad (19)$$

Для вторинної обмотки приведений опір $r'_2 = r_2 / n_{21}^2$ дорівнює опору r_1 первинної обмотки, і тому опір вторинної обмотки розраховують за формулою

$$r_2 = n_{21}^2 \cdot r_1 = \frac{n_{21}^2 \cdot P_k \cdot U_{1H}^2}{2 \cdot S_H^2} = \frac{P_k \cdot U_{2H}^2}{2 \cdot S_H^2}. \quad (20)$$

Визначення активних опорів r_1 та r_2 обмоток трансформатора дає змогу врахувати їхній вплив у заступній еквівалентній схемі за рахунок увімкнення цих резисторів послідовно з відповідними індуктивностями обмоток. Слід зазначити, що активні опори обмоток фактично також є конструктивними параметрами. Їх визначають залежно від довжини проводів, площі їхніх перерізів і питомого опору

матеріалу проводу. У деяких каталогах дані про ці опори наведено безпосередньо у відповідних таблицях. Крім того, ці опори можуть бути навіть безпосередньо визначені на практиці вимірювальними приладами.

Втрати в сталі трансформатора, тобто втрати на перемагнічування осердя, будемо враховувати в нашій моделі резистором R , який ввімкнено безпосередньо до затискачів первинної обмотки (рис. 3).

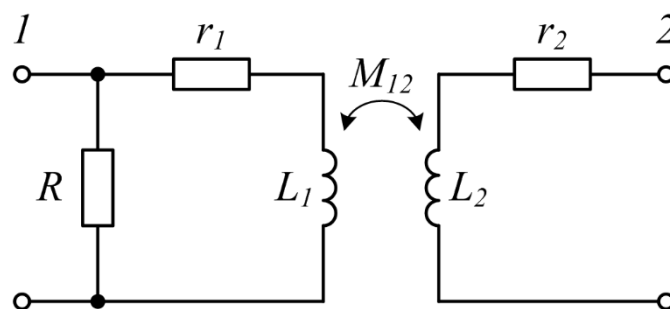


Рис. 3. Заступна схема трансформатора з урахуванням втрат у міді і сталі

Активна потужність втрат неробочого ходу, що припадає на одну фазу,

$$P_{x1} = \frac{P_x}{3}. \quad (21)$$

Опір резистора R , який моделює втрати в осерді на перемагнічування,

$$R = \frac{(U_{1H}/\sqrt{3})^2}{P_x/3} = \frac{U_{1H}^2}{P_x}. \quad (22)$$

Отже, алгоритм розрахунків параметрів моделі трансформатора на основі використання SimPowerSystem-блока взаємно зв'язаних індуктивностей в таким:

1) за формулою (10) визначаємо коефіцієнт зв'язку індуктивностей обмоток трансформатора;

2) за формулою (12) визначаємо індуктивність первинної обмотки;

3) за формулою (16) визначаємо індуктивність вторинної обмотки;

4) взаємну індуктивність обмоток визначаємо за формулою (17);

5) за формулами (19) і (20) визначаємо активні опори первинної і вторинної обмоток;

6) за формулою (22) визначаємо опір резистора R , моделюючи втрати в сталі.

За описаним алгоритмом складено програму мовою пакета MATLAB для розрахунку параметрів моделі трансформатора на основі блока взаємно зв'язаних індуктивностей. Запуск цієї програми генерує в робочому просторі відповідні значення змінних для параметрів моделі. Ідентифікаційні змінні зручно безпосередньо вписувати у відповідні поля

вікна властивостей блока взаємно зв'язаних індуктивностей.

За запропонованим алгоритмом і програмою було розраховано параметри моделі за топологією, зображеною на рис. 3, для трансформатора ТДНД 25000/110 системи енергопостачання залізниці змінного струму (рис. 1). Паспортні дані трансформатора такі: $S_H = 25$ МВА; $U_{1H} = 110$ кВ; $U_{2H} = 27,5$ кВ; $P_K = 120$ кВт; $P_x = 30$ кВт; $u_K = 0,105$; $i_x = 0,007$.

Параметри моделі на основі взаємно зв'язаних індуктивностей, розраховані за допомогою описаного алгоритму, мають такі значення: $k_{12} = 0,9996325$; $L_1 = 220,088$ Гн; $L_2 = 13,755$ Гн; $M_{12} = 55,0019$ Гн; $r_1 = 1,1616$ Ом; $r_2 = 0,0726$ Ом; $R = 403333,3$ Ом.

Для перевірки адекватності і точності запропонованої моделі трансформатора було відтворено досліди неробочого ходу і короткого замикання трансформатора. Контроль споживаних активних потужностей в обох випадках показав їхню повну збіжність із потужностями втрат, що визначені в паспортних даних трансформатора ТДНД 25000/110. Візуальну модель системи електропостачання зображено на рис. 4.

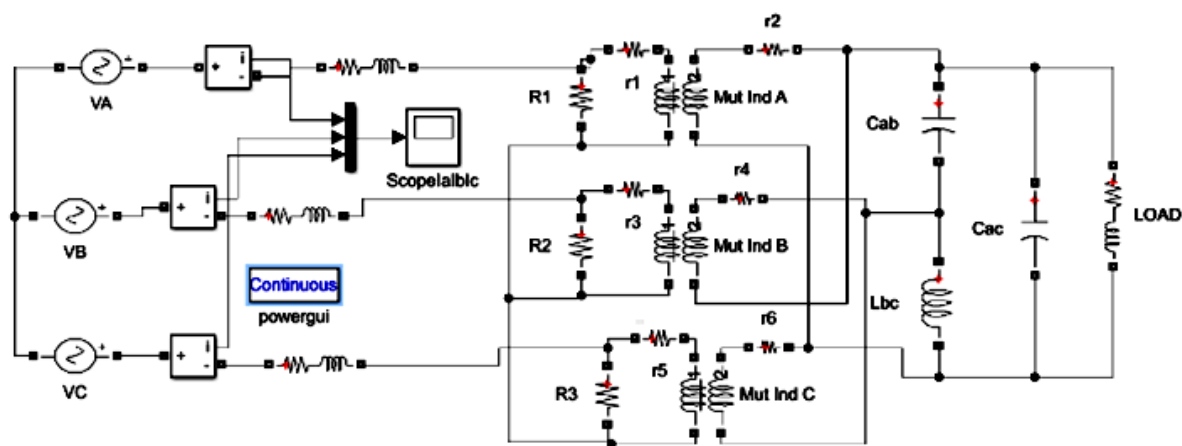


Рис. 4. Візуальна модель системи живлення залізниці

У цій моделі трифазну високовольтну мережу живлення подано як джерела напруги VA, VB, VC, що генерують синусоїдальні напруги з частотою 50 Гц, амплітудами 89,915 кВ і зсунуті відповідно на 0, 240 і 120 ел.град. Це забезпечує лінійну напругу мережі величиною 110 кВ. Комплексний опір лінії електропередачі модельований активним опором 1 Ом та індуктивністю 0,01 Гн. Сам трансформатор подано як загальноприйнятий еквівалент із трьох однофазних трансформаторів. Модель кожного з них відповідає топології моделі,

поданої на рис. 5, параметри якої визначено за описаною методикою і зазначено вище. Первинні обмотки з'єднані зіркою, а вторинні – трикутником, як це і прийнято на практиці в системах електропостачання залізниць змінного струму. Комплексне навантаження LOAD має опір $(121 + 90,75j)$ Ом і моделює навантаження від одного поїзда. Воно підключено до одного боку вторинного трикутника і утворює несиметричний режим споживання електроенергії. Часові діаграми первинних струмів трансформатора наведено на рис. 5.

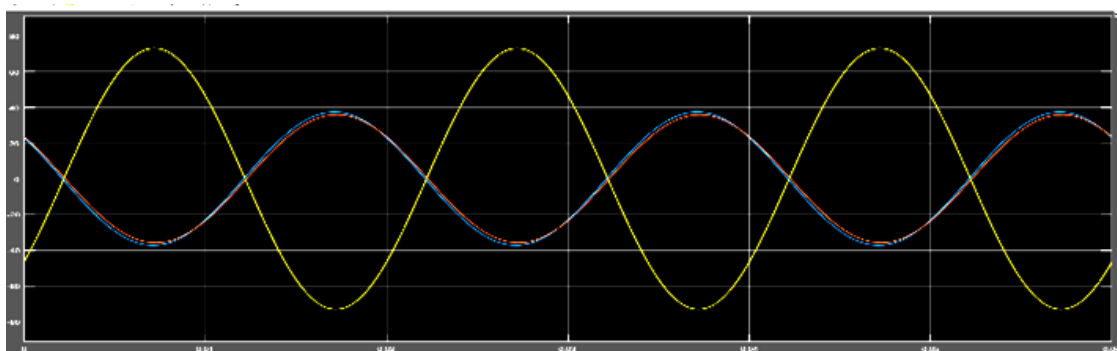


Рис. 5. Діаграми фазних струмів без симетрування

Амплітуда струму, споживаного фазою A, удвічі перевищує амплітуди струмів у двох інших фазах і досягає значення майже 80 А. Результатом прояву несиметричного режиму споживання електроенергії від живильної мережі є таке вкрай негативне явище, як зсув струму у фазі B, який сприймають як генерацію електроенергії (рис. 6). Це призводить до неадекватної роботи лічильників електроенергії, що задіяні в системі для контролю електроспоживання.

Для симетрування споживаних струмів на моделі застосовано додатково увімкнені реактивні елементи, які підключені на боці навантаження на лінійні напруги вторинної сторони трансформатора. Величини параметрів і тип елементів були визначені із застосуванням класичної Т-подібної моделі трансформатора ТДНД 25000/110.

Параметри класичної моделі лінійного трансформатора із заступною схемою, наведеною на рис. 1, мають такі значення: $r_1 = 1,1616$ Ом; $L_{s1} = 0,08079$ Гн; $r_2 = 0,0726$ Ом; $L_{s2} = 0,0050498$ Гн; $R_m = 403078,8$ Ом; $L_m = 223,32$ Гн. Для цього випадку методом пошукової оптимізації [8] було виявлено типи елементів симетруючого пристрою і величини їхніх параметрів: $C_{ab} = 1,0031113 \cdot 10^{-5}$ Ф; $L_{bc} = 1,0767185$ Гн; $C_{ca} = 1,2937435 \cdot 10^{-5}$ Ф. Ці ж параметри реактивних елементів були перенесені на модель електротехнічної системи (електропостачання, що застосовує модель трансформатора, складену з використанням запропонованої методики вираховування

параметрів моделі трансформатора). Часові діаграми струмів, споживаних від джерел з

увімкненням симетруючих елементів, наведено на рис. 7.

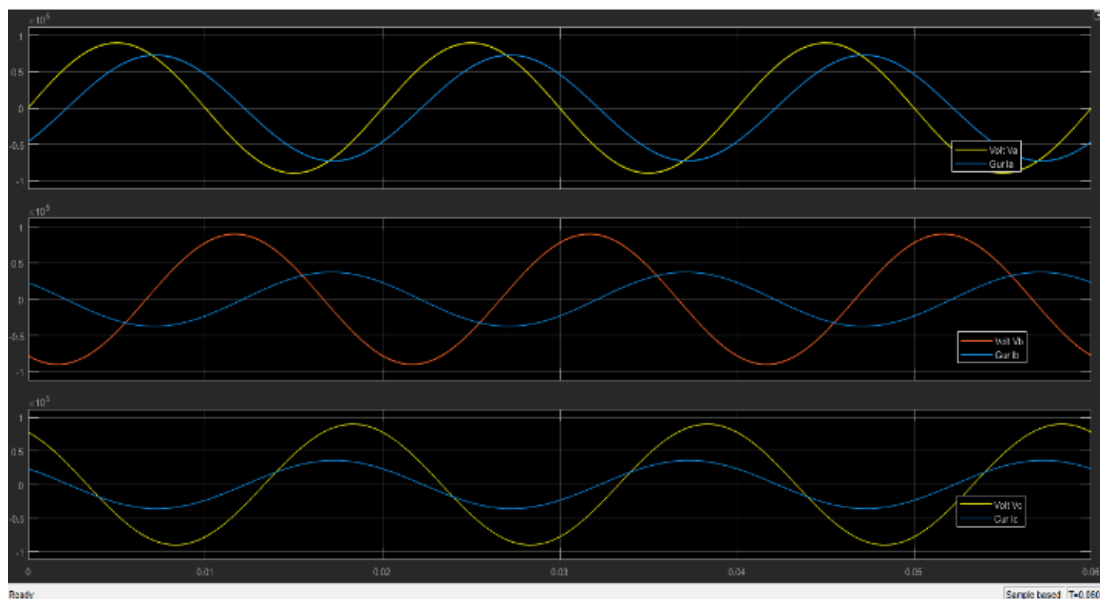


Рис. 6. Зсуви фазних струмів відносно фазних напруг без симетрування

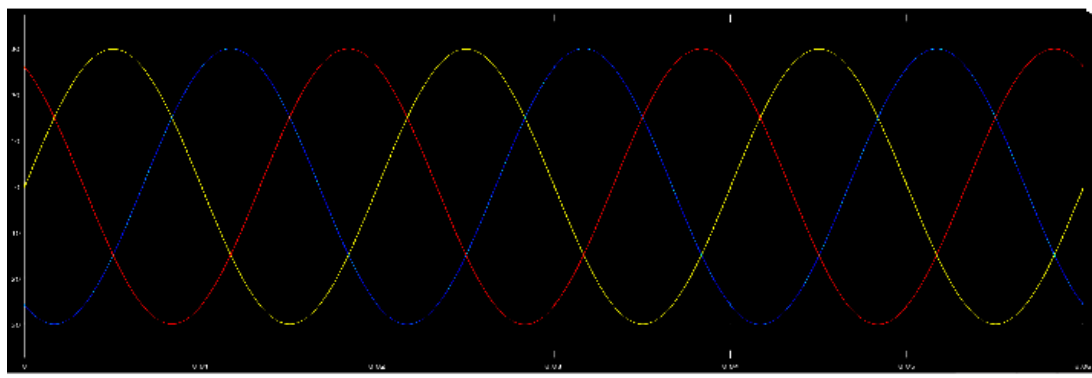


Рис. 7. Діаграми фазних струмів із симетруванням

Із часових діаграм видно, що із застосуванням запропонованої моделі трансформатора в системі електропостачання досягнуто повну компенсацію реактивної потужності, як і в моделі з класичною Т-подібною заступною схемою трансформатора. При цьому компенсована не тільки реактивна потужність самого навантаження, а й

реактивні потужності, обумовлені лініями електропостачання і самого трансформатора. Амплітуди струмів, споживані від джерел, однакові і складають величини порядку 30 А, що значно менше, ніж у варіанті несиметричного режиму. Крім того, струми за фазою співпадають із фазними напругами (рис. 8).

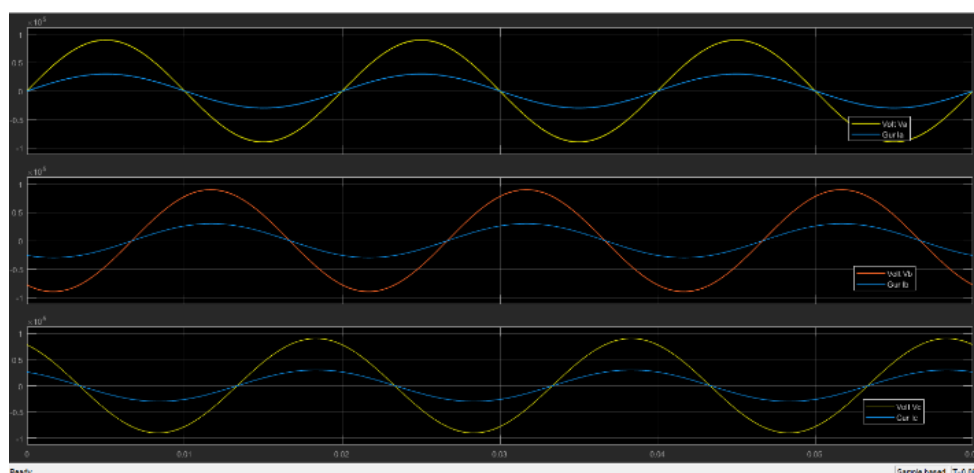


Рис. 8. Збіг фазних струмів із фазними напругами в разі симетрування

Це означає, що від джерел відбирають лише активну потужність, тобто за повної компенсації реактивної потужності в електротехнічній системі досягають одиничного значення коефіцієнта потужності.

Висновки і рекомендації щодо подальшого використання. На підставі проведених досліджень можна зробити такі висновки:

– на основі аналізу співвідношень між струмами, напругами і потужностями трансформатора виведено достатньо простий математичний вираз, що дає змогу одразу ж за паспортними даними знайти коефіцієнт зв'язку первинної і вторинної обмоток трансформатора. Для цього достатньо скористатися значеннями лише двох паспортних даних, а саме відносними значеннями напруги короткого замикання і струму неробочого ходу. У результаті значно спрощено знаходження решти параметрів заступних схем трансформатора, необхідних для визначення параметрів моделей трансформатора для будь-яких комп'ютерних програм моделювання процесів в електротехнічних системах, що містять трансформатори. Запропоновано

конкретні алгоритми розрахунків цих параметрів на основі викладеної методики;

– розглянуто варіанти використання моделей трансформатора на основі взаємно пов'язаних індуктивностей. Порівняння запропонованих моделей трансформатора з класичними моделями в системі MATLAB доводить високий ступінь адекватності і точності моделей трансформатора, топологію і параметри яких визначено за допомогою запропонованої методики на базі формули для швидкого визначення коефіцієнта зв'язку котушок трансформатора лише за двома вказаними паспортними даними;

– запропоновану модель трансформатора використано у складі моделі електропостачання залізниці змінного струму в режимах несиметричного споживання електроенергії і з увімкненням симетруючих реактивних елементів. Результати моделювання електромагнітних процесів у системі електропостачання залізниці змінного струму з силовим трансформатором показали високу точність запропонованої моделі і можливість її застосування для аналізу електромагнітних процесів в електротехнічних системах із силовими трансформаторами.

Список використаних джерел

1. Pentegov I. V., Rymar S. V., Volkov I. V. Relation between parameters of electromagnetic and schematic circuits and equivalent circuits of double-winding transformers. *Electrical engineering and Electromechanics*. 2006. No. 3. P. 67–79.
2. Lou J., Bhobe A., Shu Y., Yu J. Analytical calculation of transformer parameters by S-parameters. *2018 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility and 2018 IEEE Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC/APEMC)*. 2018. P. 1310–1313. DOI: 10.1109/ISEMC.2018.8394001.
3. Yarymbash D., Kotsur M., Yarymbash S., Divchuk T. Electromagnetic parameters determination of power transformers. *2018 IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*. 2018. P. 70–75. DOI: 10.1109/IEPS.2018.8559573.
4. Zhang Z., Kang N., Mousavi M. J. Real-time transformer parameter estimation using terminal measurements. *2015 IEEE Power & Energy Society General Meeting*. 2015. P. 1–5. DOI: 10.1109/PESGM.2015.7285958.
5. Bloech M., Rashid M. H. PSpice modeling of three-phase transformer. *2007 39th North American Power Symposium*. 2007. P. 76–79. DOI: 10.1109/NAPS.2007.4402289.
6. Neumayer M., Bretterklieber T., Zangl H. Bayesian estimation of electrical transformer parameters. *2014 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC) Proceedings*. 2014. P. 514–518. DOI: 10.1109/I2MTC.2014.6860798.
7. Ягуп В. Г., Ягуп К. В. Дослідження магнітно-зв'язаних індуктивностей за допомогою сигнальних графів. *Технічна електродинаміка*. 2019. № 5. С. 21–26. DOI: 10.15407/techned2019.05.021.
8. Ягуп В. Г., Ягуп К. В. Дослідження режимів компенсації реактивної потужності в системі електропостачання з каскадом трансформаторів. *Технічна електродинаміка*. 2025. № 1. С. 82–88. DOI: 10.15407/techned2025.01.082.
9. Ягуп В. Г., Ягуп К. В. Дослідження режимів компенсації реактивної потужності в узагальненій системі електропостачання. *Технічна електродинаміка*. 2022. № 6. С. 63–71. DOI: 10.15407/techned2022.06.063.
10. Muthyala U. R., Dhabale A. Analysis of single phase transformer excited by superposition of square and sine wave. *2018 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES)*. 2018. P. 1–6. DOI: 10.1109/PEDES.2018.8707866.
11. Youssef H., Hassan M. H., Kamel S., Elsayed S. K. Parameter estimation of single phase transformer using jellyfish search optimizer algorithm. *2021 IEEE International Conference on Automation/XXIV Congress of the Chilean Association of Automatic Control (ICA-ACCA)*. 2021. P. 1–4. DOI: 10.1109/ICAACCA51523.2021.9465279.
12. Patel S., Derwal A., Doshi S., Rajendra S. K. Utilising genetic algorithm and driving point impedance data to synthesize high frequency circuit model of power transformer winding. *2018 5th International Conference on Signal Processing and Integrated Networks (SPIN)*. 2018. P. 407–412, DOI: 10.1109/SPIN.2018.8474058.
13. Dirik H., Gezegin C., Özdemir M. A novel parameter identification method for single-phase transformers by using real-time data. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2014. Vol. 29, Iss. 3. P. 1074–1082. DOI: 10.1109/TPWRD.2013.2284243.
14. Abu-Siada A., Mosaad M. I., Kim D., El-Naggar M. F. Estimating power transformer high frequency model parameters using frequency response analysis. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2020. Vol. 35, Iss. 3. P. 1267–1277. DOI: 10.1109/TPWRD.2019.2938020.
15. Liu Y., Pei X. Improved identification method for equivalent network parameters of transformer windings based on driving point admittance. *IEEE Access*. 2025. Vol. 13. P. 10062–10069. DOI: 10.1109/ACCESS.2025.3528886.

16. Rao T. M., Pramanik S., Mitra S. On analytical estimation of inductances in equivalent ladder network model of a homogeneous transformer winding using FRA data. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2025. Vol. 40, Iss. 1. P. 472–483. DOI: 10.1109/TPWRD.2024.3504961.

Ягуп Валерій Григорович, доктор технічних наук, професор, професор кафедри комп'ютерних наук і інформаційних систем, Харківський національний автомобільно-дорожній університет.

E-mail: yagup.walery@gmail.com. ORCID ID: 0000-0002-7019-3499.

Ягуп Катерина Валеріївна, доктор технічних наук, професор, професор кафедри програмної інженерії та інтелектуальних технологій управління, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». E-mail: kateryna.yagup@khpi.edu.ua. ORCID ID: 0000-0002-9305-8169.

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.

Yagup Valerii Hryhorovych, Doctor of Science (Tech.), Professor, Professor of Computer Science and Information Systems Department, Kharkiv National Automobile and Highway University. E-mail: yagup.walery@gmail.com. ORCID ID: 0000-0002-7019-3499.

Yagup Kateryna Valeriyivna, Doctor of Science (Tech.), Professor, Professor of Software Engineering and Management Intelligent Technologies Department, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute». E-mail: kateryna.yagup@khpi.edu.ua. ORCID ID: 0000-0002-9305-8169.

Nerubatskyi Volodymyr Pavlovych, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Electrical Energetics, Electrical Engineering and Electromechanics Department, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: +38 (095) 045-78-01. E-mail: NVP9@i.ua. ORCID ID: 0000-0002-4309-601X.

Статтю прийнято 22.08.2025 р.

УДК 625.42:656.25

РОЗРОБЛЕННЯ СКЛАДНОЇ СИСТЕМИ ОБРОБКИ ІНФОРМАЦІЇ ДЛЯ ЕЛЕКТРОДЕПО МЕТРОПОЛІТЕНУ З ВИКОРИСТАННЯМ ОБ'ЄКТНО- ОРІЄНТОВАНОГО АНАЛІЗУ

Кандидати техн. наук А. А. Прилипко, С. В. Індик, PhD О. В. Щебликіна,
канд. техн. наук І. М. Сіроклін

DEVELOPMENT OF A COMPLEX INFORMATION PROCESSING SYSTEM FOR METRO ELECTRODEPOSITION USING OBJECT-ORIENTED ANALYSIS

Candidate of Technical Sciences A. A. Prylypko, Candidate of Technical Sciences S. V. Indyk,
PhD O. V. Shchebykina, Candidate of Technical Sciences I. M. Siroklyn

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.213.2025.341904>

Анотація. У статті розглянуто проблему розроблення складних систем обробки інформації для електродепо метрополітену з використанням сучасних методів залізничної автоматики та телемеханіки. Запропоновано підхід для створення системи обробки інформації на основі об'єктно-орієнтованого аналізу, який дає змогу структурувати інформаційні потоки, оптимізувати взаємодію між апаратними і програмними компонентами, а також підвищити надійність системи. Розроблена структурна схема системи забезпечує автоматизацію управління рухом електропоїздів, ідентифікацію вагонів і діагностику обладнання.

Ключові слова: електродепо, метрополітен, об'єктно-орієнтований аналіз, інформаційна система, автоматизація, рухомий склад, діагностика, структурна схема, електронний документообіг.

Abstract. This paper addresses the critical issue of developing complex information processing systems for metro electric depots using modern methods of railway automation and telemechanics. The study proposes a structured approach based on object-oriented analysis, which provides a robust framework for modeling and optimizing the intricate operational environment of a metro depot. The core of this methodology lies in defining key system components as interconnected objects, thereby facilitating a clear decomposition of the problem into manageable parts. The research develops formal information models, including a state machine for rolling stock, to represent wagon movements and transitions between states such as at rest, under inspection, or under repair. This approach is crucial for overcoming terminological ambiguities and ensuring a consistent understanding of operational processes.

A multi-level, component-hierarchical structural diagram of the system is presented, which is designed to integrate various hardware and software elements. This architecture is composed of a field level with sensors and diagnostic complexes, a data collection and processing level with processors and controllers, a central information processing hub with servers and data analysis software, and a user interface level for seamless human-system interaction. This design is aligned with modern SCADA principles, ensuring modularity, scalability, and remote management capabilities.

Furthermore, the article formulates fundamental principles for automating data collection and processing. This includes a shift from traditional scheduled maintenance to a more efficient condition-based monitoring approach, enabling maintenance and repairs to be performed only when necessary, based on real-time diagnostic data. The system incorporates automated wagon identification technologies, such as RFID and video recognition, for accurate tracking of rolling stock within the depot. It also advocates for the implementation of electronic document management to optimize workflows, reduce paperwork, and enhance process transparency. The ultimate goal is to minimize human error and the impact of the human factor, which is a major source of risk in railway operations, thereby significantly improving the safety, reliability, and cost-effectiveness of metro electric depot management.

Keywords: electric depot, metro, object-oriented analysis, information system, automation, rolling stock, diagnostics, structural diagram, electronic document management.

Вступ. Сучасні мегаполіси значною мірою залежать від ефективності та безпеки функціонування систем метрополітену. Електродепо, як операційний хребет будь-якої системи метрополітену, відіграє головну роль у забезпеченні технічного обслуговування, ремонту і логістичної підтримки рухомого складу. Складність цих операцій, що охоплюють різні активи, графіки, персонал і протоколи безпеки, потребує впровадження високотехнологічних систем обробки інформації.

Розроблення складної системи обробки інформації для електродепо

метрополітену створює унікальні виклики, які включають управління гетерогенними даними, оптимізацію розподілу ресурсів, забезпечення моніторингу в реальному часі та інтеграцію різних операційних процесів. Традиційні, монолітні архітектури систем часто неефективні в умовах динамічного та взаємопов'язаного характеру роботи депо. Ефективність, безпека та економічна доцільність експлуатації метрополітену безпосередньо залежать від продуктивності його депо. Отже, розроблення надійних та інтелектуально спроектованих інформаційних систем є першочерговим

завданням для модернізації та оптимізації цих критично важливих об'єктів інфраструктури.

Системи управління рухом поїздів спрямовані на підвищення ефективності експлуатації поїздів через автоматизацію, зосереджуючись на безпеці, зниженні витрат і функціональності. Аналогічно, для систем бронювання квитків, як описано в роботі [1], основними вимогами є масштабованість, надійність і безпека. Хоча ці приклади стосуються ширших транспортних систем, спільним для них є принцип, що складні транспортні системи потребують надійних, добре спроектованих інформаційних систем для досягнення своїх операційних цілей. Для електродепо метрополітену це безпосередньо означає забезпечення швидкого обороту рухомого складу, мінімізацію простоїв та оптимізацію графіків технічного обслуговування. Усі ці аспекти критично залежать від ефективності обробки інформації. Недосконала інформаційна система в електродепо може призвести до значних операційних неефективностей, збільшення витрат на обслуговування та потенційних ризиків безпеки. Це підкреслює нагальну потребу у структурованому та принциповому підході щодо розроблення систем.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Хоча загальні залізничні системи (бронювання, управління рухом, управління активами) і логістичні/складські системи демонструють застосовність об'єктно-орієнтованого аналізу (ООА) і UML, жодна з них не вирішує комплексно унікальні операційні та інформаційні потреби електродепо метрополітену. Існує значна невідповідність у фокусі досліджень. Системи бронювання залізничних квитків [1] зосереджені на пасажирських послугах і логіці бронювання, а не на управлінні фізичними активами чи технічному обслуговуванні. Системи управління рухом поїздів зосереджені на русі поїздів у реальному часі та високорівневому веденні журналів технічного обслуговування, але не

на детальних процесах MRO (Maintenance, Repair, Overhaul) усередині депо [2]. Інтеграція BIM/GIS для управління залізничними активами [3] насамперед стосується інфраструктурних активів і стикається з проблемами об'єктно-орієнтованої парадигми в управлінні активами без специфічного фокусу на життєвому циклі MRO рухомого складу. Управління даними на основі онтологій [4] пропонує потужні рішення для гетерогенності даних, але не було застосовано комплексно для моделювання всього спектра даних електродепо метрополітену (структурованих, напівструктурованих, неструктурованих) і процесів. Загальні системи управління складом/логістикою [5] не мають спеціалізованих знань предметної сфери та складності, пов'язаної з управлінням високоцінним, критично важливим для безпеки рухомим складом метрополітену та його компонентами. Щодо використання сучасних методів системної інженерії для розроблення складного програмно-апаратного комплексу, то розглянуто застосування ООА в загальному вигляді [6].

Визначення мети та завдання дослідження. Метою дослідження є розроблення комплексної системи обробки інформації (COI) для електродепо метрополітену, яка б використовувала сучасні методи залізничної автоматики і телемеханіки. Ця система має на меті оптимізувати основні операційні процеси, підвищити надійність і безпеку експлуатації рухомого складу, а також забезпечити ефективне управління ресурсами депо, мінімізуючи вплив людського фактора.

Основна частина дослідження. Традиційні підходи щодо аналізу, що зосереджені на функціях і послідовності дій, виявляються недостатніми для моделювання такої складної та взаємозалежної системи, як електродепо. Вони не можуть повною мірою відобразити складні взаємодії між фізичними об'єктами

(поїздами, обладнанням) і абстрактними сутностями (процесами, інформацією).

Об'єктно-орієнтований аналіз, як частина об'єктно-орієнтованої парадигми (ООП), пропонує методологію, що дає змогу моделювати програмне забезпечення навколо даних або «об'єктів», а не навколо логіки та функцій [7]. Такий підхід ідеальний для опису систем, що складаються з незалежних, але взаємодіючих компонентів, із декомпозицією проблеми на менші, керовані частини, що підвищує модульність, покращує обслуговування програмного забезпечення та знижує витрати на розроблення. Ефективність ООА підтверджена численними дослідженнями в галузі транспортних систем, де він застосований для імітаційного моделювання міського дорожнього руху та управління вантажними перевезеннями.

Однією з основних переваг застосування ООА до предметної сфери електродепо є можливість моделювати еволюцію технологій. Історично технічне обслуговування і ремонт базовані на планово-попереджувальній системі (ППР), за якої роботи проводили за жорстким графіком або після досягнення певного пробігу, незалежно від фактичного стану обладнання. Однак сучасні системи діагностики та моніторингу, що використовують датчики, дають змогу переходити до моделі «обслуговування за потребою». Ця нова парадигма передбачає, що рішення про ремонт ухвалюють на основі поточного технічного стану вузлів, виявленого системою. ООА є ідеальним інструментом для моделювання такої гібридної системи, оскільки він дає змогу об'єктам динамічно змінювати свій стан і генерувати події, що є тригером для подальших процесів, а не просто дотримуватися заздалегідь визначеного розкладу. Це трансформує підхід із реактивного на проактивний, значно підвищуючи ефективність і знижуючи витрати.

Об'єктно-орієнтований аналіз передбачає послідовну ітеративну роботу для виділення головних сутностей і моделювання їхньої взаємодії. Перший етап – це аналіз вимог, який у термінах ООА називають «аналізом вимог», він полягає у визначенні та формулюванні економічних процесів, що відбуваються на підприємстві. Це дає змогу чітко окреслити межі системи та її функціональні завдання.

Наступний етап – декомпозиція проблеми на окремі поняття або об'єкти. Це найважливіший крок для створення концептуальної моделі предметної сфери. Згідно з методологією, краще деталізувати модель, ніж недовизначити її, і в разі сумнівів щодо того, чи є сутність окремим поняттям чи лише атрибутом, слід створити окреме поняття.

Одним з ефективних підходів щодо ідентифікації об'єктів і їхніх функцій є «метод неформального опису», також відомий як «метод іменників і дієслів». У цьому підході іменники в описі предметної сфери розглянуто як кандидати для утворення класів, а дієслова – кандидати в операції (методи) над цими класами.

Виходячи з аналізу предметної сфери електродепо [8], можна виділити такі основні елементи:

– іменники (кандидати на класи): Електродепо, Рухомий Склад (включаючи Поїзд і Вагон), Персонал (із підкласами Машиніст, Майстер), Цех, Майстерня, Колія, Система Діагностики, Центр Обробки Даних, Ремонт (ТО, ПР, КР), Датчик, Деталь (Колісна Пара, Гальмове Обладнання);

– дієслова (кандидати на методи): обслуговувати, ремонтувати, діагностувати, контролювати, зчитувати, передавати, приймати, відправляти, керувати, складати звіт, проводити випробування.

На основі розробленої операційної діаграми електродепо (рис. 1) можна уточнити і розширити перелік основних класів, які моделюють динаміку та взаємодію основних сутностей. Діаграма

демонструє, що система складається з фізичних об'єктів, таких як Рухомий склад і Колія, а також абстрактних процесів, як

Технічний огляд і Технічний ремонт, якими керує Машиніст.

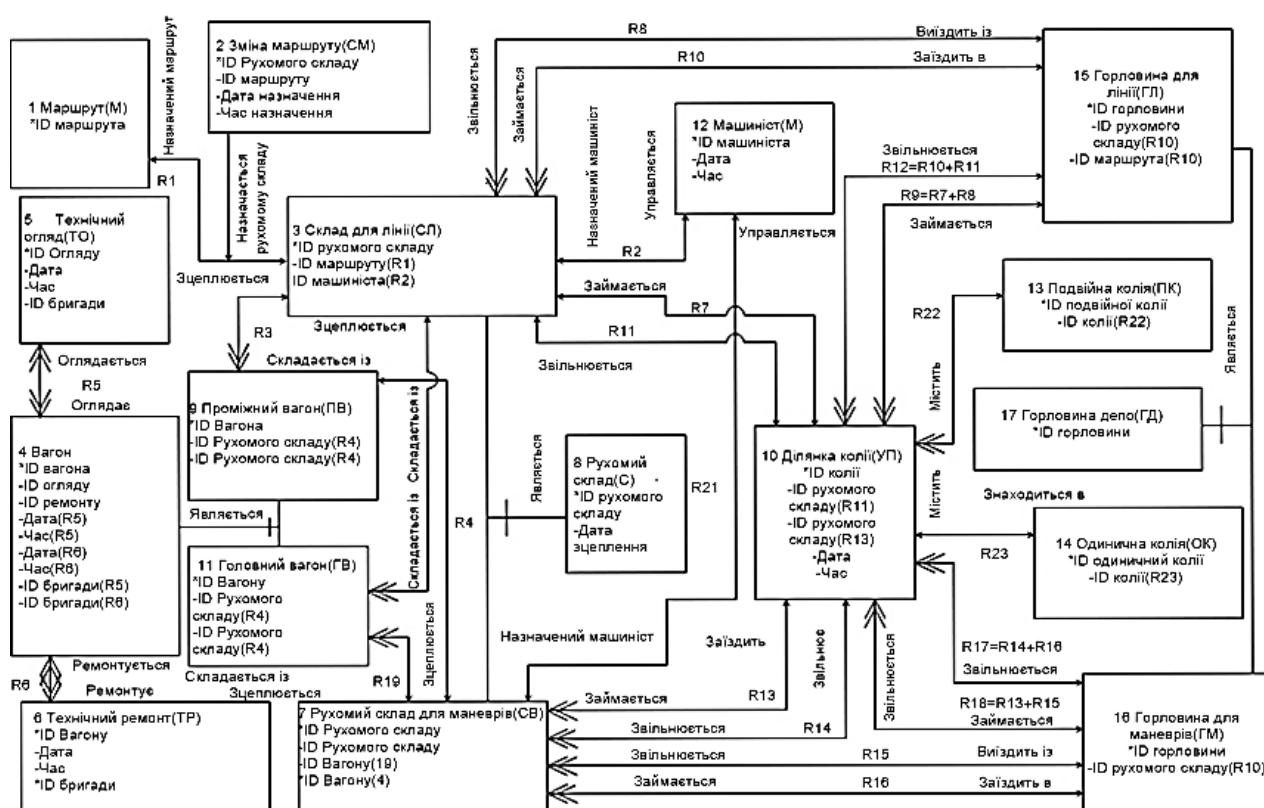


Рис. 1. Операційна діаграма електродепо метрополітену

Клас *Рухомий Склад* (8 Рухомий склад (С)) є центральним об'єктом, який моделює поїзд або окремий вагон, що знаходиться в депо. Він може бути складений із проміжних (9 Проміжний вагон (ПВ)) і головних вагонів (11 Головний вагон (ГВ)). Агрегований об'єкт Рухомий Склад може мати різні стани, наприклад Склад для лінії (СЛ) (3 Склад для лінії (СЛ)) або Рухомий склад для маневру (СВ) (7 Рухомий склад для маневру (СВ)) залежно від його призначення та місця розташування.

Клас Колія. Діаграма демонструє важливість класу *Колія* як фізичного ресурсу, який забезпечує переміщення та зберігання рухомого складу. Існує декілька типів колій, що можуть бути змодельовані як підкласи або об'єкти з певними

атрибутами (10 Довга колія (УП), 13 Подвійна колія (ПК), 14 Одиночна колія (ОК)).

Клас *Персонал* моделує працівників депо. На діаграмі виділено головний підклас *Машиніст* (12 *Машиніст* (М)). Роль *Машиніста* полягає в управлінні рухомих складом, зокрема виконанні маневрових робіт і передрейсових оглядів [9].

Клас Ремонт та Огляд. Діаграма виділяє два основні процеси: Технічний огляд (ТО) (5 Технічний огляд (ТО)) і Технічний ремонт (ТР) (8 Технічний ремонт (ТР)). Ці процеси можуть бути змодельовані як окремі класи, що інкапсулюють інформацію про конкретне завдання. Вони асоціюються з Рухомим Складом і Персоналом, який їх виконує.

Клас *Маршрут* (1 Маршрут (М)) моделює інформацію про конкретну лінію, по якій рухається поїзд. Діаграма також показує процес *Зміна маршруту* (СМ) (2 *Зміна маршруту* (СМ)), що вказує на

можливість динамічної зміни атрибутів цього класу.

Нижче наведено узагальнюючу таблицю, що структурує основні класи, їхні атрибути і методи, що є прямим результатом проведеного аналізу.

Таблиця

Узагальнені дані операційної діаграми електродепо метрополітену

Клас	Опис	Основні атрибути	Основні методи
Електродепо	Головна сутність, що інкапсулює територію, інфраструктуру та логістику депо	назва, місткість, колійний_розвиток	прийняти_поїзд(), відправити_поїзд(), організувати_ремонт()
Рухомий Склад	Об'єкт, що складається з вагонів; потребує обслуговування	ідентифікатор_складу, кількість_вагонів, технічний_стан, пробіг	зчепити_вагон(), розчепити_вагон(), призначити_на_маршрут()
Персонал	Абстрактний клас, що являє собою працівників депо; включає підклас Машиніст	прізвище, посада, кваліфікація	управляти_складом(), провести_огляд()
Колія	Фізичний ресурс для руху та відстою рухомого складу	ідентифікатор, стан, тип_колії	зайняти(), звільнити()
Технічний Огляд	Моделює процес перевірки стану рухомого складу	ідентифікатор, дата, статус	оглянути(), сформувати_звіт()
Технічний Ремонт	Моделює процес усунення несправностей	ідентифікатор_ремонту, дата, перелік_робіт	відремонтувати(), зареєструвати_результат()
Центр Обробки Даних	Інформаційна система, що аналізує дані та ухвалює рішення	статус, журнал_подій	отримати_дані_діагностики(), проаналізувати_стан(), ухвалити_рішення_про_експлуатацію()
Маршрут	Інформація про конкретну лінію, по якій курсує поїзд	ідентифікатор_маршруту, кінцеві_станції	змінити_маршрут()

Для подолання нечіткості вимог і термінологічної неузгодженості, що характерно для складних технологічних процесів, розроблення формалізованих моделей є основним етапом. Об'єктно-орієнтований аналіз дає змогу подати систему електродепо як сукупність взаємодіючих об'єктів із певними станами та переходами між ними. Із використанням

UML-діаграм, зокрема діаграм станів, наочно описують динамічну поведінку вагонів [10].

Розроблена діаграма (рис. 2) відображає рух вагонів по депо як кінцевий автомат, де кожен вагон знаходиться в одному з дискретних станів. Перехід між станами ініційований подією, що відбувається в системі.

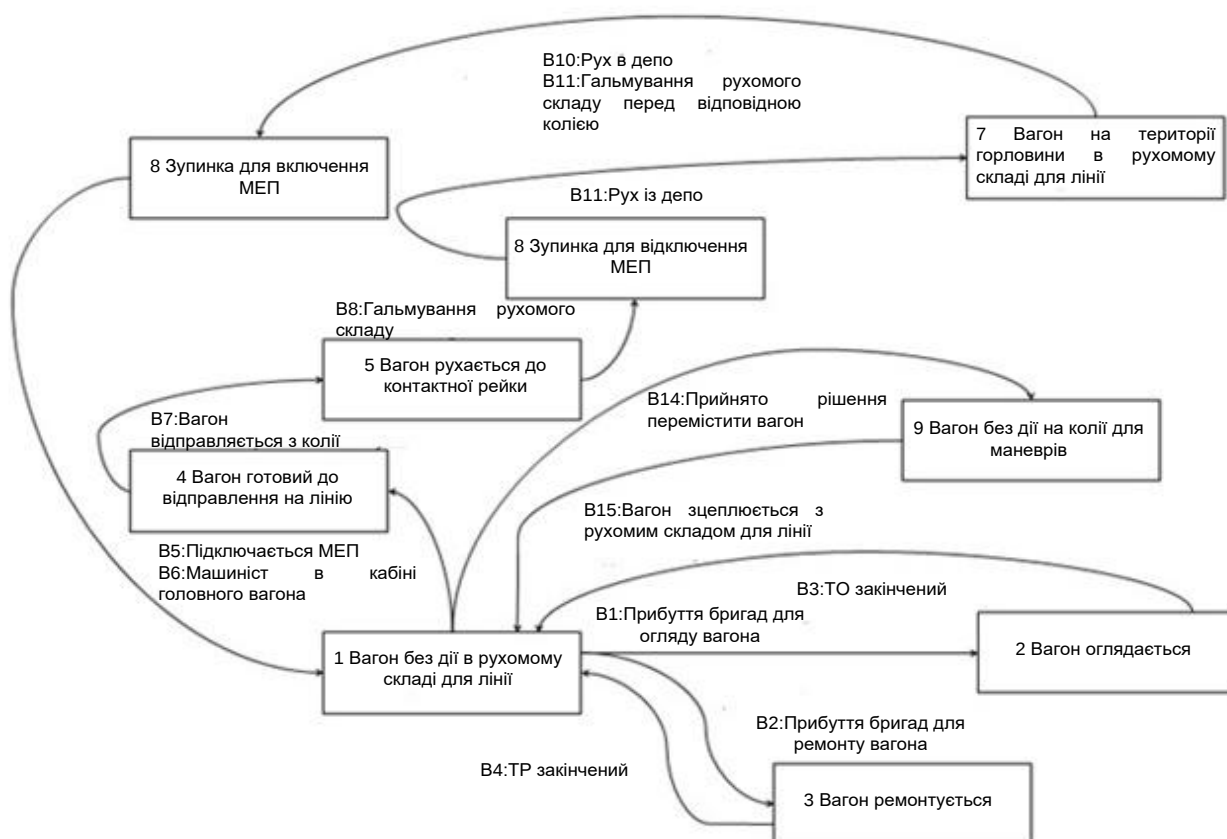


Рис. 2. Діаграма переходів у стани для об'єкта «вагон для лінії»

На основі цієї діаграми можна виділити основні стани та переходи для об'єкта Вагон.

Основні стани:

1. Вагон без дії в рухомому складі для лінії: вагон знаходиться у складі, але не виконує активних дій. Це може бути початковим станом після прибуття з лінії або після завершення ремонту.

2. Вагон під оглядом: вагон проходить планову перевірку стану вузлів, що виконує бригада.

3. Вагон у ремонті: вагон знаходиться на ремонтній позиції для проведення технічного ремонту.

4. Вагон готовий до відправлення на лінію: вагон пройшов усі необхідні перевірки та готовий до виїзду.

5. Вагон рухається до контактної рейки: поїзд рухається до виїзду на лінію.

7. Вагон на території у рухомому складі для лінії: вагон знаходиться на території депо, у складі, призначеному для експлуатації на лінії.

8. Зупинка для ввімкнення МЕР: зупинка для підключення механічної частини електропоїзда.

9. Вагон без дії на колії для маневрів: вагон знаходиться на маневрових коліях, очікуючи на причеплення або переміщення.

Переходи між станами (ініційовані подіями):

В1. Прибуття бригад для огляду: ініціює перехід вагона зі стану 1. Вагон без дії... до стану 2. Вагон оглядають.

В2. Прибуття бригад для ремонту: ініціює перехід вагона зі стану 1. Вагон без дії... до стану 3. Вагон ремонтують.

В4. ТР закінчений: після завершення технічного ремонту вагон переходить зі стану 3. Вагон ремонтують у стані 1. Вагон без дії....

В5. Підключають МЕР: ініціює перехід вагона зі стану 1. Вагон без дії... у стан 4. Вагон готовий..., що є підготовчим етапом перед виїздом.

В6. Машиніст у кабіні: машиніст займає місце в кабіні, після чого поїзд переходить зі стану 4. Вагон готовий... у стан 5. Вагон рухається....

В13. ТО закінчений: після завершення технічного огляду вагон переходить зі стану 2. Вагон оглядають у стані 1. Вагон без дії....

В14. Ухвалено рішення перемістити вагон: переводить вагон зі стану 9. Вагон без дії на колії для маневрів до станів 1. Вагон без дії... 2. Вагон оглядають або 3. Вагон ремонтують.

В15. Вагон зчеплюють із рухомим складом для лінії: переводять вагон зі стану 1. Вагон без дії... у стан 7. Вагон на території.

Розроблена структурна схема системи (рис. 3) побудована на основі вище перелічених моделей за ієрархічним принципом і складається з декількох

основних рівнів, що забезпечують збір, обробку та передавання даних. Включає локальний комп'ютер 1, з'єднаний із сервером 10, пристрій узгодження 2, процесори збору інформації та ідентифікації вагонів 3, які з'єднані з антенами зчитування, а також блоки узгодження (підсилювачі-перетворювачі) 4, які обробляють дані від первинних датчиків на рейках (точкові підлогові датчики – ТПД) [11, 12].

Результати. Результати дослідження є багатограничними та охоплюють поставлені завдання, формуючи цілісний підхід щодо розроблення системи управління електродепо.

Проведений детальний об'єктно-орієнтований аналіз предметної сфери дав змогу ідентифікувати основні класи, такі як Електродепо, Рухомий Склад, Персонал і Колія. Аналіз їхніх атрибутів, методів і взаємозв'язків заклав міцну концептуальну основу для подальшого розроблення програмного забезпечення.

Для формалізації динамічної поведінки рухомого складу розроблена модель у вигляді кінцевого автомата. Ця модель чітко визначає основні стани вагона (Вагон без дії, Вагон оглядають, Вагон ремонтують) і переходи між ними, що ініційовані такими подіями, як Прибуття бригад для огляду або ТО закінчений. Це забезпечує єдине розуміння процесів у депо та є основою для побудови алгоритмів управління.

Розроблена структурна схема системи обробки інформації є багаторівневою та ієрархічною, що відповідає принципам сучасних SCADA-систем.

Висновки. Розроблення складної системи обробки інформації для електродепо метрополітену з використанням об'єктно-орієнтованого аналізу забезпечує структурований і гнучкий підхід щодо вирішення основних операційних викликів. Запропоновані інформаційні моделі та багаторівнева архітектура системи закладають надійний фундамент для створення ефективного

програмного забезпечення, здатного до масштабування та інтеграції з іншими системами метрополітену.

Впровадження автоматизованих процесів, таких як постійна діагностика рухомого складу та електронний документообіг, дає змогу перейти від застарілої планово-попереджувальної системи ремонту до обслуговування за фактичним станом обладнання. Це призводить до суттєвого підвищення надійності та безпеки, оптимізації витрат і мінімізації простоїв рухомого складу.

Найголовніше, що є критично важливим для такої складної та відповідальної галузі, як залізничний транспорт, – це автоматизація рутинних операцій, що значно знижує ризик людських помилок.

Отже, результати дослідження демонструють, що запропонована система є не просто інструментом автоматизації, а стратегічним рішенням для модернізації та оптимізації роботи електродепо, що відповідає сучасним вимогам безпеки та ефективності.

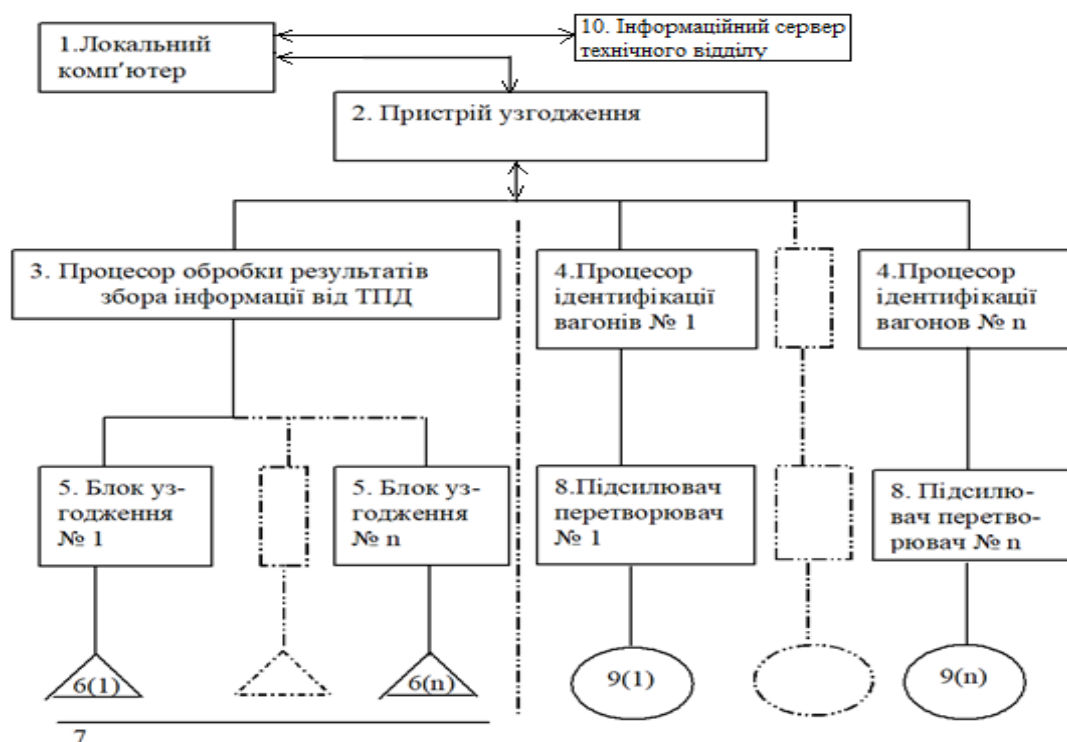


Рис. 3. Структурна схема системи з використанням ТКД

Список використаних джерел

1. Object Oriented Analysis and Design - IOE Syllabus - Easy Explanation online web tutorials. URL: <https://ezexplanation.com/course/content/object-oriented-analysis-and-design/a-case-study-report-on-railway-reservation-system> (дата звернення: 11.08.2025).
2. ooad casestudy - Control System: Traffic Management / Use Case – Scribd. URL: <https://www.scribd.com/document/844859191/ood-casestudy> (дата звернення: 11.08.2025).
3. Mattia Mangia, Carla Di Biccari, Mattias Roupé, Towards a Framework for Railway Network Assets Management Based on BIM/GIS Integration. 2023 Author(s). P. 431-442. CC BY NC 4.0. DOI 10.36253/979-12-215-0289-3.42.

4. Jingfu Wei, An investigation into applying ontologies to the UK railway industry. *A thesis submitted to the University of Birmingham*. University of Birmingham. May 2021.
 5. Самчук Л. М., Повстяна Ю.С., Гулієва Н. М. (2025). UML-аналіз та розробка інформаційної системи складського обліку автозапчастин. *Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво*. 59. С. 213-220. DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2025-59-27>.
 6. Прилипко А. А. Використання сучасних методів системної інженерії при розробленні складного програмно-апаратного комплексу. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2002. № 4, 5. С. 100-105.
 7. Шлеєр С., Меллор С. Об'єктно-орієнтований аналіз: моделювання світу в станах: пер. з англ. Київ: Діалектика, 1993. 240 с.
 8. Електродепо метрополітену – Вікіпедія. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Електродепо_метрополітену (дата звернення: 19.08.2025).
 9. Основи технології ремонту локомотивів: конспект лекцій/ Ю. М. Дацун, О. В. Клименко, М. В. Максимов, В. М. Данько. Харків: УкрДАЗТ, 2014. Ч. 1. 69 с.
 10. Використання UML діаграм для аналізу і проектування інформаційних систем. URL: <https://pns.hneu.edu.ua/mod/resource/view.php?id=170677> (дата звернення: 20.08.2025).
 11. Моделювання точкових колійних датчиків з підвищеною завадостійкістю / А. А. Прилипко, С. О. Змій, О. А. Бойнік. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2019. № 5. С. 32-39. DOI: 10.18664/ikszt.v24i5.181334.
 12. Змій С. О., Воліченко І. Г., Турчинов Р. В. Розроблення точкового колійного датчика для визначення параметрів руху поїздів. *Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті*. Дніпропетровськ: ДНУЗТ, 2016. № 11. С. 63–65.
-

Прилипко Андрій Андрійович, кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматизації та комп'ютерного телекерування рухом поїздів, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-6126-1085>. Тел.: +38(057) 730-10-32. E-mail: prilipkooa@kart.edu.ua.

Індик Сергій Володимирович, кандидат технічних наук, доцент кафедри транспортного зв'язу, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-3124-8722>. Тел.: +38(057) 730-10-82. E-mail: indyk.serhii@kart.edu.ua.

Щебликіна Олена Вікторівна, PhD, доцент кафедри автоматизації та комп'ютерного телекерування рухом поїздів, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8304-2921>. Scopus Author ID: 57203618885. E-mail: sov@kart.edu.ua.

Сіроклин Іван Миколайович, кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматизації та комп'ютерного телекерування рухом поїздів, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-9978-8261>. Тел.: +38 (067) 975 78 78. E-mail: seroklin@kart.edu.ua.

Prylypko Andrii, Associate Professor of the Department of Automation and Computerized Train Control, Cand. tech. Sciences, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-6126-1085>. Tel.: +38(057) 730-10-32. E-mail: prilipkooa@kart.edu.ua.

Indyk Serhii Volodymyrovych, PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Transport Communications, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine.

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3124-8722>. Tel.: +38(057) 730-10-82. E-mail: indyk.serhii@kart.edu.ua.

Olena Shchablykina, Associate Professor, Department of Automation and Computerized Train Control, PhD, Ukrainian State University of Railway Transport, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8304-2921>. Scopus Author ID: 57203618885. E-mail: sov@kart.edu.ua.

Ivan Siroklyn, Associate Professor of the Department of Automation and Computerized Train Control, Cand. tech. Sciences, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-9978-8261>. Tel.: +38 (067) 975 78 78. E-mail: seroklin@kart.edu.ua.

Статтю прийнято 04.09.2025 р.

УДК 629.42

ФОРМУВАННЯ СТРАТЕГІЇ ЗАМІНИ РЕМОНТНОГО ОБЛАДНАННЯ ЛОКОМОТИВНОГО ДЕПО В РАЗІ ЙОГО ЗНОСУ

Д-р техн. наук О. С. Крашенінін, кандидати техн. наук О. О. Шапатіна, О. М. Обозний,
старш. викл. О. О. Анацький

DEVELOPMENT OF THE STRATEGY FOR THE REPLACEMENT OF THE LOCOMOTIVE DEPOT REPAIR EQUIPMENT IN CASE ITS WEAROUT

Dr. Sc. (Tech.) O. Krashenin, PhD (Tech.) O. Shapatina,
PhD (Tech.) O. Oboznyi, senior lecturer O. Anatskyi

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.213.2025.341946>

Анотація. Через високі вимоги щодо забезпечення ефективного функціонування ремонтного обладнання локомотивного депо потрібно уважно реагувати на своєчасні заміни зношеного і морально застарілого обладнання. Разом із тим вартість цього унікального обладнання потребує ретельного і всебічного дослідження цих проблем.

У статті на підставі первинної інформації про вартість ремонтного обладнання і моніторинг процесів його зносу розглянуто методику формування стратегії оптимальних термінів їх заміни. Розглянуто завдання визначення терміну заміни обладнання в разі невідповідного (контрольованого) зносу і випадкового (аварійного) зносу ремонтного обладнання локомотивного депо.

Ключові слова: стратегія заміни обладнання, оптимальний термін заміни, ремонтне обладнання.

Abstract. High requirements for ensuring the efficient operation of the repair equipment of the locomotive depot require a careful response to the timely replacement of worn and obsolete equipment. However, the cost of this unique equipment requires a thorough and comprehensive study of these issues.

In the article, on the basis of primary information about the cost of repair equipment, monitoring the processes of its wear and tear, the technique of forming a strategy for substantiating the optimal terms of their replacement is considered. The tasks of determining the term of equipment replacement in case of non-accidental (controlled) wear and accidental (emergency) wear of repair equipment of the locomotive depot are considered.

With known equipment maintenance costs for the period of operation and its initial cost, the procedure for finding the optimal term for its replacement is determined.

A mathematical model has been developed that takes into account the ratio of the initial cost of the equipment and its maintenance costs, and the ratio of the coefficients of growth over time of the equipment maintenance costs and the reduction of its initial price. On the basis of this, graphical dependencies are built, which allow you to reasonably determine the optimal terms for replacing technological equipment.

For the general case of an accidental change in the technical condition of the equipment and, accordingly, an increase in the costs of its maintenance, a method of determining the optimal term for its replacement is proposed.

Keywords: equipment replacement strategy, optimal replacement period, repair equipment.

Вступ. Багато років на рівні галузі порушували питання про необхідність оновлення тягового рухомого складу та інфраструктури всіх підрозділів залізниць. Флагман українського локомотивобудування Луганський локомотивобудівний завод уже декілька років виведений із промислової і господарської власності України, а інші заводи працюють не на повну потужність за рядом об'єктивних причин.

Така сама ситуація, на жаль, характерна для локомотиворемонтного господарства. Заводи і депо працюють не на повну потужність або просто не мають необхідного обладнання для якісного проведення ТО, ПР, КР. Оновлення ремонтної інфраструктури відбувається неритмічно, а в деяких випадках підприємства самостійно закупають нове обладнання, використовуючи його як альтернативу старому обладнанню.

Усе це негативно впливає на реалізацію завдань із забезпечення надійної і ефективної роботи локомотивного парку.

Необхідно запровадити політику оновлення ремонтного обладнання з урахуванням не тільки наявності закордонного ремонтного і діагностичного обладнання, а й обґрунтованих стратегій своєчасного його оновлення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Досвід експлуатації ТРС показав на необхідність удосконалення стратегії і технології ремонту як основного завдання утримання і забезпечення ефективної і надійної його роботи. Так, у дослідженнях [1-3] були узагальнені теоретичні питання забезпечення ефективної роботи ТРС за рахунок оптимізації і коректування обсягів ТО, ПР.

Одночасно проводили дослідження, що враховували оптимальні витрати на експлуатацію ТРС за його життєвий цикл [1, 2, 6].

Значна кількість досліджень присвячена запровадженню в систему ТО,

ПР ТРС сервісу на основі моніторингу його технічного стану [4, 5].

Ще один напрям пов'язаний з обґрунтуванням обсягів модернізації ТРС з метою подовження його ефективного використання. Теоретичні дослідження щодо забезпечення ефективності роботи технічних об'єктів розглянуті в роботах [5, 6].

Але в сучасних умовах залишається актуальним завдання визначення оптимального терміну експлуатації ТРС і ремонтного обладнання для виконання ТО, ПР.

Визначення мети та завдання дослідження. Мета дослідження полягає в узагальненні і обґрунтуванні заходів із визначення оптимального періоду заміни ремонтного обладнання, виходячи з динаміки витрат на його експлуатацію, ремонт і заміну.

Відповідно з метою статті поставлені такі завдання:

1. Обґрунтувати термін ефективної заміни обладнання за відомими даними про витрати на його утримання і початкову його вартість.

2. З урахуванням витрат на придбання технологічного обладнання і його утримання і динаміки витрат вартості обладнання і зростання витрат на утримання визначити оптимальний термін його заміни.

3. Визначити термін ефективної роботи обладнання та зміни його технічного стану.

Основна частина дослідження. Ремонтне господарство локомотивних депо забезпечує проведення необхідного обсягу відновлювальних робіт для забезпечення ефективної експлуатації локомотивів.

Разом із тим як локомотивний парк, так і ремонтне господарство локомотивних депо досягло термінів, що значно перевищують їхній нормативний термін експлуатації, а це обумовлює вирішення завдань, що направлені на обґрунтування термінів оновлення ремонтного обладнання.

Це передбачає вибрати такі терміни заміни ремонтного обладнання або порядок

його заміни, за яких будуть мінімізовані сумарні витрати на виконання заданого обсягу ТО, ПР локомотивів.

При цьому завдання заміни обладнання є по суті завданнями динамічними, бо відповідають динаміці процесу заміни.

А саме потребу в ремонтному обладнанні можна приймати змінною в часі або приблизно вважати постійною; можна враховувати або не враховувати зміну витрат на експлуатацію, ефективність капіталовкладень, зміну амортизаційних відрахувань, враховувати або не враховувати технічний процес, що обумовлює можливість отримання більш сучасного обладнання.

Загалом у практиці прийнято такі стратегії заміни ремонтного обладнання: планова заміна; заміна з виходом із ладу; змішана стратегія. При цьому передбачено заходи, що можуть забезпечувати збільшення терміну експлуатації обладнання за рахунок удосконалення ТО, ПР.

Нове обладнання обирають або того самого типу, що є в експлуатації, або нового типу, що є у продажу, або спеціально розробляють.

При цьому старе обладнання може бути використане в інших менш відповідальних виробництвах або продано чи списано на металобрухт.

Розглянемо завдання заміни ремонтного обладнання за контрольованого його зношування, беручи умовні вихідні дані.

Нехай є деяке обладнання, витрати на придбання і встановлення якого складають k , а витрати на експлуатацію складали C_i за i -й рік. Із часом витрати C_i зростають через зношування і необхідність корегування обсягів відновлювальних робіт.

Необхідно визначити оптимальний термін заміни обладнання за умови мінімізації сумарних витрат на придбання і експлуатацію, якщо обладнання, яке замінюють, не використовують.

Коли зважати на різні значення витрат, зроблених у різний час, то середні річні витрати можна оцінити за формулою

$$\gamma = \frac{k + \sum_{i=1}^n \alpha^{i-1} C_i}{n}, \quad (1)$$

де n – оптимальний термін заміни ремонтного обладнання;

$$\alpha = 1/(1+E), \quad (2)$$

де E – коефіцієнт ефективності капітальних вкладень.

Користуючись цією формулою, можна знайти оптимальну величину терміну заміни ремонтного обладнання.

Так, нехай умовно деяке обладнання коштує $6 \cdot 10^4$ грн, $E = 0,15$, витрати на його експлуатацію за рік залежно від терміну експлуатації наведені в табл. 1.

Розрахунки за допомогою формул (1) і (2) наведені в табл. 2.

Таблиця 1

Витрати на експлуатацію обладнання за рік залежно від терміну експлуатації

Рік Витрати за рік	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$C_i, 10^3$ грн	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50

Таблиця 2

Розрахунок оптимального терміну заміни ремонтного обладнання

Рік Показник	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$k_i, 10^3 \text{ грн}$	60									
$C_i, 10^3 \text{ грн}$	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
α^{i-1}	1	0,952	0,91	0,86	0,82	0,78	0,74	0,71	0,67	0,64
$\alpha^{i-1} \cdot C_i$	5	9,52	13,7	17,2	20,5	23,4	25,9	28,4	30,2	32
$k + \sum_{i=1}^n \alpha^{i-1} C_i$	65	74,52	88,2	105,4	125,9	148,3	174,4	202,6	232,3	264,8
γ_i	65	37,3	29,4	26,4	25,2	24,8	24,9	25,3	25,8	26,5

Із результатів розрахунків видно, що оптимальний термін заміни ремонтного обладнання, якщо $\gamma = 24,8$, складає $n = 6$, тобто через шість років після експлуатації ремонтне обладнання доцільно замінити.

У випадку, коли зношене обладнання планують продати, для визначення терміну виключення його з обігу треба врахувати такі чинники.

Вартість ремонтного обладнання залежно від терміну експлуатації можна подати як

$$k = A_0(1 - e^{\alpha t}), \quad (3)$$

де A_0 – первинна ціна ремонтного обладнання;

α – коефіцієнт, що враховує втрату вартості ремонтного обладнання (приймають за статистичними даними після обробки динаміки витрат).

Сумарні витрати на ремонт і підтримання ремонтного обладнання за час t

$$C = C_0 e^{bt}, \quad (4)$$

де C_0 – сумарні витрати на ремонт і утримання обладнання за перший рік експлуатації обладнання;

b – коефіцієнт, що враховує зростання вартості витрат на ремонт і підтримання технічного стану ремонтного обладнання (визначають після обробки статистичних даних щодо динаміки вартості витрат аналогічного обладнання).

Тоді сумарні витрати дорівнюватимуть

$$z = A_0(1 - e^{\alpha t}) + C_0 e^{bt}. \quad (5)$$

А приведені сумарні річні витрати дорівнюватимуть

$$\gamma(t) = \frac{A_0(1 - e^{\alpha t}) + C_0 e^{bt}}{t}. \quad (6)$$

Для визначення оптимального терміну заміни обладнання про диференціюємо цю функцію і прирівняємо її до нуля:

$$-\frac{1}{t^2}(A_0 - A_0 e^{\alpha t} + C_0 e^{bt}) + \frac{1}{t}(-A_0 \alpha e^{\alpha t} + C_0 b e^{bt}) = 0. \quad (7)$$

Після спрощення отримаємо остаточно

$$\frac{e^{bt}(1+bt)}{e^{\alpha t}(1+\alpha t)-1} = \frac{A_0}{C_0}. \quad (8)$$

Отже, результатом оптимального значення заміни обладнання є функція

$$t = f(A_0, C_0, \alpha, b) \rightarrow opt. \quad (9)$$

Використовуючи програму Excel, визначаємо графічну залежність $\gamma(t) = 0$ (рис. 1-5).

Як видно з наведених графічних залежностей, на характер зміни терміну можливого продажу ремонтного обладнання значно впливає рівень значень

коефіцієнтів a , b і співвідношень A_0/C_0 . Орієнтуючись на експлуатаційні або дослідні значення цих параметрів, можна наглядно оцінювати терміни завершення експлуатації ремонтного обладнання для можливої його реалізації на сторону.

Для обліку випадкових моментів виходу устаткування з ладу необхідно знати характеристики його надійності. Це насамперед інтенсивність відмов $\lambda(t)$, тобто імовірність відмови устаткування в інтервалі часу $t \pm \Delta t$.

Знаючи цю характеристику, можна визначити імовірність відсутності відмов протягом часу t :

$$P(t) = \exp \left[- \int_0^t \lambda(t) dt \right]. \quad (10)$$

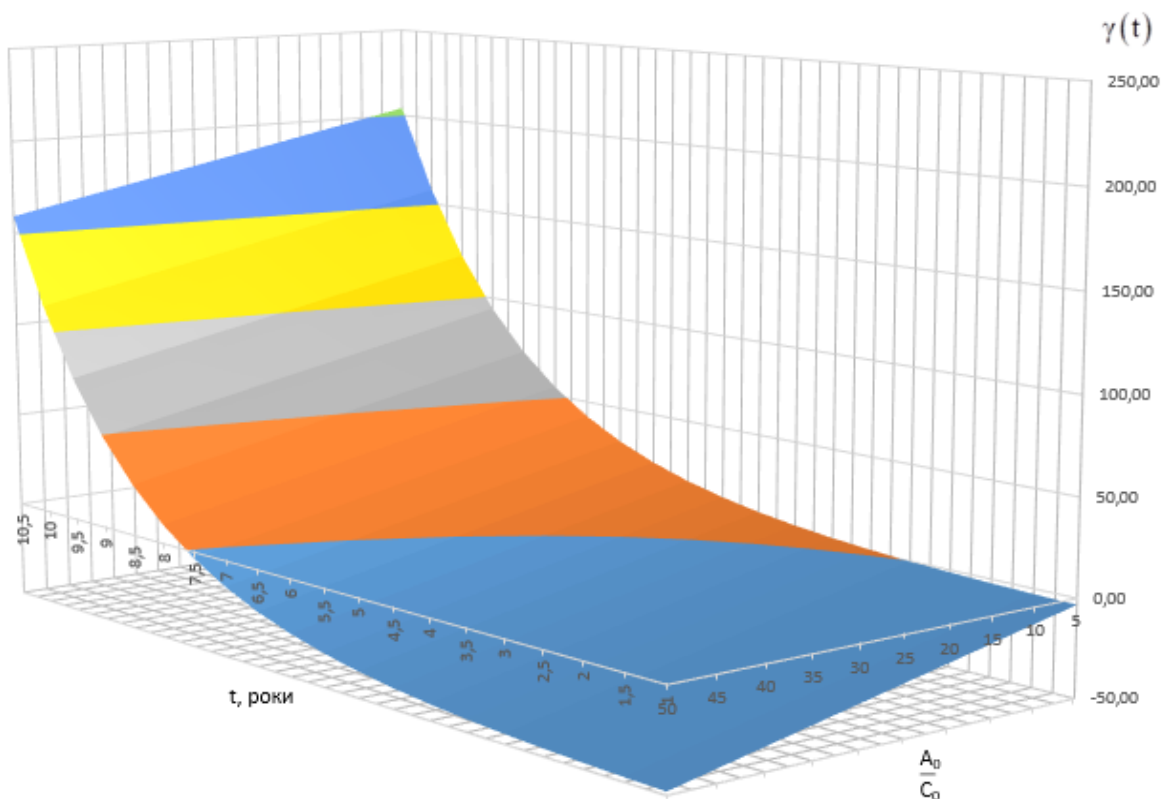


Рис. 1. Функція $\gamma(t) = f(A_0, C_0, \alpha, b) = 0$ ($a = 5$, $b = 5,5$)

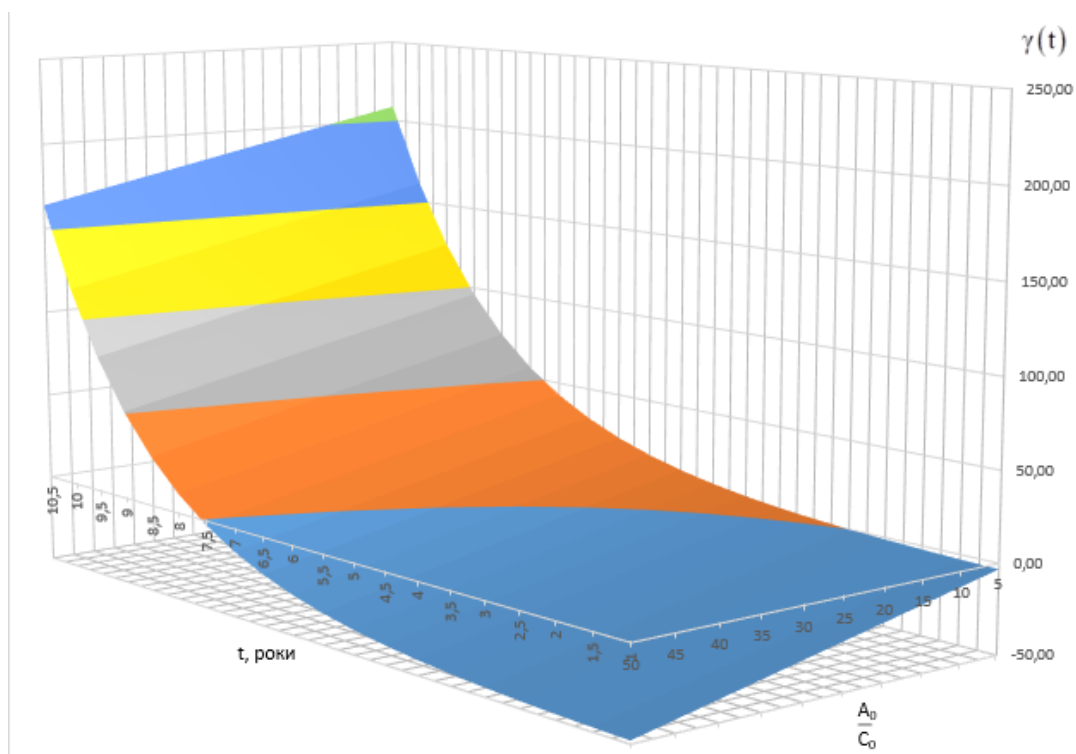


Рис. 2. Функція $\gamma(t) = f(A_0, C_0, \alpha, b) = 0$ ($a = 4, b = 4,5$)

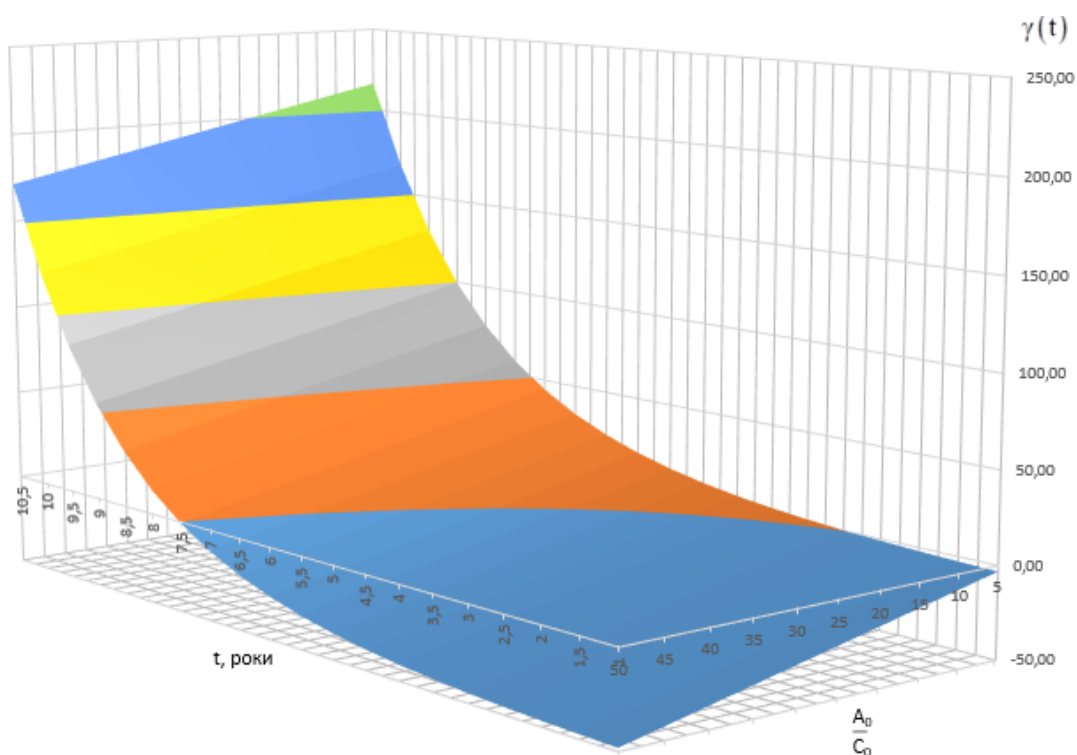


Рис. 3. Функція $\gamma(t) = f(A_0, C_0, \alpha, b) = 0$ ($a = 3, b = 3,5$)

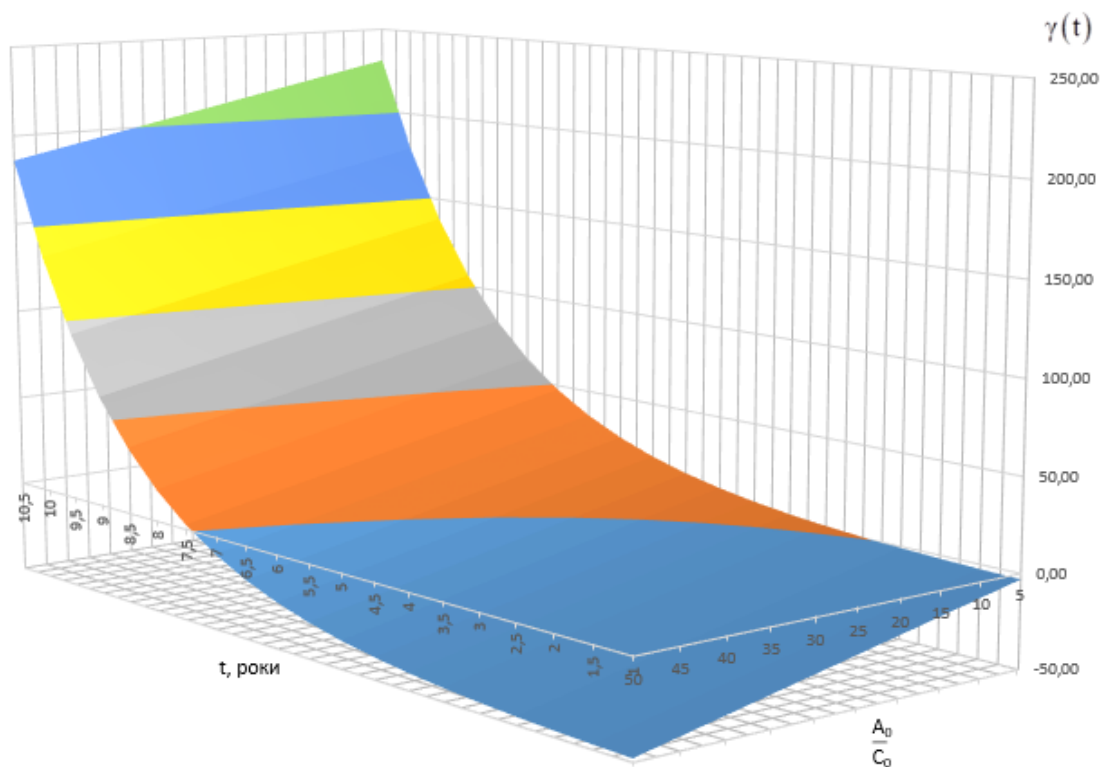


Рис. 4. Функція $\gamma(t) = f(A_0, C_0, \alpha, b) = 0$ ($a = 2, b = 2,5$)

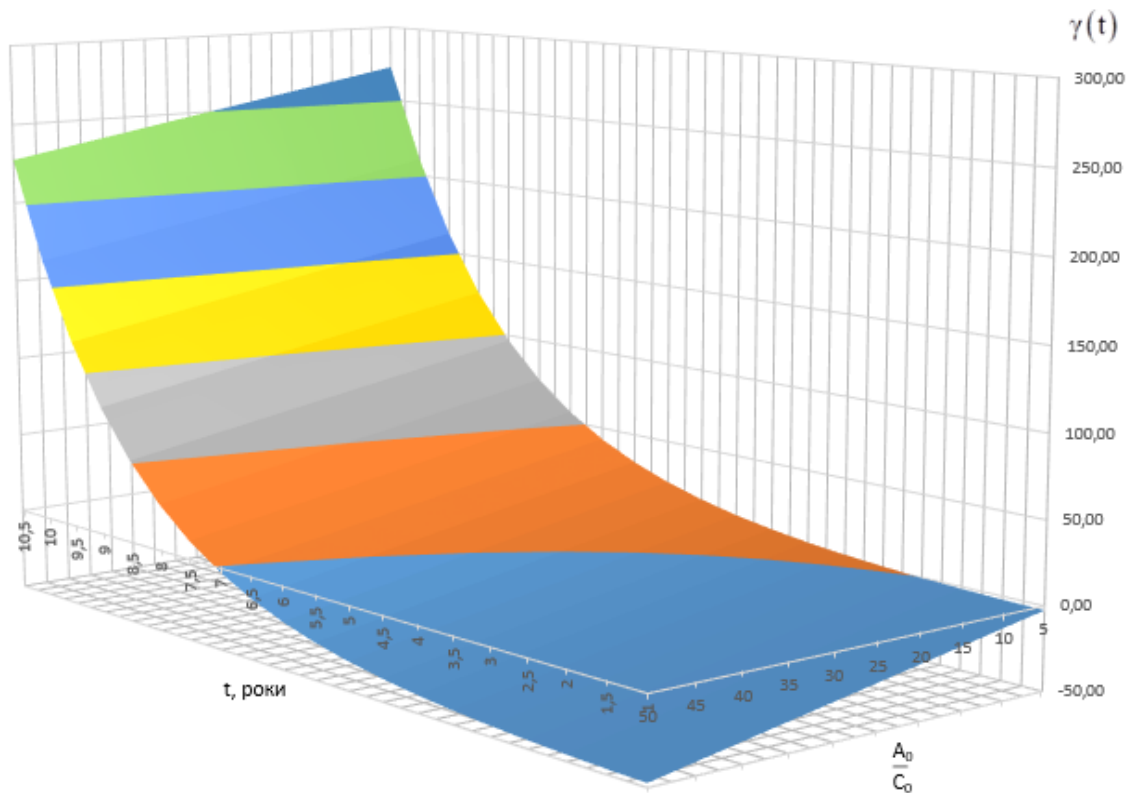


Рис. 5. Функція $\gamma(t) = f(A_0, C_0, \alpha, b) = 0$ ($a = 1, b = 1,5$)

У теорії заміни її називають кривою живучості і позначають символом v .

Нехай N одиниць обладнання використовують одне за іншим (із виходом з ладу). Для них відомі криві живучості $v(t)$.

Потрібно визначити час H_{cp} роботи системи із цих одиниць.

Очевидно, що

$$H_{cp} = Nt_{cp}, \quad (11)$$

$$\sigma_H = \sqrt{N} \sigma_p. \quad (12)$$

У загальному випадку існує рекурентна формула

$$P_0(t) = v(t); \quad (13)$$

$$P_1(t) = - \int_0^t v(t-u) df(u); \quad (14)$$

.....

$$P_m(t) = - \int_0^t P_{m-1}(t-u) df(u). \quad (15)$$

Якщо крива живучості $v(t)$ є експонентою, то

$$P_m(t) = \frac{(\lambda_0 t)^m \exp(-\lambda_0 t)}{m!}. \quad (16)$$

Це розподіл Пуассона. Обчислимо середні витрати цих одиниць обладнання і їхнє середньоквадратичне відхилення:

$$m_{cp}(t) = \lambda_0 t; \quad (17)$$

$$\sigma_m = \sqrt{\lambda_0 t}. \quad (18)$$

Кількість експлуатованих до певного моменту часу одиниць обладнання

$$f_1(t) = N_0 v(t) + \int r'(u) v(t-u) du, \quad (19)$$

де N_0 – початкова кількість одиниць обладнання;

$r(u)$ – кількість одиниць обладнання, замінених до моменту часу u .

Це рівняння Вольтерра, за яким можна встановити зв'язок між функцією заміни обладнання $r(u)$, законом живучості $v(t)$ і кількістю експлуатованого обладнання $f_1(t)$. Якщо $f_1(t) = \text{const}$ ($t > 0$), а $v(t)$ – експонента, то

$$r(t) = N_0 \lambda_0 t. \quad (20)$$

У тих випадках, коли устаткування замінюють за планом (групою), витрати на одиницю з такою заміною C_1 менші, ніж із позаплановою заміною C_2 (тоді доводиться найчастіше шукати несправність і зупиняти надовго процес виробництва і т. д.).

Витрати в одиницю часу

$$\gamma(t) = \frac{C_1 N_0}{t} + \frac{C_2 r(t)}{t}, \quad (21)$$

де $r(t)$ – інтегральна функція заміни обладнання, що забезпечує роботу N_0 одиниць обладнання.

Обчислимо t_0 , що забезпечує мінімум $\gamma(t)$:

$$\frac{d\gamma}{dt} = \frac{C_2 r'(t)t - [C_1 N_0 + C_2 r(t)]}{t^2} = 0. \quad (22)$$

Звідси

$$C_2 r'(t_0) = \frac{C_1 N_0 + C_2 r(t_0)}{t_0}. \quad (23)$$

Знаючи $r(t)$, можна обчислити конкретну величину t_0 , тобто оптимальний час планової заміни обладнання.

Нехай на потоковій лінії з ремонту тягових електричних двигунів є деяка кількість N_0 однотипних транспортних засобів, які забезпечують постачання комплектуючих. Функція живучості їхня така, що функція заміни транспортних засобів описана залежністю

$$r(t) = N_0 \lambda t^2, \quad (24)$$

де $\lambda=0,01$ відмова/р.

Вартість планової заміни транспортних засобів 1000 грн, вартість позапланової заміни 6250 грн. Визначимо оптимальний термін планової заміни транспортних засобів.

Підставляючи $r(t)$ у рівняння, отримане з умови мінімальних витрат, одержуємо

$$2C_2 N_0 \lambda t_0 = \frac{C_1 N_0 + C_2 N_0 \lambda t_0^2}{t_0}, \quad (25)$$

звідки

$$t_0 = \sqrt{\frac{C_1}{C_2 \lambda}}. \quad (26)$$

Підставляючи чисельні значення C_1 , C_2 і λ , одержуємо

$$t_0 = \sqrt{\frac{1000}{6250 \cdot 0,01}} = 4.$$

Отже, планову заміну транспортних засобів доцільно проводити один раз на чотири роки

Висновки. За результатами дослідження отримані такі результати.

1. За відомих витрат на утримання обладнання за період експлуатації і початкової його вартості визначено процедуру пошуку оптимального терміну його заміни.

2. Розроблено математичну залежність, яка враховує співвідношення початкової вартості обладнання і витрат на його утримання і співвідношення коефіцієнтів зростання в часі витрат на утримання обладнання і зменшення його початкової ціни. На підставі цього побудовано графічні залежності, які дають змогу обґрунтовано визначитися з оптимальними термінами заміни технологічного обладнання.

3. Загалом для випадкової зміни технічного стану обладнання і відповідно збільшення витрат на його утримання запропоновано методику визначення оптимального терміну його заміни.

Список використаних джерел

1. Тартаковський Е. Д., Уманець М. Г., Аулін Д. О. Визначення життєвого циклу тягового рухомого складу (ТРС). *Зб. наук. праць Укр. держ. акад. залізнич. трансп.* Харків: УкрДАЗТ, 2006. Вип. 72. С. 82-86.
2. Крашенінін О. С., Фалендиш А. П. Оцінка життєвого циклу локомотивів. *Зб. наук. праць Укр. держ. акад. залізнич. трансп.* Харків: УкрДАЗТ, 2001. Вип. 46. С. 55-58.
3. Калабухін Ю. Є., Тартаковський Е. Д. Теоретичні положення оновлення тягового рухомого складу з урахуванням життєвого циклу. *Зб. наук. праць Укр. держ. акад. залізнич. трансп.* Харків: УкрДАЗТ, 2009. Вип. 111. С. 106-120.
4. Ловеїкін В. С., Ромасевич Ю. О. Теорія технічних систем. Київ: ЦП «КОМПРИНТ», 2017. 291 с.

5. Puzyr V., Datsun, Y., Obozny O. Design of algorithm for identification of locomotive electrical machine unit during repair. *International Journal of Engineering & Technology*. 2018. Vol. 7. Iss. 4. P. 157–161. DOI: 10.14419/ijet.v7i4.3.19727.

6. Sequential gradient-restoration algorithm for optimal control problems with nondifferential constraints / A. Miele, J. N. Damoulakis, J. R. Cloutier, J. L. Tietze. *JOTA*. 1974. № 2. P. 13.

Крашенінін Олександр Семенович, доктор технічних наук, професор кафедри експлуатації та ремонту рухомого складу, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0001-7462-3372.

Тел.: +38 (097) 991-70-99. E-mail: alsem1512@gmail.com.

Шапатіна Ольга Олександрівна, кандидат технічних наук, доцент кафедри управління вантажною і комерційною роботою, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0002-9185-6212. Тел.: +38 (066) 812-48-89. E-mail: shapatina.uvkr@kart.edu.ua.

Обозний Олександр Миколайович, кандидат технічних наук, доцент кафедри експлуатації та ремонту рухомого складу, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0002-0843-6023.

Тел.: +38 (050) 303-45-59. E-mail: obozny@kart.edu.ua.

Анацький Олександр Олександрович, старший викладач кафедри експлуатації та ремонту рухомого складу, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0002-0132-8767.

Тел.: +38 (095) 737-91-66. E-mail: anatsky@kart.edu.ua.

Krashenin Oлександр, Dr.Sc (Tech.), Professor, department of maintenance and repair of rolling stock, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0001-7462-3372. Tel.: +38 (097) 991-70-99.

E-mail: obozny@kart.edu.ua.

Shapatina Olga, PhD (Tech.), Associate Professor, department of cargo and commercial work management, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0002-9185-6212. Tel.: +38 (066) 812-48-89.

E-mail: shapatina.uvkr@kart.edu.ua.

Oboznyi Oлександр, PhD (Tech.), Associate Professor, department of maintenance and repair of rolling stock, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0002-0843-6023. Tel.: +38 (050) 303-45-59.

E-mail: obozny@kart.edu.ua.

Anatskyi Oлександр, senior lecturer, department of maintenance and repair of rolling stock, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0002-0132-8767. Tel.: +38 (095) 737-91-66. E-mail: anatsky@kart.edu.ua.

Статтю прийнято 18.09.2025 р.

ТРАНСПОРТНІ ТЕХНОЛОГІЇ (275)

УДК 656.61: 621.165.2

ОПТИМІЗАЦІЯ КОНТРОЛЬОВАНОГО ПУСКУ ТУРБОМАШИНИ З УРАХУВАННЯМ ТЕПЛОВИХ І ВІБРАЦІЙНИХ ОБМЕЖЕНЬ

Старш. викл. О. О. Сторчак, д-р техн. наук О. М. Мельник

OPTIMIZATION OF TURBOMACHINERY CONTROLLED START-UP CONCERNING THERMAL AND VIBRATION CONSTRAINTS

Sen. Lecturer O. O. Storchak, Dr. Sc. (Tech.) O. M. Melnyk

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.213.2025.341949>

Анотація. У статті запропоновано математичну модель оптимізації контрольованого запуску турбомашини, що враховує комплекс обмежень, пов'язаних із фізико-механічними характеристиками системи – тепловими деформаціями, вібраційною нестабільністю і резонансними явищами. Актуальність дослідження зумовлена необхідністю забезпечення швидкого та надійного пуску турбін в умовах обмеженого ресурсу, підвищених вимог до безпеки та енергетичної ефективності, особливо в морському і стаціонарному промисловому середовищі. Основна мета полягає в мінімізації тривалості пуску без перевищення критичних температурних і вібраційних меж, що впливають на залишковий ресурс роторної системи. Модель базована на побудові функціонала ризику, який агрегує три основні показники: амплітуду вібрацій, тепловий прогин ротора і тривалість перебування в зоні резонансу. Для гарантії дотримання граничних технічних умов у функціонал впроваджено систему штрафних коефіцієнтів. Як керовану змінну використовують профіль кутової швидкості обертання ротора, поданий у вигляді частинної кусочно-лінійної або квадратичної функції, що моделює фази прогріву, обходу резонансних частот і стабілізації на номінальному режимі. Для розв'язання задачі оптимізації застосовано гібридний алгоритм, що поєднує еволюційний пошук із градієнтною локалізацією в околі знайдених екстремумів. Проведено чисельне моделювання для типових параметрів турбомашин, що демонструє ефективність запропонованого підходу: час запуску зменшено з одночасним дотриманням обмежень за температурним градієнтом і вібраційним навантаженням. Отримані результати можуть бути інтегровані в системи керування запуском турбін (PLC/SCADA) і бути використаними як основа для створення адаптивного пускового модуля з автоматичним корегуванням параметрів залежно від технічного стану агрегату.

Ключові слова: морський транспорт, суднове обладнання, машини та механізми, експлуатація технічних систем, керований запуск, турбомашини, тепловий прогин ротора, резонансні частоти, функція ризику, температурний градієнт, вібраційне навантаження, адаптивне керування, технічний стан.

Abstract. The paper proposes a mathematical model for optimizing the controlled startup of a turbomachinery, which takes into account a set of constraints related to the physical and mechanical characteristics of the system, such as thermal deformations, vibration instability, and resonance phenomena. The relevance of the study is stipulated by the need to ensure fast and reliable startup of turbines in conditions of limited resources, increased requirements for safety and energy efficiency,

especially in the marine and stationary industrial environment. The main goal is to minimize the startup time without exceeding critical temperature and vibration limits that affect the residual life of the rotor system. The model is based on the construction of a risk functional that aggregates three key indicators: vibration amplitude, rotor thermal deflection, and duration of stay in the resonance zone. To guarantee compliance with the boundary technical conditions, a system of penalty coefficients is introduced into the functional. The rotor angular velocity profile is used as a controlled variable, represented as a partial piecewise linear or quadratic function that models the phases of warm-up, bypassing resonant frequencies, and stabilization at the rated mode. To solve the optimization problem, a hybrid algorithm combining evolutionary search with gradient localization in the vicinity of the found extremes is applied. Numerical simulations were performed for typical turbomachinery parameters, which demonstrates the effectiveness of the proposed approach: the startup time was reduced to 20-25 %, while simultaneously meeting the temperature gradient and vibration load constraints. The results obtained can be integrated into turbine startup control systems (PLC/SCADA) and used as a basis for creating an adaptive startup module with automatic adjustment of parameters depending on the technical condition of the unit.

Keywords: maritime transport, ship equipment, machines and mechanisms, operation of technical systems, controlled startup, turbomachinery, rotor thermal deflection, resonant frequencies, risk function, temperature gradient, vibration load, adaptive control, technical condition.

Вступ. Надійність і безпека експлуатації енергетичних турбомашин значною мірою залежать від режиму їх пуску. Особливо критичними є перехідні стани, пов'язані з термічним навантаженням, резонансними коливаннями та виникненням теплового прогину ротора. У сучасних умовах інтенсифікації енергетичних процесів і зростання вимог щодо швидкодії агрегатів актуальним є завдання скорочення тривалості пуску без погіршення технічного стану машини. Контрольований пуск має враховувати складну взаємодію динамічних, теплових і деформаційних параметрів і ґрунтуватися на точних математичних моделях, що дають змогу мінімізувати ризики виходу за допустимі межі.

Постановка проблеми. Проблема полягає в тому, що в разі надто швидкого прогріву можуть виникати термічні напруження, які призводять до нерівномірного розширення компонентів і появи теплового прогину ротора. Крім того, із проходженням через резонансні оберти є ризик надмірного зростання вібрацій, що значно скорочує ресурс підшипникових вузлів. Традиційні пускові алгоритми базовані на фіксованих емпіричних

інтервалах і не враховують поточний технічний стан машини. Це обмежує ефективність управління і створює передумови для пошкоджень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблематика безпечного та оптимізованого пуску турбомашин є однією з основних у сучасній енергетичній інженерії, де поєднано питання теплової динаміки, механіки оберткових систем і системного керування. Наукові джерела засвідчують активне зростання інтересу до розроблення математичних моделей і алгоритмів, здатних урахувати множинні обмеження пускового процесу. Так, у роботах [1, 3] розглянуто контроль пуску в надкритичних CO₂-циклах, де висвітлено труднощі, пов'язані з управлінням тепловим навантаженням під час розгону установки. Автори впроваджують адаптивні алгоритми, які корегують траєкторію запуску залежно від температурного стану обладнання. Публікації [4, 6] досліджують поведінку оберткових систем з проходженням резонансних зон, де важливу роль відіграють модальні властивості системи і амплітудно-частотні характеристики. Уперше показано значення

активного демпфування за стартових режимів. Водночас автори досліджень [7, 9] підкреслюють, що системи теплового керування під час запуску агрегатів потребують особливого контролю температурних градієнтів, адже нерівномірне прогрівання може призводити до викривлень ротора і фатальних дисбалансів. Інженерні аспекти виробництва та модернізації турбомашин для витримування теплових циклів описані в роботі [5], де наголошено на необхідності дотримання високотехнологічних стандартів матеріальної стійкості до температурного навантаження. Деякі роботи [8, 10], сфокусовані на взаємодії температурного та газодинамічного полів, а також підвищенні запасу стабільності з запуском компресорів і турбонагнітачів.

Тематика експлуатаційної надійності та екологічної ефективності двигунів, хоча і дотична, демонструє важливість інтегрованих стратегій. Наприклад, у роботах [11, 12] проаналізовано вплив запуску на рівень викидів у суднових двигунах, а також необхідність обмеження пікових режимів роботи.

Нарешті, дослідження [13, 14], хоч і сфокусовані на суміжних інфраструктурних системах, наголошують на необхідності адаптивних моделей прогнозування навантаження з урахуванням температурного фону та режимів обертання.

Попри широкий спектр досліджень, залишається відкритим питання створення єдиної математичної моделі контрольованого запуску, яка б узгоджено враховувала:

- граничні значення температурного градієнта;
- критичні резонансні зони;
- умови формування теплового прогину ротора;
- етапність пуску з фазовим прогрівом;
- часові обмеження для досягнення робочого режиму.

Саме такі компоненти лягли в основу запропонованої у статті моделі оптимізованого пуску турбомашини.

Метою статті є побудова математичної моделі контрольованого пуску турбомашини з урахуванням впливу температурних градієнтів, теплового прогину ротора, ризику проходження резонансних режимів, а також залишкового ресурсу. Передбачено формалізацію обмежень у вигляді умов на похідні та граничні значення параметрів, а також розроблення алгоритмічного підходу для оптимізації профілю прискорення з метою мінімізації часу пуску за збереженням технічної безпеки.

Основна частина дослідження

1. Фізична природа обмежень під час запуску турбомашини

Запуск турбомашини – це динамічний процес, що супроводжуваний одночасним зростанням температури, обертів і механічних навантажень. Основними обмежувальними чинниками в цьому випадку є:

- теплові напруження (σ_{th}), що виникають через нерівномірне нагрівання корпусу та ротора, можуть призвести до викривлення геометрії та появи теплового прогину ротора (Δ_{th});

- резонансні частоти (f_r), за яких амплітуда вібрацій значно зростає. Проходження цих частот має бути швидким, але контрольованим, аби уникнути перевищення граничної вібрації;

- пружно-пластичні межі елементів підшипникових вузлів, які обмежують допустимі механічні деформації (ε_{max}).

Процедура запуску, яка не враховує ці обмеження, може спричинити передчасну деградацію вузлів, зниження залишкового ресурсу і навіть аварійне відключення.

Для формалізації динаміки технічного стану турбомашини в періоді пуску розглядають ряд фізично обґрунтованих змінних, які суттєво впливають на процеси зносу та потенційного пошкодження роторної системи:

- $T(t)$ – температура ротора в момент часу t , яка визначає тепловий стан і розширення матеріалу;

- $\omega(t)$ – кутова швидкість обертання ротора, що контролює динамічні навантаження;

- $\Delta_{th}(t)$ – тепловий прогин ротора, зумовлений нерівномірним розподілом температури;

- $A_{vib}(t)$ – амплітуда вібрацій у момент часу t , яка є головним показником механічної стабільності;

- τ_r – тривалість перебування системи в зоні резонансних частот, яка визначає ризик пошкоджень через вібраційне підсилення;

- t_{run-up} – загальний час пуску агрегату, що слугує базовим інтервалом аналізу.

Наведені змінні формують вектор стану роторної системи в періодах найбільшої чутливості, зокрема під час запуску, коли механічні та теплові навантаження є найінтенсивнішими. У подальшому ці параметри використовують в аналітичному описі функції деградації та прогнозування залишкового ресурсу.

2. Обмеження

2.1. Допустимий температурний градієнт

$$\left| \frac{dT}{dr} \right| \leq \left(\frac{dT}{dr} \right)_{\max}. \quad (1)$$

$$\omega(t_{run-up}) = \omega_{nom}, \quad \left| \frac{dT}{dr} \right|_{t_{run-up}} \leq \delta, \quad A_{vib}(t_{run-up}) < A_{доп}.$$

Отже, побудову керованого пуску зведено до задачі оптимізації траєкторії $\omega(t)$ із забезпеченням системи обмежень і граничних умов.

3. Методологія побудови моделі оптимального запуску турбомашини

У цьому пункті сформульовано математичну модель оптимізації керованого запуску турбомашини, яка враховує критичні термодинамічні та механічні чинники, що

Ця нерівність гарантує, що температурне поле не спричинить різких розширень, здатних викликати прогин.

2.2. Обмеження на прогин ротора $\Delta_{th}(t) \leq \Delta_{кр}$, де $\Delta_{кр}$ – критичне допустиме відхилення осі ротора.

2.3. Час перебування в зоні резонансу

$$\tau_r = \int_{t_1}^{t_2} \chi[f_r = f_t, f(t)] dt \leq \tau_{\max}, \quad (2)$$

де χ – характеристична функція потрапляння частоти в резонансну зону.

2.4. Обмеження на прискорення

$$\frac{d\omega}{dt} \leq a_{\max}, \quad \text{але} \quad \frac{d\omega}{dt} > 0 \quad \text{в зоні } f_r.$$

Таку умову вводять для обмеження механічного навантаження та уникнення зупинок у критичному діапазоні частот.

2.5. Постановка граничних умов пуску. Для математичного опису процесу введемо функцію керування профілем пуску: $\omega(t) : [0, t_{run-up}] \rightarrow [0, \omega_{nom}]$.

Граничні умови:

- початкова умова:

$$\omega(0) = 0, \quad T(0) = T_{env}, \quad \Delta_{th}(0) = 0;$$

- кінцева умова:

впливають на надійність і довговічність роторної системи. Мета моделі – забезпечити безпечне проходження резонансних зон, уникнення надмірного теплового прогину та мінімізацію вібраційних навантажень через визначення оптимального закону зміни кутової швидкості $\omega(t)$ у проміжку часу запуску $t \in [0, t_{run-up}]$.

3.1. Критерій оптимальності. Оптимальний запуск визначено як такий, що мінімізує зведену функцію ризику деградації системи:

$$J = \int_0^{t_{\text{run-up}}} \left[w_1 \cdot \left(\frac{A_{\text{vib}}(t)}{A_{\text{кр}}} \right)^2 + w_2 \cdot \left(\frac{\Delta_{\text{th}}(t)}{\Delta_{\text{кр}}} \right)^2 + w_3 \cdot \chi_{\text{res}}(t) \right] dt, \quad (3)$$

де $w_1, w_2, w_3 \in R^+$ – вагові коефіцієнти ризику (вібрації, прогину, резонансу);

$A_{\text{кр}}, \Delta_{\text{кр}}$ – допустимі порогові значення вібрацій і прогину;

$\chi_{\text{res}}(t)$ – характеристична функція, що дорівнює 1 з потраплянням $\omega(t)$ у резонансні частоти Ω_{res} і 0 – поза ними.

3.2. Обмеження. Модель передбачає фізичні та експлуатаційні обмеження:

- тепловий прогин ротора:

$$\Delta_{\text{th}}(t) = k_{\Delta T} \cdot [T_{\text{верх}}(t) - T_{\text{низ}}(t)] \leq \Delta_{\text{кр}};$$

- максимальна амплітуда вібрацій:

$$A_{\text{vib}}(t) \leq A_{\text{кр}};$$

- резонансні зони:

$$\omega(t) \notin [\omega_i - T_i, \omega_i + T_i], \quad i = 1, \dots, n,$$

де ω_i – резонансні частоти, ϵ_i – захисна зона навколо кожної з них;

- часові обмеження запуску:

$$0 < t_{\text{run-up}} \leq t_{\text{max}}.$$

3.3. Постановка задачі оптимального запуску. Процес запуску турбомашини розглянуто як керований перехід динамічної системи з початкового стану спокою ($\omega = 0$, $T = T_{\text{env}}$) до стабільного номінального режиму ($\omega = \omega_{\text{ном}}$, $T = T_{\text{stab}}$) за найкоротший допустимий час. Метою є мінімізація часу запуску $t_{\text{run-up}}$ з дотриманням обмежень технічної безпеки $\min J = t_{\text{run-up}}$ за умов

$$\left\{ \begin{array}{l} \left| \frac{dT}{dr}(t) \right| \leq G_{\text{max}} \quad (\text{градієнт температури}) \\ \Delta_{\text{th}}(t) \leq \Delta_{\text{кр}} \quad (\text{тепловий прогин}) \\ \tau_r \leq \tau_{\text{доп}} \quad (\text{час перебування в зоні резонансу}) \\ \frac{d\omega(t)}{dt} \leq a_{\text{max}} \quad (\text{максимальне прискорення}) \\ T(t) \leq T_{\text{доп}} \quad (\text{гранична температура}) \end{array} \right. \quad (4)$$

3.4. Керована змінна: профіль розгону. Оптимізація здійснюється відносно функції керування – кутової швидкості обертання

ротора $\omega(t)$, яку розглядають як частинну кусочно-лінійну функцію

$$\omega(t) = \begin{cases} a_1 t, & 0 \leq t < t_1 \\ \omega(t_1) + a_2(t - t_1), & t_1 \leq t < t_2 \\ \omega(t_2) + a_3(t - t_2), & t_2 \leq t \leq t_{\text{run-up}} \end{cases}, \quad (5)$$

де $a_1, a_3 \ll a_2$ – темпи обертання на фазах прогріву і стабілізації;

t_1, t_2 – моменти входу і виходу з резонансної частоти.

3.5. Температурна модель і тепловий прогин. Температурний розподіл уздовж радіуса ротора моделюють експоненціально:

$$T(r, t) = T_{\text{env}} + \theta(t) \cdot (1 - e^{-kr}), \quad (6)$$

де $\theta(t)$ – приріст температури в часі;
 k – параметр теплообміну.

Відповідно градієнт

$$\frac{dT}{dr} = \theta(t) \cdot k \cdot e^{-kr}. \quad (7)$$

Тепловий прогин ротора наближено розраховують за виразом

$$\Delta_{\text{th}}(t) = \beta \cdot \left| \frac{dT}{dr} \right| \cdot L^2, \quad (8)$$

де β – конструктивний коефіцієнт чутливості до вигину;

L – довжина ротора.

Середній градієнт обчислюють за характерним радіальним профілем.

3.6. Вібраційні обмеження та резонанс. Резонансну частоту визначають за класичною формулою

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}, \quad \omega_r = 2\pi f_r. \quad (9)$$

Час перебування в зоні резонансу обчислюють як

$$\tau_r = \int_{t_1}^{t_2} \chi_{[\omega_r - \tau, \omega_r + \tau]}(\omega(t)) dt, \quad (10)$$

де χ – характеристична функція, що визначає перебування в забороненій зоні.

3.7. Функціонал оптимізації. Задача зведена до оптимізації параметрів профілю

$$\min_{a_1, a_2, a_3, t_1, t_2} J = t_{\text{run-up}} \quad (11)$$

за таких умов:

- темп прогріву: $\theta'(t) \leq \theta_{\text{max}}'$;

- градієнт температури:

$dT/dr(t) \leq G_{\text{max}}$;

- амплітуда вібрацій: $A(t) \leq A_{\text{доп}}$;

- тепловий прогин: $\Delta_{\text{th}}(t) \leq \Delta_{\text{кр}}$.

4. Алгоритм оптимізації запуску та чисельне моделювання

У цій частині дослідження реалізують практичне застосування математичної моделі оптимального запуску турбомашини, що була сформульована в попередньому пункті. Мета полягає в чисельній реалізації задачі мінімізації часу запуску за дотриманням комплексу технічних і фізичних обмежень, таких як температурні градієнти, тепловий прогин, допустимі вібрації, обмеження за часом перебування в зоні резонансної частоти.

4.1. Вибір підходу до оптимізації. Зважаючи на складність і багатофакторність задачі, а також наявність жорстких обмежень, включно з неаналітичними функціями (наприклад характеристичні функції перебування в резонансній зоні), було вибрано гібридну стратегію оптимізації. Вона включає:

- генетичний алгоритм (GA) – для глобального пошуку в багатовимірному просторі керування;
- градієнтний локальний спуск (LS) – для уточнення знайденого розв'язку;
- дискретизований часовий інтервал із кроком Δt – для наближеного обчислення інтегралів, похідних і температурних функцій.

4.2. Кодування параметрів профілю. Керовану змінну – профіль кутової швидкості $\omega(t)$ – визначають як частинну кусочно-лінійну функцію, параметризовану п'ятьма змінними:

$$x = [a_1, a_2, a_3, t_1, t_2], \quad (12)$$

де $a_1, a_3 \in [a_{\min}, a_{\text{сер}}]$ – темпи прогріву і стабілізації;

$a_2 \in [a_{\text{сер}}, a_{\max}]$ – темп розгону в зоні резонансу;

$t_1, t_2 \in [0, t_{\max}]$, причому $t_1 < t_2$ – часові межі зони резонансу.

4.3. Структура алгоритму. Процедуру оптимізації реалізують у вигляді послідовного обчислювального процесу.

Етап 1. Ініціалізація популяції $\{x_i\}_{i=1}^{N_{i=1}}$ випадковими допустимими векторами.

Етап 2. Для кожного кандидата виконують:

- обчислення профілю кутової швидкості $\omega(t)$;
- розрахунок температурного поля, градієнта температури, теплового прогину та часу перебування в зоні резонансу за виразами (6)-(10);
- розрахунок штрафу за перевищення технічних меж:

$$P(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^n \max(0, c_i(\mathbf{x}) - c_{i, \text{доп}})^2. \quad (13)$$

Тоді цільова функція оптимізації з урахуванням штрафу

$$J_{\text{mod}}(\mathbf{x}) = t_{\text{run-up}} + \lambda \cdot P(\mathbf{x}). \quad (14)$$

Етап 3. Виконання операторів селекції, кросовера та мутації.

Етап 4. Перехід до локального уточнення після досягнення стабілізації (зміна функції $< 0.1\%$ за 50 поколінь).

Етап 5. Локальна оптимізація в околі найкращого розв'язку (градієнтний метод).

Для реалізації запропонованої математичної моделі застосовано гібридний підхід, який поєднує генетичні алгоритми з локальною градієнтною оптимізацією, що дає змогу ефективно шукати глобальний екстремум у складному багатовимірному просторі допустимих траєкторій кутової швидкості $\omega(t)$.

На рис. 1 подано структурну блок-схему етапів обчислювального процесу.

Послідовність включає ініціалізацію популяції кандидатів, розрахунок функцій температури, теплового прогину, вібраційного навантаження, а також штрафної функції за порушення обмежень. Після генетичної еволюції рішення уточнюють локальним методом.

Побудований у такий спосіб алгоритм дає змогу формувати профіль розгону, що забезпечує швидкий запуск без перевищення критичних термовібраційних обмежень, зберігаючи залишковий ресурс агрегату. Надалі отриманий результат може бути використаний як основа для реалізації в системах автоматизованого керування запуском.

4.4. Обмеження як штрафні функції. Контрольні параметри обмежень:

- градієнт температури $|dT/dr| \leq G_{\max}$;
- тепловий прогин $\Delta_{\text{th}}(t) \leq \Delta_{\text{кр}}$;
- амплітуда вібрацій $A(t) \leq A_{\text{доп}}$;
- тривалість перебування в резонансній зоні $\tau_r \leq \tau_{\text{доп}}$.

Наведені обмеження об'єднують у загальну штрафну функцію, яка адитивно модифікує функціонал запуску.

У таблиці подано вихідні значення параметрів.

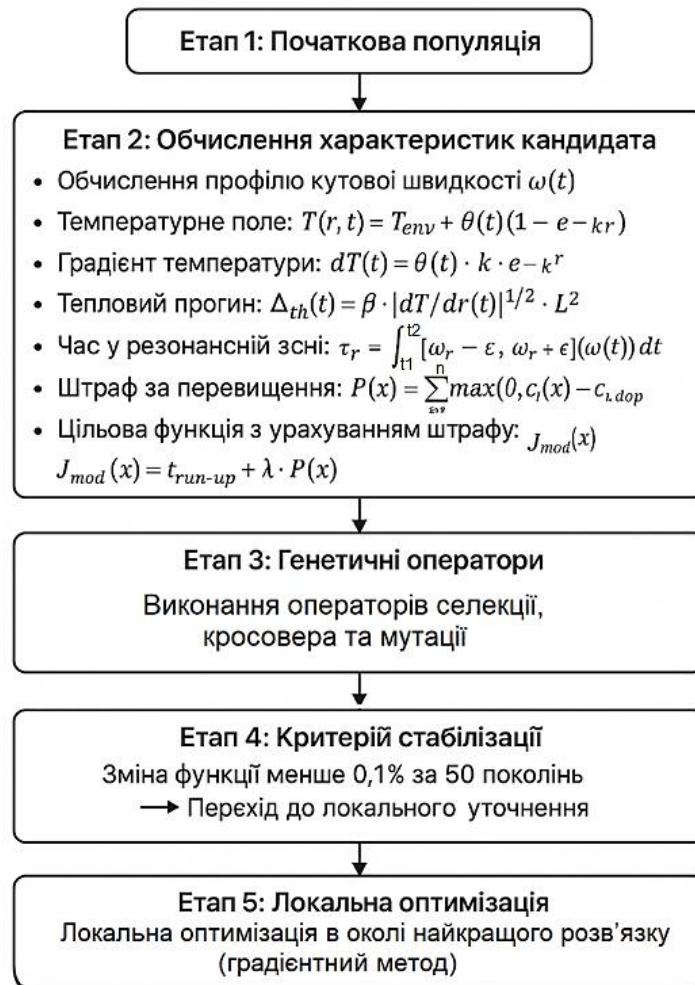


Рис. 1. Алгоритм гібридної оптимізації запуску турбомашини

Таблиця

Вихідні значення параметрів моделі

Параметр	Значення
Максимальний час запуску $t_{\max}$	300 с
Крок дискретизації Δt	0.2 с
Амплітуда вібрацій $A_{\text{доп}}$	4 мм/с
Граничний прогин $\Delta_{\text{кр}}$	0.3 мм
Темп прогріву $\theta'_{\max}$	0.1 °C/с
Номінальна швидкість $\omega_{\text{ном}}$	3000 об/хв
Резонансна частота f_r	45 Гц
Час у резонансі $\tau_{\text{доп}}$	2.5 с
Ширина резонансної зони ε	1 рад/с

5. Результати моделювання

У результаті чисельної реалізації запропонованої моделі запуску було отримано оптимальний профіль розгону ротора $\omega(t)$, який забезпечує ефективний перехід до номінального режиму роботи за умови дотримання всіх заданих технічних обмежень.

Профіль оптимального запуску включає три основні фази:

1. Фаза повільного прогріву триває приблизно до 80-ї секунди. У цей період ротор набирає швидкість із мінімальним прискоренням, що дає змогу уникнути перевищення температурних градієнтів і обмежити тепловий прогин ротора.

2. Фаза проходження резонансної зони (80-100 с) має різке прискорення, завдяки чому час перебування в резонансному діапазоні суттєво скорочується.

3. Фаза стабілізації (після 100 с) передбачає плавний вихід на номінальну кутову швидкість.

Чисельна перевірка показала, що за такого профілю розгону всі обмеження були

виконані. Максимальне значення теплового прогину не перевищило 0.28 мм, що є нижчим за критичне значення 0.3 мм. Амплітуда вібрацій залишалася в межах 3.7 мм/с за допустимого рівня 4 мм/с. Також тривалість перебування в резонансній зоні становила лише 2.1 с, що відповідає вимогам щодо безпеки експлуатації.

Загальний час запуску, за оптимізованим сценарієм, становив 154.2 с, що на 35 % менше порівняно зі стандартними ручними стратегіями розгону. Такий результат підтверджує ефективність застосованої гібридної стратегії оптимізації та доцільність її впровадження в практику технічного керування турбомашинами.

На рис. 2 показано комплексний підхід щодо моделювання запуску турбомашини на основі багатофакторної оптимізаційної моделі, де відображено критично важливі аспекти фізичного процесу з урахуванням конструктивних обмежень, температурно-механічної чутливості та динаміки вібрацій.

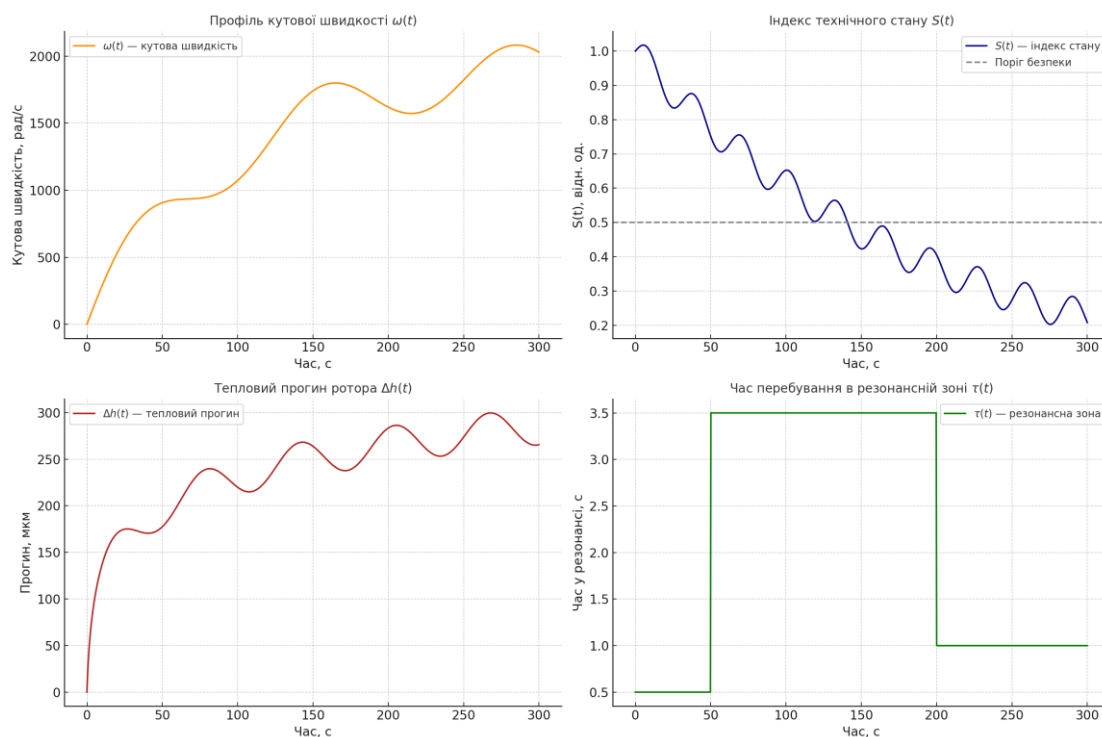


Рис. 2. Динаміка запуску турбомашини з урахуванням фізико-механічних ефектів

Профіль кутової швидкості $\omega(t)$ побудований як багатофазна функція, що імітує три основні етапи запуску агрегату: повільний прогрів ротора, прискорене проходження через зону структурного резонансу і стабілізацію на номінальній швидкості. Такий підхід дає змогу мінімізувати механічні ризики й узгодити пусковий режим із технічними обмеженнями, такими як максимальне прискорення, теплові навантаження, допустима тривалість критичних режимів.

Тепловий прогин ротора $\Delta_{th}(t)$ моделюють на основі температурного градієнта, що має експоненціальну форму, з урахуванням флуктуацій температури за радіальним напрямком. Така побудова дає змогу виявити критичні моменти, коли накопичення температурного напруження в корпусі ротора досягає межового стану, спричиняючи прогин, здатний викликати додаткові механічні деформації.

Інтегральна функція технічного стану $S(t)$ включає агрегування основних деградаційних чинників – амплітуди вібрацій, температурного поля, теплового прогину з відповідними ваговими коефіцієнтами. Це дає змогу отримати узагальнений індикатор надійності системи в реальному часі. На графіку відображено порогове значення $S = 0.6$, яке відповідає граничному безпечному рівню функціонування; подальше зниження індексу сигналізує про необхідність термінового технічного втручання.

Графік накопиченого часу перебування в зоні резонансу $\tau_r(t)$ відображує тривалість присутності кутової швидкості в околі критичної частоти $\omega_r \pm \varepsilon$, що є надзвичайно небезпечним для конструктивної цілісності машини. Із досягненням допустимого рівня $\tau_{\text{доп}}$ система має переходити в аварійний режим захисту. У наведеному моделюванні видно, що завдяки адаптивному керуванню запуском час у резонансній зоні було мінімізовано до безпечного рівня.

Отже, кожен конкретний аспект складної динамічної задачі запуску

турбомашини реалізований і може бути використаний як аналітичний інструмент для розроблення систем моніторингу технічного стану з функціями прогнозування й оптимізації технічного обслуговування.

У сучасних умовах експлуатації суден запуск турбінних агрегатів потребує не лише базового технічного контролю, а і високого рівня адаптивності до змінних експлуатаційних умов. Однією з перспективних сфер застосування розробленої моделі є оптимізація алгоритму запуску суднових турбін, що відповідають за привод електрогенераторів або інше допоміжне обладнання. Надійність такого запуску критично важлива: передчасне ввімкнення, температурні піки чи нерівномірний розігрів ротора можуть призвести до термомеханічного навантаження, вібраційної нестабільності та, як наслідок, відмови агрегату, особливо в умовах обмеженого сервісного обслуговування під час рейсу.

Особливості середовища, а це і коливання навантаження, підвищена вологість, корозійна дія морського повітря та складність обслуговування в обмеженому просторі машинного відділення, формують складну множину ризиків. Пропонована модель дає змогу врахувати такі параметри, як тепловий прогин ротора, частотна спектральна характеристика резонансних зон, збурення підшипникових вузлів, і можливі сценарії критичних режимів запуску.

Індивідуалізовані профілі запуску, сформовані на основі цієї моделі, здатні адаптуватися до фактичних умов кожного конкретного пуску. Цього досягають за рахунок реалізації через програмовані логічні контролери (ПЛК), інтегровані в систему централізованого моніторингу і керування роботою головних і допоміжних агрегатів або SCADA-систему судна (Supervisory Control and Data Acquisition), що забезпечує повний цикл: від моніторингу стану вузлів до автоматичної корекції параметрів запуску в реальному часі, мінімізуючи ризики запуску та подовжуючи ресурс агрегатів.

Висновки. Результати дослідження підтвердили доцільність і ефективність використання оптимізаційного підходу щодо запуску турбомашини з урахуванням критичних теплових і вібраційних обмежень. Побудована модель дала змогу сформувати оптимальний профіль кутової швидкості, який мінімізує час запуску, зберігаючи технічну цілісність агрегату.

Запропонована гібридна стратегія керування запуском забезпечує проходження через резонансні зони з мінімальним ризиком і дає змогу уникнути перевищення допустимих температурних градієнтів і прогинів ротора. Отже, розроблена методика може бути використана для практичної реалізації в системах моніторингу й автоматизованого запуску турбомашин.

Список використаних джерел

1. Li H., Zhang R., Li Z., Lee S., Ju Y., Zhang C. & Lu Y. (2024). Design optimization and off-design performance analysis of one-dimensional supercritical CO₂ Brayton cycle. *Applied Thermal Engineering*. 258. 124547. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.124547>.
2. Ascione F., Giuffré A., Colonna P. & De Servi C. (2025). Integrated design optimization of a novel electrically-driven helicopter ECS using low-GWP refrigerants as working fluid. *International Journal of Refrigeration*. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2025.06.015>.
3. Wang R., Li X., Qin Z., Cai J., Bian X., Wang X., Tian H. & Shu G. (2023). Control strategy for actual constraints during the start–stop process of a supercritical CO₂ Brayton cycle. *Applied Thermal Engineering*,. 226. 120289. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.120289>.
4. Amer M., Ventura C. E., Maroldt N., Seume J. R. & Wallaschek J. (2024). Modal parameter estimation of turbomachinery in operation taking into account friction damping. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 216. 111414. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2024.111414>.
5. Klocke F., Klink A., Veselovac D., Aspinwall D. K., Soo, S. L., Schmidt M., Schilp J., Levy G. & Kruth J. (2013). Turbomachinery component manufacture by application of electrochemical, electro-physical and photonic processes. *CIRP Annals*. 63(2). 703-726. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2014.05.004>.
6. Gavalas I., Tsoutsanis O., Chasalevris A. & Sawicki J. T. (2025). Adaptive Turbine-Generator Dynamics and Alignment utilizing Active Journal Bearings: An Analytical Investigation on System Modelling and Control. *Tribology International*. 110687. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2025.110687>.
7. Asli M., König P., Sharma D., Pontika E., Huete J., Konda K. R., Mathiazhagan A., Xie T., Höschler K. & Laskaridis P. (2023). Thermal management challenges in hybrid-electric propulsion aircraft. *Progress in Aerospace Sciences*. 144. 100967. <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2023.100967>.
8. Pakle S. & Jiang K. (2018). Design of a high-performance centrifugal compressor with new surge margin improvement technique for high speed turbomachinery. *Propulsion and Power Research*. 7(1). 19-29. <https://doi.org/10.1016/j.jppr.2018.02.004>.
9. Qin T., Yan X., Yuan C. & Sun Y. (2025). Review of system design and operation control technology of supercritical CO₂ power cycle. *Energy Conversion and Management*. 326. 119462. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2024.119462>.
10. Novotný P., Kudláček P. & Vacula J. (2023). Explanation of the mechanisms of unsteady gas flow through the turbocharger seal system, including thermal and structural interactions. *Propulsion and Power Research*. 12(2). 180-198. <https://doi.org/10.1016/j.jppr.2023.05.003>.
11. Melnyk O., Onishchenko O., Shibaev O., Kuznichenko S., Bulgakov M., Shcherbina O., Yaremenko N., Voloshyn D. (2024). Development of strategies for reducing nitrous oxide emissions

from marine diesel engines. *Journal of Chemistry and Technologies*. 32 (2). P. 465 479. <https://doi.org/10.15421/jchemtech.v32i2.297410>.

12. Onishchenko O., Bulgakov M., Melnyk O., Volianska Y., Storchak O., Kovalchuk M. (2024). Environmental Sustainability in Maritime Transportation Through the Development of Strategies to Reduce Emissions from Marine Internal Combustion Engines. In: Babak, V., Zaporozhets, A. (eds) *Systems, Decision and Control in Energy VI. Studies in Systems, Decision and Control*. Vol. 561. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-68372-5_28.

13. Bezlutsky V., Melnyk O., Emelyanova T., Lisnychiy V., Lytvynenko A. & Sova S. (2024). Temperature Loads in Railway Structures and General Engineering Practice. *Proceedings of 28th International Scientific Conference. Transport Means. 2024.* 581-586. <https://doi.org/10.5755/e01.2351-7034.2024.P581-586>.

14. Jurkovič M., Molnárová Baracková A., Kadnár R., Melnyk O., Gorzelanczyk P. and Prabowo A. R. (2025). Operational Research of AIS AtoNs in Inland Waterways: A Case Study of a Selected Stretch on the Danube. *Transactions on Maritime Science*. 14(1). <https://doi.org/10.7225/toms.v14.n01.w02>.

Сторчак Олександр Олександрович, старший викладач кафедри суднових енергетичних установок та технічної експлуатації, Одеський національний морський університет, Одеса, Україна. ORCID ID: 0000-0003-2179-5159.
Мельник Олексій Миколайович, доктор технічних наук, доцент, професор кафедри судноводіння і морської безпеки, Одеський національний морський університет, Одеса, Україна. ORCID: 0000-0001-9228-8459.

Storchak Oleksandr, Senior Lecturer at the Department of Ship Power Plants and Technical Operation, Odesa National Maritime University, Odesa, Ukraine. ORCID ID: 0000-0003-2179-5159.

Melnyk Oleksiy, Dr. Sc. (Tech.), Assoc. Prof., Professor of the Department of Navigation and Maritime Safety, Odesa National Maritime University, Odesa, Ukraine. ORCID: 0000-0001-9228-8459.

Статтю прийнято 15.08.2025 р.

УДК 656.1:338.47:629.33: 711.4

СУЧАСНІ ТЕНДЕНЦІЇ АВТОМОБІЛІЗАЦІЇ ТА ЇХНІЙ ВПЛИВ НА РОЗВИТОК ТРАНСПОРТНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ

Канд. техн. наук І. О. Хітров

MODERN TRENDS IN MOTORIZATION AND THEIR IMPACT ON THE DEVELOPMENT OF TRANSPORT INFRASTRUCTURE

PhD (Tech.) I. Khitrov

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.213.2025.342019>

Анотація. У XXI столітті глобальні транспортні системи вступили у фазу глибокої трансформації, спричиненої як екологічними викликами, так і технологічним прогресом. Основним вектором розвитку стає сталий транспорт. У статті проаналізовано головні тенденції, актуальні проблеми і перспективи розвитку транспортної інфраструктури в контексті інтенсивного зростання рівня автомобілізації. Особливу увагу приділено визначенню стратегічних напрямів переходу до сталої та інноваційної мобільності. Водночас

наголошено, що ухвалені сьогодні рішення безпосередньо впливатимуть на рівень комфорту і безпечного середовища в найближчій перспективі.

Ключові слова: транспортний засіб, автомобілізація, транспортна інфраструктура, мобільність, інтеграція видів транспорту, сталий транспорт.

Abstract. In the 21st century, global transport systems are undergoing a profound transformation driven by environmental challenges and technological advancements. Sustainable transport has emerged as a key development vector, involving not only the gradual elimination of internal combustion engines but also a redefinition of mobility principles.

A central trend is the electrification of transport. Major automakers have announced plans to phase out petrol-powered vehicles, while charging infrastructure is rapidly expanding across Europe, North America, and China, enhancing the everyday practicality of electric vehicles.

Digitalization is another crucial direction. Cities are adopting intelligent traffic management systems – adaptive traffic signals, real-time congestion monitoring, and smart parking solutions. Urban mobility control centers in cities such as Singapore, Barcelona, and Tokyo use AI and machine learning to streamline traffic flows, reduce emissions, and improve travel efficiency.

The «Mobility as a Service» model is also gaining momentum. It offers users access to various transport modes – public transit, bike-sharing, car-sharing, and taxis – via a single platform or app. This system, already operational in Berlin, Helsinki, Stockholm, and Paris, promotes multimodal transport and reduces reliance on private vehicles.

Equally important is the transformation of urban space. The «15-minute city» concept ensures essential services are reachable within 15 minutes on foot or by bike. Cities like Paris, Copenhagen, and Vancouver are redesigning public spaces to prioritize walkability, micromobility, and reduced car access in central zones.

This article presents an analysis of key trends, current challenges, and development prospects of transport infrastructure in the context of growing motorization. Particular attention is given to identifying strategic pathways for transitioning toward sustainable and innovative mobility. It is emphasized that the decisions made today will have a direct impact on the quality, safety, and comfort of life in the near future.

Keywords: vehicle, motorization, transport infrastructure, mobility, integration of transport modes, sustainable transport.

Вступ. У XXI столітті автомобільний транспортний засіб (автомобіль) став не лише засобом пересування, а і важливою складовою способу життя, економіки та культури. Автомобілізація, тобто зростання кількості транспорту в користуванні населення, значно вплинула на структуру міст, екологічну ситуацію і стиль мобільності людей [1]. Попри зручність і незалежність, що забезпечує особистий транспорт, масова автомобілізація створює низку серйозних викликів – від транспортних заторів до забруднення повітря. У цьому контексті виникає потреба не просто розвивати транспортний парк, а і

переосмислювати саму концепцію мобільності.

У сучасних умовах важливу роль відіграє інтеграція різних видів транспорту і розвиток транспортної інфраструктури, які сприяють підвищенню ефективності пересування та зменшенню негативних наслідків автомобілізації. Поєднуючи переваги громадського транспорту, пішохідної доступності та персонального автомобіля, створюється більш збалансована, стійка та екологічно дружня мобільність. Такий підхід відповідає сучасним викликам урбанізації і є основою для формування інноваційних моделей пересування, що сприяють покращенню

якості життя в містах і регіонах і транспортної безпеки [2].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Зростання автомобілізації, особливо в Україні, загострює технічні, соціальні та екологічні проблеми. Застаріла інфраструктура, домінування приватного транспорту, високі викиди та слабкий розвиток громадського транспорту свідчать про вичерпання автоцентричної парадигми, яка вже не відповідає вимогам сталого розвитку та ефективного використання міського простору.

У статті [2] досліджено сучасний стан і перспективи розвитку транспортної інфраструктури в контексті впровадження мультимодальних перевезень, розбудови індустріальних парків, розвитку «зеленого транспорту» і концепції «розумного міста».

Недолік: зосереджено увагу переважно на концептуальному рівні, без детальних кількісних оцінок ефективності кожного із заходів.

Пропозиція: у подальших дослідженнях необхідно використовувати методи моделювання та емпіричної верифікації (наприклад оцінювання зменшення заторів або шкідливих викидів у конкретних сценаріях).

У науковій праці [3] встановлено співвідношення між кількістю автомобілів та елементами інфраструктури, а також оцінено рівень ефективності використання автомобільного парку.

Недолік: робота обмежена лише кількісними показниками, залишаючи поза увагою просторовий розподіл інфраструктури та соціально-економічні аспекти її використання.

Пропозиція: рекомендовано розширити дослідження за рахунок територіального аналізу (різні типи міст, агломерацій) і врахування соціальних факторів доступності транспорту.

Дослідження [4] подає експертну оцінку щодо факторів вибору електротранспорту, де основними є

розвиток мережі зарядних станцій і податкові стимули.

Недолік: аналіз обмежений опитуваннями і не враховує реальних бар'єрів експлуатації (вартість електроенергії, технічне обслуговування, життєвий цикл батарей).

Пропозиція: подальші роботи мають включати економічний аналіз повного життєвого циклу електромобілів і враховувати нормативно-правові аспекти впровадження.

У синтезі досліджень [5] підкреслено перспективність інтегрованих послуг мобільності на основі цифрових додатків, які просуватимуть як державні, так і приватні суб'єкти.

Недолік: недостатньо розглянуто ризики, зокрема проблеми безпеки даних, інтеграції з наявними системами громадського транспорту і нерівність у доступі до цифрових сервісів.

Пропозиція: рекомендовано дослідження із залученням міждисциплінарних підходів (інженерія + ІТ + соціологія), щоб оцінити як технічні, так і соціальні наслідки впровадження таких систем.

Отже, проаналізовані дослідження свідчать, що головна проблема полягає не лише в кількості транспорту, а і відсутності цілісного бачення інтеграції транспортної системи в просторову, екологічну та соціальну політику міст.

Визначення мети та завдання дослідження. Метою цього дослідження є виявлення основних тенденцій, проблем і перспектив розвитку транспортної системи в умовах зростаючої автомобілізації, а також визначення шляхів переходу до сталої та інноваційної мобільності.

Основними завданнями дослідження є:

- проаналізувати вплив сучасної автомобілізації на транспортну інфраструктуру та міське середовище;
- оцінити поточний стан розвитку електромобільного транспорту в Україні та визначити основні бар'єри на шляху його поширення;

– дослідити міжнародний досвід впровадження концепцій «розумної мобільності» і «міста 15 хвилин»;

– сформулювати пропозиції щодо адаптації урбаністичних та інженерних практик у контексті сталого транспорту.

Основна частина дослідження.

Автомобіль безперечно став одним із найвпливовіших технічних винаходів, що докорінно змінив уявлення про мобільність, організацію праці, логістику та просторову структуру міст [3]. Його масове поширення сприяло підвищенню особистої свободи пересування, дало змогу швидше долати відстані між місцем проживання та роботою, зменшило ізоляцію сільських і віддалених територій. Для бізнесу автомобіль став каталізатором розвитку: логістика, торгівля, будівництво, аграрний сектор і сфера послуг активно використовують цей транспорт як

базовий інструмент функціонування. Крім того, автомобільна індустрія стимулює суміжні галузі – виробництво пального, мастил, шин, акумуляторів, автомобільного скла, електроніки, а також створює мільйони робочих місць у сферах технічного сервісу і страхування.

Автомобіль став символом прогресу та індивідуальної свободи. Спершу його могли дозволити собі лише заможні верстви населення, проте з розвитком масового виробництва ситуація змінилася. У США, Західній Європі, а згодом і в інших країнах стрімко зростала кількість приватного транспорту. В Україні, особливо після здобуття незалежності, автомобілізація стала показником добробуту і статусу. Серед наведених 192 країн Україна посідає 71 місце, і ця тенденція з кожним роком плавно зростає (рис. 1).

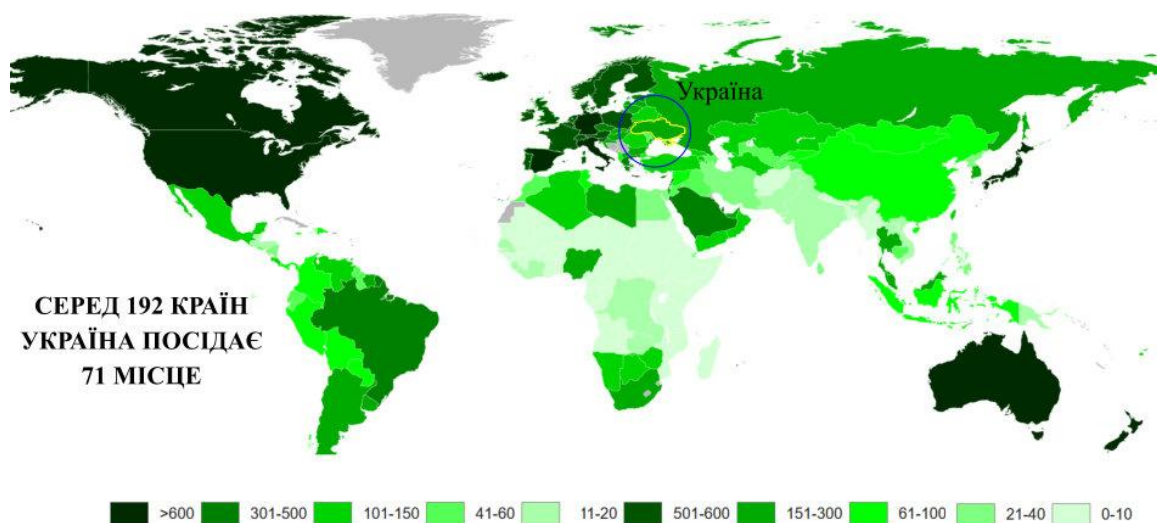


Рис. 1. Рівень автомобілізації країн світу [6]

Проте масова автомобілізація принесла не лише переваги. Із часом стали дедалі помітнішими її негативні наслідки, як соціального, так і техніко-екологічного характеру. Насамперед це перевантаження дорожньої інфраструктури – багато вулиць і доріг, спроектованих десятиліття тому, просто не розраховані на сучасний обсяг транспорту. Результатом цього стали

транспортні затори, які, за дослідженням INRIX Global Traffic Scorecard [7], щорічно «коштують» мегаполісам мільярди доларів у втрачений час, пальне та знижену продуктивність.

Ще одним важливим аспектом є погіршення екологічної ситуації. Транспортний сектор є одним із головних джерел забруднення довкілля. У

відпрацьованих газах двигунів автомобілів міститься більше 200 токсичних хімічних сполук, велика частина яких різні вуглеводні [8]. У густонаселених районах це призводить до підвищення рівня респіраторних захворювань, алергій і хронічних захворювань. За даними Європейського агентства з навколишнього середовища (ЕЕА), викиди транспорту становлять понад 25 % загального обсягу парникових газів у ЄС, і ця частка продовжує зростати у країнах із високим рівнем автомобілізації [9].

Соціальний простір міст також зазнає деформації: автомобілі «з'їдають» вулиці, площі та громадські простори, змінюючи пріоритети з людини на техніку. У багатьох містах до 30 % території відведено під дороги і паркування, що знижує якість життя, обмежує пішохідну доступність і ускладнює розвиток громадського транспорту [10]. Паркування часто займає тротуари, внутрішні двори та зелені зони, порушуючи архітектурний баланс міського середовища.

Крім того, зростання кількості автомобілів безпосередньо впливає на безпеку дорожнього руху. Попри покращення технічних характеристик і активне впровадження електронних систем допомоги водієві, кількість дорожньо-транспортних пригод, зокрема з летальними наслідками, у багатьох країнах залишається високою. За статистикою ВООЗ, щороку внаслідок дорожньо-транспортних пригод у світі гине понад 1,3 млн людей, а ще десятки мільйонів отримують травми [11].

Автомобіль як технічне досягнення має амбівалентну природу: з одного боку, він уособлює прогрес, свободу та ефективність; з іншого – несе суттєві соціальні, екологічні та просторові ризики. Збалансований розвиток транспортної політики потребує переосмислення ролі автомобіля в місті, інтеграції альтернативних видів мобільності, раціонального використання простору та переходу до сталих транспортних рішень.

Сучасна транспортна система охоплює широкий спектр засобів пересування, кожен із яких виконує специфічну функцію в забезпеченні мобільності населення та економіки.

Найпоширенішими залишаються легкові автомобілі, які є основним способом переміщення в більшості країн завдяки зручності та індивідуальній доступності. Вантажні транспортні засоби, зокрема, становлять основу логістики, забезпечуючи перевезення товарів у межах міст і між регіонами. Громадський транспорт відіграє критичну роль у зменшенні заторів і зниженні викидів у містах, надаючи ефективну альтернативу приватним авто. Останніми роками стрімко зростає частка електромобілів і гібридів, які відповідають на екологічні виклики, зменшуючи залежність від викопного палива.

Серед найбільш актуальних проблем, що стримують сталий розвиток транспортної системи, виділяють застарілу дорожню інфраструктуру, що не відповідає сучасним навантаженням і стандартам безпеки; високий рівень фізичного та морального зносу транспорту, особливо в сегменті громадських перевезень; недостатню кількість зарядних станцій для електромобілів, сконцентрованих у великих містах і майже повною відсутніх у сільських регіонах; відсутність стратегічного планування міської мобільності як на рівні держави, так і більшості муніципалітетів [12].

Поширення електромобілів стало глобальною тенденцією в контексті боротьби з кліматичними змінами та зменшенням викидів парникових газів [4]. У Норвегії, яка є світовим лідером у впровадженні електромобілів, понад 80 % нових зареєстрованих авто у 2024 році мали електричний привод [13]. Такий результат став можливим завдяки потужним державним стимулам: звільненням від ПДВ і дорожнього збору, пріоритетному паркуванню, можливості рухатися смугою громадського транспорту. У Китаї, найбільшому у світі ринку електричного

транспорту, розвивається ціла екосистема виробництва, субсидій і зарядної інфраструктури, що дало змогу країні стати лідером у виробництві тягових батарей і електромобілів (BYD, NIO тощо). Китай зосередився на індустріальному аспекті – країна виробляє понад 60 % електромобілів у світі, а також розвинула найбільшу у світі мережу зарядних станцій – понад 2,7 млн зарядних точок [14].

У країнах Центрально-Східної Європи ситуація є менш динамічною. Наприклад, у Польщі лише близько 2 % нових авто у 2023 р. були повністю електричними, а в Румунії та Болгарії ці показники ще нижчі [15].

За даними МВС, станом на 2025 рік в Україні зареєстровано понад 9 млн автомобілів, причому переважна більшість із них – це вживані транспортні засоби, імпортовані переважно з країн Європейського Союзу [16]. Така структура автопарку зумовлена як обмеженою купівельною спроможністю населення, так і відсутністю дієвих програм оновлення автотранспорту. Порівняно з країнами ЄС, де активно підтримують перехід на сучасні та екологічні моделі, в Україні все ще домінують авто з дизельними двигунами, старші за 10 років.

Частка електромобілів в Україні, хоч і зростає динамічно, проте поки становить лише близько 2 % загального автопарку. Основна маса таких транспортних засобів – це вживані Nissan Leaf, Tesla Model S і Renault Zoe, завезені зі США та Європи [17]. На відміну від розвинених країн, де електромобілі підтримують системою пільг, субсидій та інфраструктурних рішень, в Україні цей процес залишається фрагментарним і переважно ринково орієнтованим. І хоча в останні роки в окремих містах з'явилися локальні програми стимулювання електротранспорту, вони поки що не мають системного характеру.

Порівняємо рівень електромобілізації з кількістю зарядних станцій і середнім навантаженням на одну зарядну станцію для різних країн за 2024 рік. Графік на рис. 2 ілюструє частку електромобілів серед нових авто (сірі стовпчики) і кількість зарядних станцій (зелена лінія) у різних країнах у 2024 році. Масштаб для зарядних станцій логарифмічний, щоб коректно відобразити суттєві розбіжності між країнами. Менші значення середнього навантаження на одну зарядну станцію (рис. 3) означає кращу інфраструктурну доступність для електромобілів.

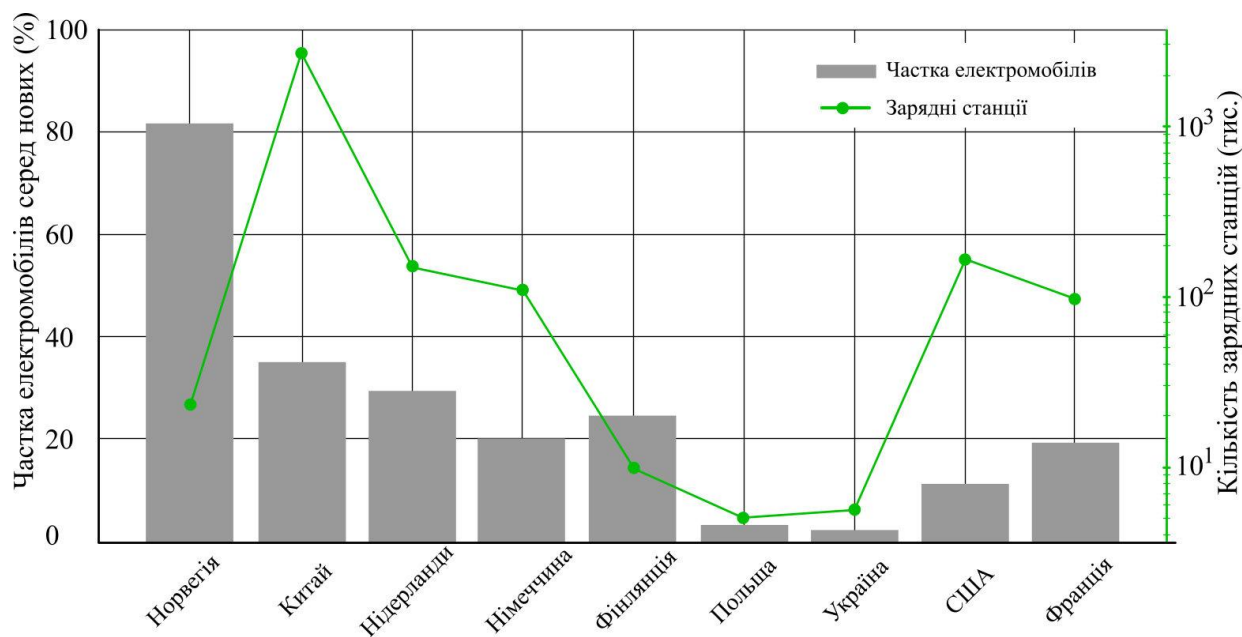


Рис. 2. Електромобілізація та зарядна інфраструктура в різних країнах

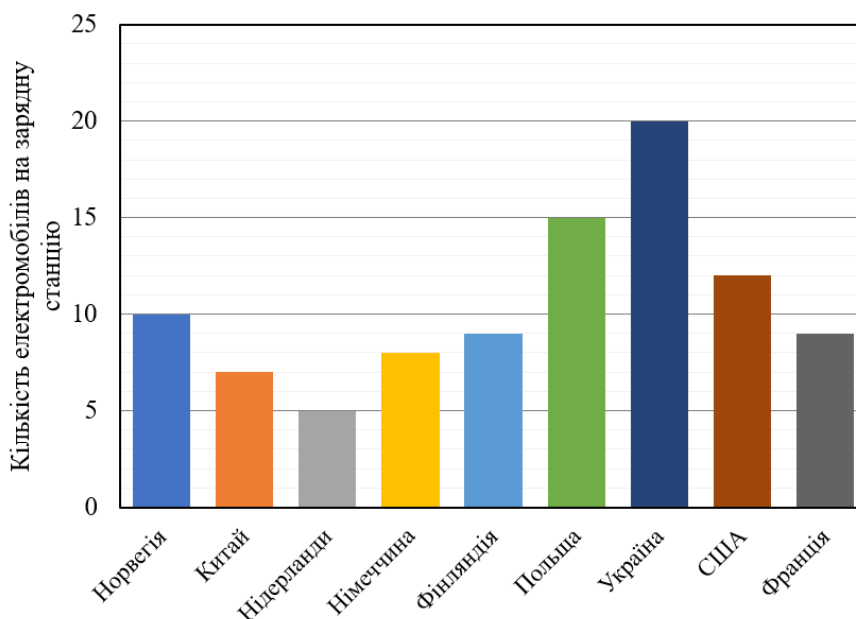


Рис. 3. Середня кількість автомобілів на одну зарядну станцію

Жодна технічна інновація не реалізована без відповідної інституційної та соціальної підтримки. Успішне впровадження сталої мобільності залежить від послідовної політики держави, дій органів місцевого самоврядування, а також рівня свідомості громадян. Насамперед необхідні інвестиції у громадський транспорт, який має стати конкурентоспроможним за зручністю, швидкістю і безпекою. Паралельно має розвиватись інфраструктура для велосипедного та пішохідного руху, що стимулює екологічно безпечні способи пересування. Важливу роль відіграє регулювання автомобільного імпорту, зокрема підтримка «зелених» технологій через податкові пільги, субсидії на електротранспорт та обмеження для надмірно забруднюючих моделей.

Наприклад, у Франції та Німеччині діють національні програми підтримки екомобільності, що включають субсидії на придбання електромобіля, встановлення зарядної інфраструктури та розвиток громадського транспорту [18, 19]. У Швеції 40 % державного бюджету на транспорт

інвестують у залізничне сполучення та інфраструктуру для велосипедистів [20].

Паралельно розвивають мікромобільність – велосипеди, електричні самокати, моноколеса, що зручні для коротких дистанцій і сприяють сталому пересуванню в межах міської забудови. Особливого значення набуває розвиток безпілотних транспортних засобів, які мають потенціал змінити уявлення про безпеку та автоматизацію дорожнього руху. Водночас активно впроваджують концепцію «Мобільність як послуга» або «Транспортні засоби як сервіс», яка об'єднує різні види транспорту в єдину цифрову платформу для планування, бронювання та оплати поїздок, відкриваючи шлях до гнучкої, інтегрованої та користувацько-орієнтованої мобільності [5, 21].

Попри це в транспортній політиці України є позитивні зрушення. Наприклад, розширюють велосипедну інфраструктуру в містах-мільйонниках (Київ, Львів, Дніпро), створюють пішохідні зони, запроваджують локальні ініціативи щодо «зеленої» мобільності. Крім того, спостерігають активізацію громадянських ініціатив та

урбаністичних проєктів, які підвищують рівень обізнаності населення про переваги сталого транспорту.

Традиційна модель власного автомобіля все більше поступається місцем концепції розумної мобільності, яка ґрунтується на гнучкому виборі способу пересування залежно від потреб. У цьому контексті стрімко поширюється модель «Транспортні засоби як сервіс» – єдиний цифровий сервіс, що поєднує кілька видів транспорту (громадський транспорт, каршеринг, прокат велосипедів, електричних самокатів, таксі) в одному застосунку.

Найбільш відомим прикладом є платформа Whim у Гельсінкі, яка дає змогу користувачам оплатити разову поїздку або придбати щомісячну підписку і пересуватися всім доступним транспортом без додаткових витрат. Схожі сервіси активно діють у Нідерландах (Tranzer), Німеччині (Jelbi), Японії (Navitime), Австралії (SkedGo). За оцінкою Європейської асоціації MaaS Alliance, до 2030 року до 25 % міських перевезень у ЄС можуть бути здійснювані через спільні сервісні платформи [21].

В Україні наразі відсутня єдина національна система, проте в окремих містах реалізовано фрагментарні рішення: сервіси прокату самокатів (Bolt, Kiwi, Zelectra), мобільні додатки для розкладу транспорту (EasyWay, Kyiv Digital), локальні системи каршерингу. Основними викликами залишаються відсутність законодавчої бази, стандартизованих відкритих даних, інтеграції між операторами та загальної цифрової стратегії на рівні держави. Проте успішний міжнародний досвід демонструє: навіть невеликі муніципалітети можуть реалізувати цифрову мобільність за умови політичної волі та підтримки з боку технологічного сектору.

Водночас у країнах із перехідною економікою, таких як Україна, стратегічне планування транспортної політики часто обмежене поточними викликами –

відновленням інфраструктури, економічними кризами, енергетичною нестабільністю, воєнними діями. Проте навіть у цих умовах можлива реалізація локальних ініціатив: зростає кількість велосипедних доріжок, розвиваються муніципальні платформи цифрової взаємодії з користувачами транспорту, з'являються громадські ініціативи з просування сталої мобільності. Соціальна активність і попит на якісний транспорт із боку громади – важливий стимул для впровадження змін.

В Україні потенціал державної участі залишається недовикористаним. Незважаючи на наявність програми з електротранспорту, відсутній системний план сталої мобільності, а фінансування громадського транспорту нерівномірне та обмежене. Позитивними прикладами є тролейбусні та трамвайні оновлення у Вінниці, Львові, Дніпрі, а також запуск єдиних цифрових сервісів у Києві. На рівні громадянського суспільства зростає зацікавленість темою сталої мобільності – реалізують урбаністичні ініціативи, проводять кампанії з популяризації пішохідного та велосипедного руху.

Однією з провідних тенденцій у розвитку сучасних міст є глибока цифрова трансформація транспортної інфраструктури. Вона охоплює не лише автоматизацію окремих процесів, а й створення єдиних інтегрованих систем управління міською мобільністю. Сучасні мегаполіси активно впроваджують інтелектуальні транспортні системи, що забезпечують оперативне управління потоком на основі даних у реальному часі. Зокрема, застосовують адаптивні світлофори, які автоматично змінюють фази залежно від інтенсивності руху, системи контролю заторів, що прогнозують перевантаження на основі історичних і поточних даних.

У розвинених сучасних містах функціонують центри управління мобільністю – цифрові мозкові центри міста

[22]. Вони поєднують дані з відеокамер, GPS-навігаторів громадського транспорту, дорожніх сенсорів, а також смартфонів користувачів, щоб у режимі реального часу координувати транспортні потоки, перенаправляти маршрути, знижувати навантаження на критичні ділянки, а за потреби швидко реагувати на ДТП або інші інциденти. Головну роль у цьому відіграють алгоритми машинного навчання і штучного інтелекту, які аналізують поведінку транспортних засобів і пропонують оптимальні сценарії розподілу потоків. У результаті впровадження таких технологій досягають низки ефектів: зменшення заторів і часу в дорозі, скорочення шкідливих викидів за рахунок зниження кількості простоїв, економія пального, а також підвищення рівня безпеки завдяки кращій видимості й прогнозованості дорожніх ситуацій. Більш того, цифрова інфраструктура створює основу для подальшого розвитку автономного транспорту, який потребує глибоко інтерактивного та взаємопов'язаного міського середовища.

Не менш значущим напрямом змін у транспортній та урбаністичній політиці є переформатування міського простору з орієнтацією на комфорт і доступність для мешканців. Однією з найбільш впливових ідей останнього десятиліття стала концепція «міста 15 хвилин», автором якої є французький урбаніст Карлос Морено [23]. Її суть полягає у створенні такого просторового середовища, де кожна людина може задовольнити всі основні потреби – від освіти і роботи до шопінгу, дозвілля та охорони здоров'я – не залишаючи меж свого району, тобто в межах 15 хвилин пішої або велосипедної доступності.

Реалізація цієї моделі потребує радикального перегляду принципів міського планування. На перше місце поставлено особистісний підхід: формують компактні, багатофункціональні квартали, де житло поєднано з офісами, закладами освіти, охорони здоров'я, парками, кафе та

сервісами. Такий простір має бути зручним, безпечним і привабливим для пішоходів, тому в проєктах передбачають широкі тротуари, озеленення, доступну інфраструктуру для маломобільних груп населення.

У рамках цієї концепції пріоритет надано громадському транспорту, мікромобільності та активним видам пересування – велосипедам, електросамокатам, іноді навіть водному транспорту. Зменшення ролі приватного автотранспорту відбувається через обмеження руху в центральних районах, перетворення вулиць на пішохідні зони, впровадження політики «тихих кварталів», а також розвиток транспортного хабу на периферії, щоб перехоплювати транспортний потік.

На практиці ця модель успішно реалізована в Парижі, де мерія під керівництвом Анн Ідальго активно впроваджує зони з обмеженим автомобільним рухом, розширює велосипедну інфраструктуру і створює нові освітні та культурні простори в житлових районах [24]. Копенгаген і Ванкувер стали піонерами інтеграції зелених коридорів і міського садівництва до транспортного планування, а в Мілані після пандемії COVID-19 розпочали системну реконструкцію вулиць для створення середовища, зручного для пішоходів і велосипедистів [25].

Крім інфраструктурних і фінансових заходів, важливою є освітня та інформаційна політика. Формування культури відповідального користування транспортом, дотримання правил дорожнього руху, розуміння переваг громадського та альтернативного транспорту – це передумови для сталих змін.

Взаємодія держави, наукової спільноти, бізнесу і громадянського суспільства дає змогу побудувати транспортну систему, яка не лише ефективна технічно, а й справедливо соціально. Саме завдяки такій взаємодії

міжнародні приклади стали успішними й можуть бути адаптовані в Україні з урахуванням національного контексту.

Висновки:

1. Інтенсивна автомобілізація виявляє мультиаспектний негативний вплив: перевантаження дорожньої мережі, зростання заторів і пов'язаних економічних збитків, деградацію громадського простору і погіршення екологічних показників. Для пом'якшення наслідків потрібен комплексний підхід: пріоритет інвестицій у громадський транспорт, перерозподіл простору, розвиток активної мобільності та інтегроване просторове планування.

2. В Україні частка електромобілів зростає, але залишається низькою порівняно з провідними країнами через такі бар'єри: нерівномірна зарядна інфраструктура, відсутність системних стимулів і фінансових механізмів, великий парк старих вживаних автомобілів. Для подолання бар'єрів необхідні розвиток національної мережі зарядних станцій, податкові та інші

економічні стимули, програми оновлення парку.

3. Міжнародна практика демонструє, що успіх концепцій залежить від синергії інфраструктурних змін, цифрових сервісів і політичної волі. Основні фактори успішної адаптації: інтегровані цифрові платформи, пріоритет громадської та мікромобільності, реорганізація простору на рівні кварталів. Для українських міст потрібні пілотні проєкти на муніципальному рівні з подальшими масштабуванням і адаптацією до місцевого контексту.

4. На основі аналізу можна запропонувати таке: а) розробити поетапну інфраструктурну стратегію (зокрема мережу зарядних станцій і веломережу); б) впроваджувати адаптивні системи керування потоком; в) активізувати політику стимулів для «зелених» технологій; г) закласти вимоги щодо відкритих даних і стандартів для сервісних платформ; д) включити прозорі оцінки з ухваленням рішень щодо закупівель і субсидування.

Список використаних джерел

1. Козак С. В., Хітров І. О. Безпека транспортної діяльності та аналіз ефективності персонального електричного транспорту шляхом включення до єдиної транспортної системи України. *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті*. Луцьк, 2025. № 1(24). С. 226–232. <https://doi.org/10.36910/automash.v1i24.1727>.
2. Чаркіна Т. Ю., Задоя В. О., Юрчик О. А. Сучасний стан та перспективи розвитку відновлення і розбудови транспортної інфраструктури в Україні. *Агросвіт*. 2024. № 6. С. 103–112.
3. Марков О. Д. Вплив інфраструктури на ефективність автомобілізації. *Економіка та управління на транспорті*. 2017. Вип. 5. С. 166–175.
4. Santos G., Davies H. Incentives for quick penetration of electric vehicles in five European countries: Perceptions from experts and stakeholders. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. 2020. Vol. 137. P. 326–342. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2018.10.034>.
5. Hasselwander M., Bigotte Joao F. Mobility as a Service (MaaS) in the Global South: research findings, gaps, and directions. *European Transport Research Review*. 2023. № 27. <https://doi.org/10.1186/s12544-023-00604-2>.
6. List of countries and territories by motor vehicles per capita. Wikipedia: вебсайт. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_countries_and_territories_by_motor_vehicles_per_capita (дата звернення: 10.07.2025).
7. INRIX 2023 Global Traffic Scorecard: London most congested city in Europe; congestion costing the UK £7.5 billion. INRIX: вебсайт. URL: <https://inrix.com/press-releases/2023-global-traffic-scorecard-uk/> (дата звернення: 10.07.2025).

8. Автотранспорт і навколишнє середовище: проблеми і шляхи їхнього вирішення. Запорізька державна обласна адміністрація: вебсайт. URL: <https://www.zoda.gov.ua/news/7207/avtotransport-i-navkolishnjeseredovishe-problemi-i-shlyahi-jihnogo-virishennya.html> (дата звернення: 14.07.2025).
9. Climate. European Environment Agency: вебсайт. URL: <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/sustainability-of-europes-mobility-systems/climate> (дата звернення: 14.07.2025).
10. Litman T. Why and How to Reduce the Amount of Land Paved for Roads and Parking Facilities. *Environmental Practice*. 2011. № 13(1). P. 38–46. URL: https://www.vtpi.org/EP_Pav.pdf.
11. Road traffic injuries. World Health Organization: вебсайт. URL: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/road-traffic-injuries> (дата звернення: 14.07.2025).
12. Low N. (Ed.). *Transforming Urban Transport: The ethics, politics and practices of sustainable mobility*. Routledge, New York. 2013.
13. Adomaitis Nerijus. In Norway, nearly all new cars sold in 2024 were fully electric. Reuters: вебсайт. URL: <https://surl.lt/xdzdm0> (дата звернення: 15.07.2025).
14. How China pulled ahead to become the world leader in electric vehicles. The Washington Post: вебсайт. URL: <https://www.washingtonpost.com/world/2025/03/03/china-electric-vehicles-jinhua-leapmotor/> (дата звернення: 15.07.2025).
15. Romania leads CEE for EV adoption. Central European Times: вебсайт. URL: <https://centraleuropeantimes.com/romania-leads-cee-for-ev-adoption/> (дата звернення: 14.07.2025).
16. Скільки насправді машин в Україні: багато чи мало? Auto24: вебсайт. URL: https://auto.24tv.ua/skilky_naspravdi_mashyn_v_ukraini_bahato_chy_malo_n43694 (дата звернення: 15.07.2025).
17. У червні в Україні зареєстровано майже 9 тисяч електромобілів: які авто в лідерах. Delo: вебсайт. URL: <https://delo.ua/news/u-cervni-v-ukrayini-zarejestrovano-maize-9-tisyac-elektromobiliv-yaki-avto-v-liderax-449032/> (дата звернення: 15.07.2025).
18. Les dispositifs de soutien à l'innovation pour les transports portés par l'Etat. URL: <https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/documents/Dispositifs%20soutien%20%C3%A0%20l%27innovation.pdf?v=1713861436>.
19. Kaufprämie für Elektroautos erhöht. Die Bundesregierung: вебсайт. URL: <https://www.bundesregierung.de/breg-de/schwerpunkte/kaufpraemie-fuer-elektroautos-erhoeht-369482> (дата звернення: 16.07.2025).
20. Sweden: National-level objectives. Nordregio: вебсайт. URL: <https://pub.nordregio.org/wp-2023-8-nordic-cycling-policy/sweden.html> (дата звернення: 16.07.2025).
21. Mobility as a Service. Future mobility Finland: вебсайт. URL: <https://futuremobilityfinland.fi/vision/mobility-as-a-service/> (дата звернення: 17.07.2025).
22. Urban mobility control and monitoring centre. Civitas: вебсайт. URL: <https://civitas.eu/mobility-solutions/urban-mobility-control-and-monitoring-centre> (дата звернення: 17.07.2025).
23. Carlos Moreno. The 15-minute city: rethinking our urban life in the 21st century. The Institute of Environmental Management and Assessment: вебсайт. URL: <https://www.iema.net/engage/transform/features/the-15-minute-city-rethinking-our-urban-life-in-the-21st-century/> (дата звернення: 17.07.2025).
24. La zone à trafic limité d'Anne Hidalgo: impact écologique minimal, exclusion maximale. Le Figaro: вебсайт. URL: <https://www.lefigaro.fr/vox/societe/la-zone-a-traffic-limite-d-anne-hidalgo-impact-ecologique-minimal-exclusion-maximale-20240426> (дата звернення: 17.07.2025).

25. Burca J. Green Infrastructure: Building the Foundation for Sustainability. Constructive-voices: вебсайт. URL: <https://constructive-voices.com/urban-planning-for-sustainable-communities-lessons-from-eco-friendly-cities/> (дата звернення: 17.07.2025).

Хітров Ігор Олександрович, кандидат технічних наук, доцент кафедри транспортних технологій і технічного сервісу, Національний університет водного господарства та природокористування. ORCID iD: 0000-0003-2310-1472. Тел.: +38 (099) 295-97-70. E-mail: i.o.khitrov@nuwm.edu.ua.

Ihor Khitrov, PhD (Tech). Associate Professor, department of the Transport Technology and Technical Service, National University of Water and Environmental Engineering. ORCID iD: 0000-0003-2310-1472. Tel.: +38 (099) 295-97-70. E-mail: i.o.khitrov@nuwm.edu.ua.

Статтю прийнято 20.09.2025 р.

УДК 656.073.7

ОПТИМІЗАЦІЯ СКЛАДСЬКИХ ПРОЦЕСІВ У МІЖНАРОДНИХ ЛОГІСТИЧНИХ ХАБАХ ЗА РАХУНОК ВИКОРИСТАННЯ БАГАТОВІСНИХ НАВАНТАЖУВАЧІВ

Доктори техн. наук М. А. Подригало, Д. В. Абрамов, А. І. Коробко

OPTIMIZING WAREHOUSE OPERATIONS IN INTERNATIONAL LOGISTICS HUBS USING MULTI-AXLE FORKLIFTS

Dr. Sc. (Tech.) M. A. Podrigalo, Dr. Sc. (Tech.) D. V. Abramov,
Dr. Sc. (Tech.) A. I. Korobko

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.213.2025.342031>

Анотація. У статті досліджено питання підвищення ефективності виконання операцій з обробки вантажів у міжнародних логістичних хабах, які можуть ставати «вузькими місцями» у ланцюгах постачань через використання застарілих технологій в умовах обмеженого простору. У результаті проведення експериментальних досліджень отримано дані, на основі яких проведено порівняльний аналіз двох сценаріїв: базового, із використанням стандартного електричного навантажувача, і запропонованого, що передбачає експлуатацію інноваційного високоманеврового багатовісного навантажувача.

Ключові слова: доставлення, вантаж, міжнародний логістичний хаб, навантажувач, ефективність, витрати, графік роботи.

Abstract. In the context of rapid globalization and the intensification of e-commerce, international logistics hubs are operating at the limit of their throughput capacities, often becoming bottlenecks in global supply chains. The primary cause of low operational efficiency is the use of technologically outdated material handling equipment within physically constrained spaces. The objective of this study is to conduct a comprehensive comparative analysis of the operational and economic efficiency of standard forklifts versus innovative, high-maneuverability, multi-axle loading mechanisms to quantitatively justify the feasibility of their implementation.

To achieve this objective, the method of system modeling was employed, enabling a comparative analysis of two operational scenarios for a warehouse complex. The baseline scenario

involved the operation of a standard electric forklift, the TOYOTA Traigo 8FBMK20T, while the proposed scenario featured a high-maneuverability, multi-axle forklift equipped with two dual-axle rotating platforms. These platforms provide unique kinematic capabilities, including lateral ('crab') movement and rotation around its own axis. The analysis was based on the calculation of key performance indicators across a range of transport distances from 50 to 500 meters. The modeling results demonstrated significant advantages of the proposed technology. For an average transport distance of 300 meters, the work cycle time for the high-maneuverability forklift was reduced by 21 %, leading to a corresponding increase in operational productivity of 26.6 %. Consequently, to handle a maximum daily cargo turnover of 500 tons, 22 % fewer units of equipment are required (38 versus 49), which generates direct savings in operational costs of up to UAH 8,800 per day.

It is proven that investing in high-maneuverability equipment is not merely an operational upgrade but a strategic tool. It allows for a fundamental increase in warehouse capacity due to the ability to operate in narrower aisles, thereby avoiding capital expenditures on facility expansion and enhancing the competitiveness of the logistics hub in the international market.

Keywords: *delivery, cargo, international logistics hub, forklift, efficiency, costs, work schedule.*

Вступ. Ринок міжнародних перевезень вантажів демонструє стрімке зростання, зумовлене розвитком електронної комерції, глобалізацією ринків і підвищенням вимог споживачів щодо швидкості та якості доставлення. У цих умовах ефективність кожного елемента логістичного ланцюга стає критично важливою. Основною ланкою в цьому процесі є транспортно-складські термінали та логістичні хаби, де відбуваються операції з консолідації, сортування, митного оформлення та перевантаження вантажів.

Проте саме ці вузли часто стають «вузькими місцями», що стримують загальну пропускну здатність системи. Основною причиною є використання застарілої інфраструктури і технологій, що особливо гостро проявляється в умовах обмеженого простору [1]. Неефективне переміщення вантажів усередині складу призводить до збільшення часу обробки замовлень, зростання витрат на робочу силу та експлуатацію техніки і, як наслідок, зниження конкурентоспроможності всього ланцюга постачань.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Складська логістика пройшла шлях від допоміжної функції до основного елемента, що визначає ефективність міжнародних перевезень. Склади відійшли від своєї традиційної ролі простих місць для

зберігання і стали центральними, динамічними вузлами глобальних ланцюгів постачання. Їхня функція більше не обмежена лише збереженням товарів. Сучасні склади виконують критично важливі операції, такі як приймання, сортування, пакування, розподіл та оптимізація руху вантажів. Ця комплексна трансформація дає змогу компаніям не лише мінімізувати операційні витрати, але і значно підвищити ефективність, забезпечуючи тим самим конкурентні переваги на міжнародному ринку.

Роль складських приміщень у сучасній логістиці можна розглядати через призму трьох основних функцій [2–4]:

- централізоване зберігання та управління запасами. Склади є централізованими хабами, що концентрують товари в одному місці. Це спрощує управління інвентаризацією, підвищує точність обліку, яка може сягати 95 %, і скорочує кількість необхідних фізичних приміщень. Такий підхід є основою для швидкого реагування на мінливі ринкові умови, що особливо важливо для галузей, як-от електронна комерція, де швидкість має вирішальне значення;

- оптимізація дистрибуції та доставлення «останньої милі». Сучасні склади розташовані поблизу великих

транспортних вузлів – автомагістралей, залізничних станцій, портів чи аеропортів – і поблизу ринків. Це стратегічне розташування дає змогу скоротити час і витрати на доставлення, що є особливо критичним для доставлення «останньої милі», де витрати на маршрутизацію можуть бути знижені на 15–30 %;

– зниження витрат і операційна ефективність. Використання міжнародних складських послуг допомагає суттєво зменшити витрати. Об'єднання невеликих партій в одну велику відправку та краще планування маршрутів можуть скоротити логістичні витрати до 25 %. Зберігання товарів у централізованому місці зменшує потребу в багаторазових поїздках, що у свою чергу призводить до економії пального і трудових ресурсів.

Сучасний склад є не просто місцем зберігання, а багатофункціональним логістичним вузлом, який виконує низку критичних завдань у ланцюзі постачань. До нових функцій належать:

– консолідація та крос-докінг, згрупування вантажів від різних постачальників або переміщення товарів без тривалого зберігання;

– виконання замовлень, комплектування, пакування та маркування для відправлення кінцевим споживачем;

– контроль якості, перевірка продукції щодо відповідності стандартам, відсутності пошкоджень і дотримання умов зберігання;

– буферизація запасів, створення «буферного» запасу для пом'якшення коливань попиту і пропозиції;

– зворотна логістика, приймання, сортування та обробка повернутих товарів;

– локалізація, стратегічне розміщення складів ближче до цільових ринків для скорочення часу доставлення.

Ці розширені ролі демонструють, що сучасні склади є активними, динамічними елементами логістичних мереж, які адаптуються до вимог електронної комерції. Одним із найпомітніших проявів еволюції функцій складу є широке застосування

стратегій консолідації та крос-докінгу. Консолідація вантажів – це об'єднання двох або більше малих вантажів від різних відправників в одну повну партію, щоб ефективніше використовувати транспортні засоби. За результатами досліджень [5, 6], така практика дає змогу скоротити загальні витрати до 40 %, зменшити викиди і ризик пошкодження продукції. Отже, консолідація є не лише економічно вигідною, але й екологічно відповідальною стратегією.

Крос-докінг – це метод, за якого товари переміщують безпосередньо з вхідного транспорту на вихідний із мінімальним або відсутнім зберіганням. Ця стратегія дає змогу значно скоротити час доставлення та витрати на зберігання, а також підвищити загальну ефективність логістичної системи. Дослідження показують, що крос-докінг, якщо його правильно впровадити, може сприяти значному скороченню часу виконання замовлень та оптимізації управління запасами [7, 8].

Оптимізація роботи складського господарства є важливим і складним завданням для організації доставлення різноманітних вантажів. При цьому необхідно вирішити цілий ряд завдань, що поєднують різні аспекти проектування, функціонування та ресурсного забезпечення можливості виконання складських операцій [9–11] (рис. 1).

Наразі одним з основних завдань ефективної організації складів є визначення відповідних технічних засобів для вантажно-розвантажувальних операцій і встановлення їхньої раціональної кількості, що є особливо важливим для використання вантажно-розвантажувального обладнання в обмеженому просторі. Крім того, в умовах воєнного стану виникає необхідність виконання вантажно-розвантажувальних операцій із вантажами військового значення.

Сучасні вимоги щодо складських операцій потребують розроблення і впровадження нових інноваційних транспортних засобів, які підвищують продуктивність складських операцій

завдяки збільшенню рівня маневреності та продуктивності таких транспортних засобів [12]. Для закритих складів особливо набуває важливості використання електричних моторів для вантажно-розвантажувального обладнання. Визначення технічних

характеристик і продуктивності таких транспортних засобів, а також розрахунок їхньої оптимальної кількості в умовах постійно змінюваного попиту на складські операції є досить складним і важливим завданням.



Рис. 1. Основні завдання оптимізації складського господарства

Планування спільної роботи вантажних автомобілів і вантажно-розвантажувальних пунктів є однією з найважливіших проблем на етапі оперативного планування перевезень. Часова та просторова невідповідність вантажоперевезень призводить до непотрібних простоїв рухомого складу під час очікування вантажно-розвантажувальних операцій, непотрібних простоїв вантажно-розвантажувальних механізмів під час очікування вантажівок, несвоєчасного доставлення товарів отримувачам і, отже, зниження ефективності всього транспортного комплексу в цілому. Використання графіків забезпечує застосування раціональних форм організації вантажних перевезень, координацію роботи окремих ланок, які беруть участь у цих перевезеннях, і створення єдиного транспортно-технологічного процесу. Використання графіків створює умови для встановлення раціонального співвідношення між вантажно-розвантажувальними механізмами та рухомим складом з урахуванням виробничої потужності постачальників, попиту споживачів і можливостей автотранспортних підприємств.

Розрахунок кількості навантажувальних засобів і розташування місць стоянки, приймання та видавання є особливо важливим для підвищення ефективності функціонування складського господарства. У цих точках навантажувачі завантажують, розвантажують, або вони можуть чекати замовлення.

Відповідна кількість навантажувачів у транспортній системі складів дуже важлива для забезпечення виконання всіх завдань у відведений час [13]. Однак вони зазвичай дуже дорогі, тому кількість навантажувачів не варто переоцінювати. Крім того, занадто багато транспортних засобів у системі може призвести до заторів. Усі рішення, ухвалені на етапі проектування, пов'язані з описаними вище питаннями, впливають на

ефективність і контроль транспортної системи.

Визначення мети та завдання дослідження. Мета роботи – порівняти і проаналізувати операційну та економічну ефективність стандартних вилкових навантажувачів та інноваційних високоманеврових навантажувальних механізмів в умовах функціонування сучасних міжнародних логістичних хабів. Дослідження спрямоване на кількісне обґрунтування переваг нової техніки через розрахунок і порівняння основних показників ефективності: часу робочого циклу, операційної продуктивності, раціональної кількості одиниць техніки для обробки заданого вантажопотоку та загальних витрат.

Основна частина дослідження. Сучасні міжнародні логістичні хаби функціонують в умовах безпрецедентного тиску, зумовленого глобалізацією ринків, стрімким розвитком електронної комерції та зростаючими очікуваннями клієнтів. Вимоги щодо швидкості обробки замовлень і скорочення часу виконання стали основними факторами конкурентоспроможності. Водночас оператори стикаються з високою мінливістю вантажопотоків, особливо під час сезонних піків, що потребує від інфраструктури максимальної гнучкості та масштабованості. У цих умовах традиційні підходи щодо організації складських процесів часто призводять до виникнення операційних «вузьких місць».

Додатково ускладнюють ситуацію зовнішні фактори: зростання вартості енергоносіїв, дефіцит кваліфікованого персоналу, підвищення вимог щодо екологічності та цифровізації логістики. У багатьох випадках складські термінали змушені одночасно обробляти як традиційні вантажопотоки, так і потоки, пов'язані з електронною комерцією, для яких характерні дрібніші партії та значно вища частота замовлень. Це створює додаткові виклики у сфері планування ресурсів,

управління запасами та координації транспортно-складських операцій.

Крім того, розвиток міжнародних перевезень в умовах воєнних ризиків і політичної нестабільності формує додаткові бар'єри для безперервності логістичних процесів. У таких обставинах особливої актуальності набувають інноваційні рішення, орієнтовані на підвищення маневреності технічних засобів, автоматизацію вантажообігу та впровадження систем прогнозування попиту і адаптивного планування графіків роботи.

Вибір підйомно-транспортного обладнання виходить далеко за межі простого операційного рішення – це стратегічна інвестиція, що визначає архітектуру, пропускну здатність і економіку всього логістичного хабу. Перехід від стандартних вилкових навантажувачів до високоманеврових, енергоефективних багатовісних навантажувачів, оснащених двома двовісними поворотними платформами, що забезпечує унікальні можливості руху, такі як рух «боком», «крабом» і поворот навколо власної вертикальної осі з мінімальним радіусом, – цей вибір створює фундаментальну перевагу, яка не може бути компенсована жодними іншими

оптимізаційними заходами. Для стандартного вилкового навантажувача через його конструктивні особливості потрібна значна ширина робочого коридору, щоб здійснювати 90-градусний поворот із палетою. Ця фізична вимога жорстко диктує мінімальну відстань між стелажними рядами, що у свою чергу обмежує їхню кількість у межах фіксованої площі будівлі. Отже, склад виявляється «замкненим» у субоптимальній конфігурації щільності зберігання. Це означає, що головний актив – сама будівля – використовується не на повну потужність. Інвестиція у високоманеврову техніку, яка здатна працювати у значно вужчих проходах, руйнує цю залежність.

В основі дослідження лежить системне моделювання для порівняльного аналізу двох сценаріїв. Базовий сценарій передбачає експлуатацію стандартного електричного навантажувального механізму (TOYOTA Traigo 8FBMK20T), тоді як альтернативний – впровадження високоманеврового та енергоефективного багатогодового навантажувального механізму (рис. 2) для оцінювання його потенційного впливу на операційну ефективність. Техніко-економічні показники прийнято за технічною документацією механізмів.

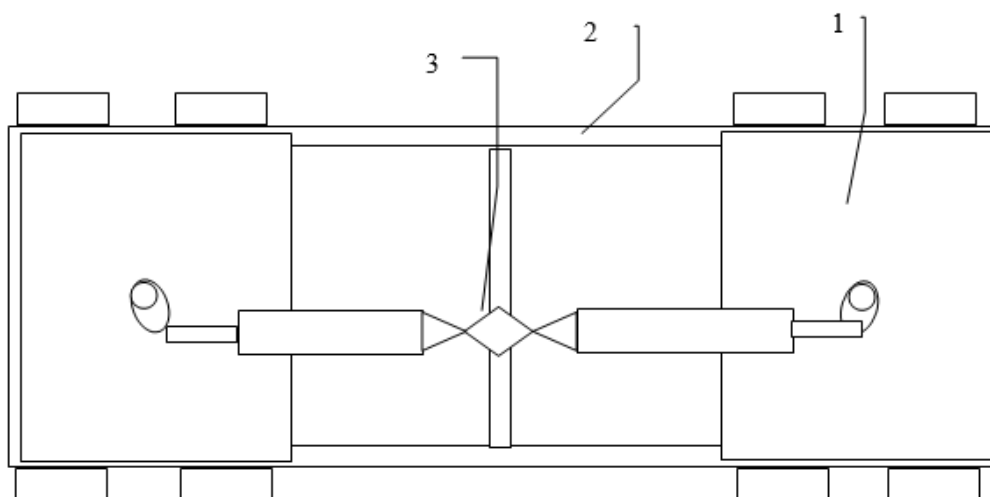


Рис. 2. Схематичне подання технічних особливостей високоманеврового багатовісного механізму для виконання складських робіт: 1 – поворотний візок із двома осями; 2 – основна рама автомобіля; 3 – гідравлічний механізм повертання візків

В основі аналізу лежить розрахунок часу робочого циклу транспортного засобу, що є загальним часом, необхідним для завершення одного повного циклу навантаження/розвантаження. Аналізували за різних відстаней внутрішнього перевезення на терміналі – від 50 м (від зони розвантаження до сусідньої зони митного огляду) до 500 м, що характеризує максимальну відстань переміщення на терміналі. Розрахунки, виконані за методикою визначення продуктивності механізмів циклічної дії, показали значну перевагу відносно продуктивності запропонованого високоманеврового навантажувача. Завдяки його передовим маневровим можливостям, які скорочують час на навігацію у вузьких проїздах і позиціонування для прибирання/вивантаження вантажу, його робочий цикл був стабільно коротшим.

Для середньої відстані внутрішнього транспортування 300 м і стандартного коефіцієнта використання обладнання 85 % із переміщенням вантажів, спакетованих на піддонах, були отримані такі результати:

– стандартний навантажувальний механізм: середній час циклу склав 225,8 с, що забезпечило операційну продуктивність 13,55 т/год.

– запропонований навантажувальний механізм: середній час циклу було скорочено до 178,35 с, що підвищило продуктивність до 17,16 т/год.

Це означає скорочення часу циклу на 21 % і відповідне збільшення продуктивності на 26,6 %. Таке підвищення продуктивності є критично важливим у контексті міжнародних перевезень, оскільки воно дає змогу швидше розвантажувати вхідні контейнери та швидше консолідувати вихідні відправлення, скорочуючи загальний час перебування товарів на терміналі.

Підвищена продуктивність безпосередньо призводить до потреби в меншій кількості навантажувальних механізмів для обробки того самого обсягу вантажу, що веде до суттєвих економічних переваг. Аналіз ураховував різні рівні вантажообігу, від 100 до 500 т на день, що є типовим для середнього міжнародного логістичного хабу [14]. Як показано на рис. 3, кількість необхідних навантажувальних механізмів значно нижча з використанням запропонованого навантажувача. Наприклад, для обробки максимального обсягу в 500 т знадобиться 49 стандартних навантажувачів і лише 38 запропонованих навантажувачів – скорочення на 11 одиниць, або понад 22 %.

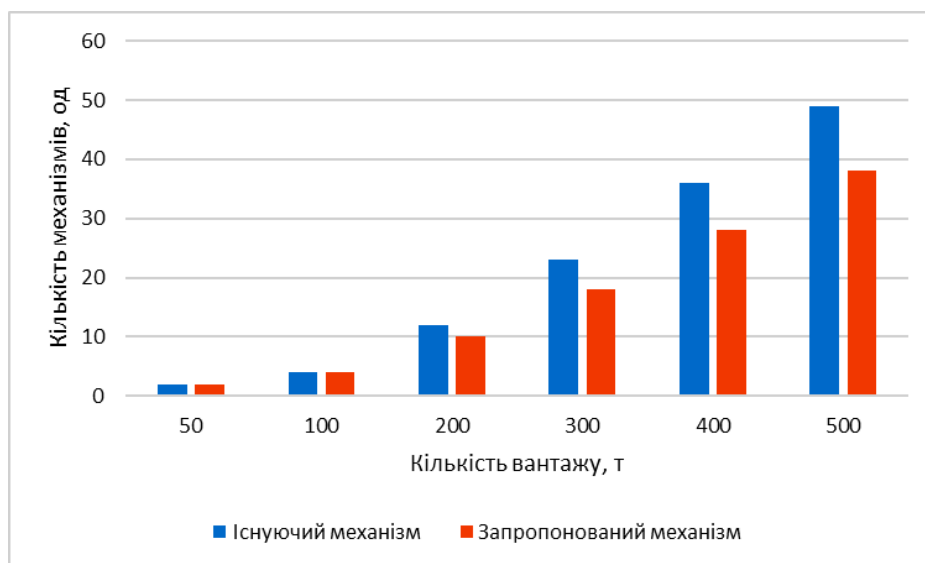


Рис. 3. Необхідна кількість навантажувальних механізмів залежно від обсягу вантажу

Таке скорочення необхідного парку навантажувачів у поєднанні з меншим споживанням енергії та швидшим обігом вантажів генерує значну економію операційних витрат. Аналіз витрат на обробку максимального обсягу вантажу

показав, що використання запропонованих навантажувальних механізмів дасть змогу скоротити щоденні операційні витрати на 8800 грн порівняно з базовим сценарієм (рис. 4).

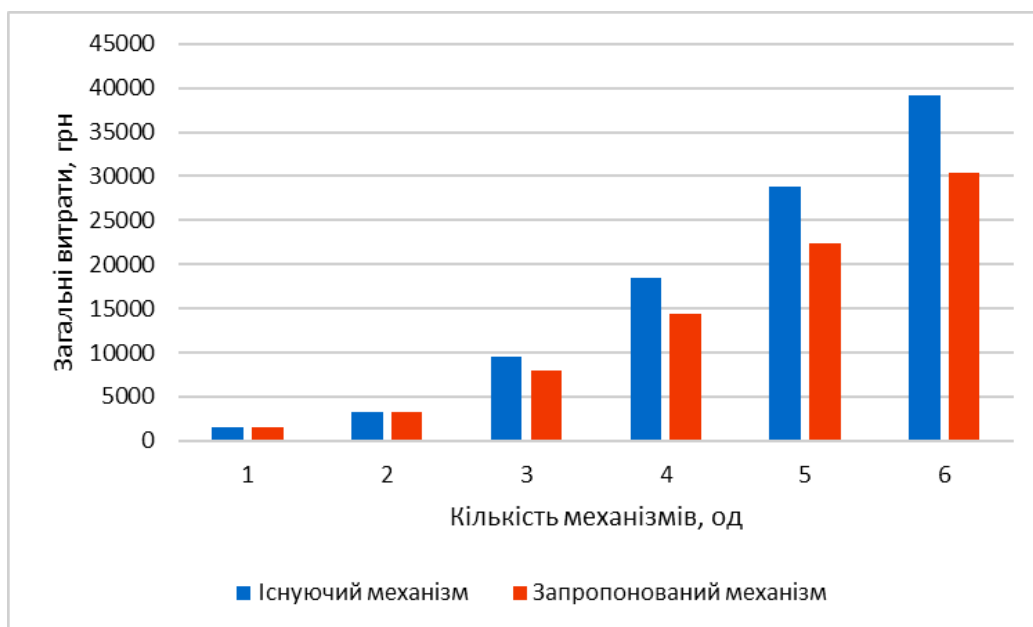


Рис. 4. Аналіз впливу кількості механізмів на загальні витрати

Висновки. Проведене дослідження доводить, що впровадження високоманеврових багатовісних навантажувачів є ефективним рішенням для підвищення продуктивності міжнародних логістичних хабів. Запропонований навантажувач демонструє значні переваги порівняно зі стандартною технікою. За рахунок унікальних маневрових можливостей, таких як рух «боком» і поворот із мінімальним радіусом, час робочого циклу скорочено на 21 %, що призводить до зростання продуктивності на 26,6 %. Підвищена продуктивність безпосередньо призводить до зменшення потреби в кількості техніки. Це не лише знижує капітальні інвестиції, але

і дає змогу уникнути заторів і неефективного використання простору.

Скорочення парку техніки та підвищення швидкості обробки вантажів генерує пряму економію загальних витрат. Аналіз показав, що за максимального завантаження хабу щоденна економія може сягати 8800 грн.

Отже, інвестиція у високоманеврову техніку є не просто операційною модернізацією, а і стратегічним інструментом, що дає змогу фундаментально збільшити ємність складу, уникнути витрат на розширення площ і підвищити конкурентоспроможність логістичного вузла.

Список використаних джерел

1. Kalinichenko O. & Pavlenko O. (2023). Methodology for determining the rational technology for moving goods in the warehouse. *Municipal economy of cities*. 6(180). 231–236. <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2023-6-180-231-236>.
2. 7 Key Differences Between a Warehouse vs Distribution Center. URL: <https://msl-indy.com/7-key-differences-between-a-warehouse-vs-distribution-center/>.
3. Simulation and Implementation of the Modeling of Forklift with Tricycle in Warehouse Systems for ROS / K.-Y. Tu et al. *Sensors*. 2025. Vol. 25, No. 16. P. 5206. URL: <https://doi.org/10.3390/s25165206>.
4. Schorung M., Lecourt T., Dabanc L. Assessing the spatial footprint of e-commerce logistics differentiating the types of warehouses: The case of Amazon in the United States. *Journal of Transport and Land Use*. 2024. Vol. 17, No. 1. P. 647–674. URL: <https://doi.org/10.5198/jtlu.2024.2438>.
5. Dai Z., Lu C., Shen Y., Anandkumar A. Human-in-the-Loop Meta-Learning for Optimizing Simulation Parameters / Z. Dai et al. *arXiv.org*. 2025. DOI: 10.48550/arXiv.2504.09680.
6. Cross-Docking: A Systematic Literature Review / R. Kiani Mavi et al. *Sustainability*. 2020. Vol. 12, No. 11. P. 4789. URL: <https://doi.org/10.3390/su12114789>.
7. Kalinichenko O., Sevidova V. Determining the number of vehicles for cross-docking in conditions 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>.
8. Оксенюк К. І. Крос-докінг як метод підвищення ланцюга поставок. *Економічні науки. Серія «Регіональна економіка»*. 2022. № 19(75). С. 201–204. URL: [https://doi.org/10.36910/2707-6296-2022-19\(75\)-23](https://doi.org/10.36910/2707-6296-2022-19(75)-23).
9. Li C., Zhang L., Zhang L. A route and speed optimization model to find conflict-free routes for automated guided vehicles in large warehouses based on quick response code technology. *Advanced Engineering Informatics*. 2022. Vol. 52. P. 101604. URL: <https://doi.org/10.1016/j.aei.2022.101604>.
10. Gao Y., Chen C.-H., Chang D. A Machine Learning-Based Approach for Multi-AGV Dispatching at Automated Container Terminals. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2023. Vol. 11, No. 7. P. 1407. URL: <https://doi.org/10.3390/jmse11071407>.
11. Towards Zero-Warehousing Smart Manufacturing from Zero-Inventory Just-In-Time production / Z. Lyu et al. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2020. Vol. 64. P. 101932. URL: <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2020.101932>.
12. Дослідження алгоритмів і засобів переміщення для складської транспортної системи / Є. П. Михайлов, В. М. Лінгур, Д. С. Антихович, М. О. Нирков. *Підйомно-транспортна техніка*. 2023. № 1 (68). С. 28-38. DOI: 10.15276/pidtt.1.68.2023.03.
13. Kalinichenko O. & Sevidova V. (2024). Improvement of warehouse technology in international freight transportation. *Municipal economy of cities*. 6(187). 302–307. <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2024-6-187-302-307>.
14. Як працює логістичний гуманітарний хаб Волині. ВІДЕО - Волинь Online. *Волинь Online*. URL: <https://volynonline.com/yak-praczuuye-logistychnyj-gumanitarnyj-hab-volyni-video/>.

Подригало Михайло Абович, доктор технічних наук, професор кафедри технологій машинобудування і ремонту машин, Харківський національний автомобільно-дорожній університет. ORCID iD: 0000-0002-1624-5219. Тел.: +380503011658. E-mail: pmikhab@gmail.com.

Абрамов Дмитрій Володимирович, доктор технічних наук, професор кафедри технологій машинобудування і ремонту машин, Харківський національний автомобільно-дорожній університет. ORCID iD: 0000-0003-1846-1991. E-mail: varan_mail@ukr.net.

Коробко Андрій Іванович, доктор технічних наук, професор кафедри технологій машинобудування і ремонту машин, Харківський національний автомобільно-дорожній університет. ORCID iD: 0000-0002-6618-7790.
E-mail: ak82andrey@gmail.com.

Podrigalo Mikhail, Dr. Sc. (Techn.). Professor of the department of machinery manufacturing and machine maintenance, Kharkiv National Automobile and Highway University. ORCID iD: 0000-0002-1624-5219.
Tel.: +380503011658. E-mail: pmikhab@gmail.com.

Abramov Dmytro, Dr. Sc. (Techn.). Professor of the department of machinery manufacturing and machine maintenance, Kharkiv National Automobile and Highway University. ORCID iD: 0000-0003-1846-1991.
E-mail: varan_mail@ukr.net.

Korobko Andrey, Dr. Sc. (Techn.). Professor of the department of machinery manufacturing and machine maintenance, Kharkiv National Automobile and Highway University. ORCID iD: 0000-0002-6618-7790.
E-mail: ak82andrey@gmail.com.

Статтю прийнято 20.09.2025 р.

ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ УКРАЇНСЬКОГО ДЕРЖАВНОГО УНІВЕРСИТЕТУ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

**COLLECTION OF SCIENTIFIC WORKS OF THE UKRAINIAN STATE
UNIVERSITY OF RAILWAY TRANSPORT**

Випуск 213

«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 22.09.2025 р.

Формат паперу А4. Папір писальний.

Умовн. друк. арк. 21,0. 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.