

ЗМІСТ

ДП «НІРІ»: 100 років надійності та розвитку	2
Панібратець Л. Г., Степанов С. М., Борисенко М. А. Світовий досвід із дослідження пріоритетизації ремонтів і відновлення транспортних споруд	5
Безуглий А. О., Комар В. Ю. Публічні інвестиційні проекти як модерний інструмент відновлення транспортної інфраструктури України	13
Дмитренко В. І., Степовий Є. Б. Моделювання макрогальванічної корозії нафтопроводів з урахуванням змінних фізико-хімічних властивостей ґрунту	20
Романчук Я. П., Согор А. Р. Оптимальний вибір електронного теодоліта для будівництва автошляхів	24
Терещенко Т. А. Примикання/перехрещення автомобільних доріг в одному рівні з організуванням руху по колу: досвід США та Європи	33
Абрамова Л. С., Наглюк І. С., Черепаха О. С. Оцінка якості транспортного обслуговування пасажирів у транспортно-пересадочних вузлах	42
Ковбасенко С. В., Гонтар Ю. В. Експериментальне дослідження параметрів руху та режимів роботи автотранспортних засобів за допомогою вимірювально-реєструвального комплексу для формування типового міського їздового циклу	49
Лисенко О. О. Оптимізація мережі зарядних станцій для електротранспорту в умовах національних і міжнародних транспортних коридорів	64
Федоров В. В., Філіпова Г. А., Яновський В. В. Покриття корпусу бронеавтомобіля КрАЗ «ФІОНА» комплексною резонаторною плитою як засіб зменшення його рівня зовнішнього шуму	71

Редагування: Бойко О. С., Копаниця І. В.
Макетування: Копаниця І. В.

Усі статті проходять двостороннє сліпе рецензування.

За достовірність фактів, цифр, точність імен і прізвищ відповідають автори статей,
за зміст рекламних матеріалів – рекламодавці.

Редакція не завжди поділяє погляди авторів публікацій.

Мови видання: українська та англійська

Усі права захищені. Передрук матеріалів можливий лише з дозволу редакції.

Видавець: ДП "ДержавтотрансНДІпроект", 03113, Київ, просп. Берестейський, 57,
к. 1009 (редакція), e-mail: ikopanytsya@insat.org.ua

Укомплектовано 31.03.2026



ДП «НІРІ»: 100 РОКІВ НАДІЙНОСТІ ТА РОЗВИТКУ

Сто років – це не просто цифра. Це століття думок, рішень, праці, ідей, випробувань, відповідальності, ризику та щоденної праці науковців багатьох поколінь. Для ДП «НІРІ» – це дорога від перших наукових відкриттів до сучасних технологічних рішень, що зараз формують науково-технічну політику у сфері дорожнього господарства України.

Від дня заснування у 1926 році ДП «НІРІ» стало платформою наукових думок, винахідником сучасних рішень у сфері будівництва, ремонту, облаштування, модернізації доріг, драйвером впровадження інновацій для розвитку інфраструктури України.

Історія ДП «НІРІ» розпочинається з 1926 року, коли у м. Харкові була створена науково-дослідна шляхова станція (НДШС) при Українському управлінні місцевого транспорту. У цьому ж році НДШС була реорганізована в науково-дослідне бюро, а у 1930 році на його базі створюється науково-дослідний інститут безрейкових шляхів і транспорту – УкртрансНДІ, з якого в 1932 році відділяється дорожня наука та залишається тільки науково-дослідний інститут автогужових доріг і дорожніх споруд. Роботу науковців-дорожників перервала Друга світова війна. Поновлено її було у 1943 році разом із звільненням Києва від німецько-фашистських загарбників. За свою історію інститут неодноразово зливався в єдиний колектив із науковцями-автомобілістами (у 1953 та 1965 роки). Та у 1970 році був поновлений окремий Державний дорожній науково-дослідний інститут. Із 1999 року за клопотанням колективу та рішенням уряду, інститут носить ім'я Миколи Павловича Шульгіна – видатного українського діяча, першого міністра транспорту.

У лютому 2024 року підприємство перейменовано на Державне підприємство «Національний інститут розвитку інфраструктури» (ДП «НІРІ»).

Зараз ДП «НІРІ» є базовою організацією Міністерства розвитку громад та територій України з науково-технічної діяльності за напрямками:

– науково-технічне, дослідне, методичне та інформаційне забезпечення нормування проектування та будівництва



об'єктів інженерно-транспортної інфраструктури, безпеки і доступності під час експлуатації;

– науково-технічне, дослідне, методичне та інформаційне забезпечення нормування з питань економіки та ціноутворення у будівництві.

ДП «НІРІ» визнано таким, що має важливе значення для національної економіки у галузі будівництва та є критично важливим для функціонування економіки та забезпечення життєдіяльності населення в особливий період.

Підприємство виконує функції секретаріату ТК 307 «Автомобільні дороги».

ДП «НІРІ» пройшло державну атестацію за науковим напрямом «Інженерно-технологічний» та віднесене до групи В відповідно до наказу Міністерства освіти і науки України від 15.10.2025 № 1360, урахувавши рішення Експертної комісії з питань проведення державної атестації наукових установ та закладів вищої освіти в частині провадження такими закладами наукової (науково-технічної) діяльності, на підставі висновку Експертної комісії про результати державної атестації наукової установи, ДП «Національний інститут розвитку інфраструктури». Свідоцтво про державну атестацію наукової установи від 15.10.2025 Серія ДА № 0424. Термін дії свідоцтва до 31.12.20239 р.

Підприємство офіційно включено до Державного реєстру наукових установ, яким надається підтримка держави.

У ДП «НІРІ» впроваджена система управління якістю стосовно виконання науково-дослідних робіт, проектування, випробувань і сертифікації у сфері дорожнього будівництва відповідно до ДСТУ ISO 9001:2015.

На базі ДП «НІРІ» створено та успішно функціонують:

- Фонд нормативних і технічних документів у сфері дорожнього господарства;
- Головний випробувальний центр;
- Орган сертифікації продукції;
- Орган сертифікації персоналу.

Усі вони акредитовані Національним агентством з акредитації України.

Підприємством впроваджені комунікаційні інструменти, створені для провідних постачальників нових матеріалів і технологій у будівельній галузі.

Портал інновацій – вебпортал, на якому для ключових стейкхолдерів представлена детальна інформація щодо сучасних матеріалів, технологій та обладнання, що можуть бути використані для відновлення інфраструктури.

Платформа інновацій – комунікаційний майданчик, на якому постачальники нових матеріалів і технологій мають можливість представити свій інноваційний продукт для зацікавлених фахівців, налагодити ділові контакти та окреслити перспективи впровадження в Україні.

ДП «НІРІ» видає фаховий збірник наукових праць «Дороги і мости».

ДП «НІРІ» є дійсним членом FENRL – міжнародної європейської асоціації дорожніх науково-дослідних інститутів (рішення 18-ої Генеральної Асамблеї 11-12 жовтня 2007 р., м. Осло, Норвегія).

У 2025 році з метою надання Державному агентству відновлення та розвитку інфраструктури України консультативної технічної підтримки з питань реалізації державної політики в ДП «НІРІ» створено Експертні ради з питань:

1) будівництва систем та мереж водопостачання, водовідведення та очищення стічних вод;

2) відновлення та розвитку дорожньої інфраструктури;

3) відновлення та розвитку об'єктів енергетичної інфраструктури, відновлюваних джерел енергії, енергоефективності та енергозбереження;

4) відновлення та розвитку житлових будівель, соціальної та транспортної інфраструктури;

5) цифрового розвитку, цифрових трансформацій і цифровізації.

Незважаючи на воєнний стан, ДП «НІРІ» продовжує працювати, оптимізувавши належним чином та налагодивши режим роботи підприємства в нових жорстких реаліях. Протягом останніх чотирьох років підприємство працює в умовах обмежень, пов'язаних з: перебоями з електропостачанням, теплом і зв'язком у будівлі інституту та лабораторіях, обмеженням доступу до об'єктів, затримкою постачань матеріалів та обладнання, кадровими ризиками (пов'язаних з мобілізацією, релокацією та дефіцитом фахівців), невизначеністю політичної ситуації та можливих змін пріоритетів фінансування і процедур прийняття рішень, економічними ризиками (коливання цін і валютних курсів, перегляд кошторису, нестабільність економічного законодавства), форс-мажорними ризиками, зокрема ризик втрати або пошкодження майна.

Попри вплив наведених вище ризиків ДП «НІРІ» працює за сценарієм відносної стабільності, що відповідало стратегії збереження поточного стану на сталому рівні. Це підтверджує спроможність підприємства навіть за дії негативних зовнішніх чинників виконувати основні функції та забезпечувати розвиток, зокрема через закупівлю обладнання, заходи із захисту працівників, збільшення кількості наукових публікацій і виступів на конференціях, а також виконання робіт на стратегічно важливих об'єктах інфраструктури.

Однак, не дивлячись на ці ризики, ДП «НІРІ» продовжує забезпечувати якісне та ефективне наукове підґрунтя для подальшої швидкої відбудови пошкодженої та зруйнованої дорожньої інфраструктури.



тури України. Не забуваймо, що відновлення транспортної мережі після війни – це комплексний процес, який має забезпечити модернізацію та подальший розвиток на десятиліття вперед. Нові виклики, пов'язані з війною – забезпечення збалансованого розвитку транспортного комплексу та галузі інфраструктури загалом по всіх регіонах країни, створення соціально-орієнтованого бізнес-середовища як передумови розвитку – мають поєднуватися з впровадженням найкращих, найсучасніших світових підходів і практик містобудування та архітектури.

Зміни назв, реформування галузі, інші трансформації не перемінили головне – ДП «НІРІ» продовжує виконувати роль наукового партнера держави, забезпечує впровадження сучасних технологічних рішень, підвищує надійність та довговічність об'єктів транспортної мережі.

Директор ДП «НІРІ», к.т.н.
Артем БЕЗУГЛИЙ

УДК 336.581

DOI: 10.33868/0365-8392-2026-1-286-5-12

© Л. Г. Панібратець, заступник начальника
Центру мостів та будівельних конструкцій,
ORCID: 0000-0003-0683-9299;

© С. М. Степанов, провідний інженер
відділу мостів,
ORCID: 0000-0003-1220-431;

© М. А. Борисенко, завідувач відділу
будівельних конструкцій, аспірант,
ORCID: 0000-0001-9772-3536,
e-mail: bridge.center@nidi.org.ua
(ДП «НІПІ»)

© Lyudmila Panibratets, Deputy Head of the Center
for Bridges and Building Structures,
ORCID: 0000-0003-0683-9299;

© Serhii Stepanov, Senior Engineer,
Bridge Department,
ORCID: 0000-0003-1220-431;

© Maksym Borysenko,
Head of the Building Structures Department,
ORCID: 0000-0001-9772-3536,
e-mail: bridge.center@nidi.org.ua
(SE «NIDI»)

СВІТОВИЙ ДОСВІД ІЗ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРІОРИТЕЗАЦІЇ РЕМОНТІВ І ВІДНОВЛЕННЯ ТРАНСПОРТНИХ СПОРУД

WORLD EXPERIENCE IN RESEARCHING THE PRIORITIZATION OF REPAIRS AND RESTORATION OF TRANSPORT STRUCTURES

Анотація. Транспортні споруди, насамперед мости, є критично важливими елементами дорожньої мережі та інфраструктурної стійкості держави. В умовах вікової деградації мостового фонду, зростання інтенсивності руху та обмеженого фінансування питання ефективного планування ремонтів і відновлення набуває системного значення. Метою статті є узагальнення світового досвіду формування систем пріоритезації ремонтів і технічного обслуговування мостів, аналіз сучасних методичних підходів до багатокритеріального ранжування та оптимізації бюджетного розподілу, а також визначення напрямів розвитку інструментів підтримки управлінських рішень. Дослідження ґрунтується на систематичному аналізі наукових публікацій останніх десятиліть, включаючи результати наукометричного огляду 380 рецензованих робіт (1990–2025 рр.) з баз Scopus та Web of Science. У роботі розглянуто методи багатокритеріального прийняття рішень (АНР, TOPSIS, VIKOR, COPRAS, MOORA), підходи до визначення вагомості критеріїв (експертні та об'єктивні методи), моделі оптимізації бюджетів, оцінювання життєвого циклу, а також інструменти машинного навчання та систем моніторингу стану споруд (SHM). Встановлено, що сучасні системи управління мостовим фондом еволюціонували від однофакторного ранжування до інтегрованих моделей, які поєднують багатокритеріальний аналіз, оптимізацію, оцінювання ризиків і дані моніторингу. Показано, що застосування MCDM / MCDA-методів забезпечує прозорість і відтворюваність формування пріоритетів, а інтеграція оцінювання життєвого циклу та оптимізаційних алгоритмів дозволяє формувати довгострокові програми ремонтів з урахуванням бюджетних обмежень і невизначеності.

Ключові слова: автодорожні мости, багатокритеріальний аналіз, індекс пріоритетності, критична інфраструктура, пріоритезація, ремонт, утримання, технічний стан, транспортна споруда, управління активами.

Abstract. Transport structures, especially bridges, are critically important elements of the road network and infrastructure stability of the state. In the context of aging bridge stock, increasing traffic intensity, and limited funding, the issue of effective planning of repairs and restoration is becoming increasingly important. The purpose of the article is to summarize global experience in developing systems for prioritizing bridge repairs and maintenance, analyze current methodological approaches to multi-criteria ranking and budget allocation optimization, and identify directions for the development of management decision support tools. The study is based on a systematic analysis of scientific publications from recent decades, including the results of a scientometric review of 380 peer-reviewed works (1990–2025) from the Scopus and Web of Science databases. The paper considers multi-criteria decision-making methods (AHP, TOPSIS, VIKOR, COPRAS, MOORA), approaches to determining criterion weights (expert and objective methods), budget optimization models, life cycle assessment, as well as machine learning tools and structural health monitoring (SHM) systems. It has been established that modern bridge management systems have evolved from single-factor ranking to integrated models that combine multi-criteria analysis, optimization, risk assessment, and monitoring data. It has been shown that the use of MCDM / MCDA methods ensures transparency and reproducibility in priority setting, while the integration of life cycle assessment and optimization algorithms allows for the development of long-term intervention programs that take into account budget constraints and uncertainty. Effective prioritization of transport infrastructure repairs should be based on a comprehensive combination of multi-criteria models,

optimization methods, life cycle analysis, and digital monitoring tools. The transition to integrated adaptive management systems creates the conditions for improving the safety, economic efficiency, and sustainability of transport infrastructure, which is particularly relevant in the context of resource constraints and increased external risks.

Keywords: *prioritization, road bridges, transport structures, asset management, prioritization, multi-criteria analysis, priority index, repair, maintenance, critical infrastructure, technical condition.*

Вступ

Транспортні споруди, насамперед мости, є визначальними елементами дорожньої мережі та критичної інфраструктури. Вони забезпечують безперервність логістики, доступність територій, стійкість економічних зв'язків і безпеку руху. Для України ця роль особливо загострилася в умовах воєнного стану: мости стали не лише «звичайними» інженерними об'єктами, а й частиною обороноздатності, шляхами евакуації населення, коридорами гуманітарних перевезень та експортної логістики. Одночасно більшість мостів, що експлуатуються на автомобільних дорогах загального користування, проектувалися за нормативами та навантаженнями, які часто не відповідають сучасним транспортним потокам. Додатковим чинником є вік споруд: значна частина мостового фонду має тривалий термін експлуатації, що закономірно призводить до накопичення дефектів і зношування.

За такої ситуації «просто ремонтувати все» неможливо. Фінансування обмежене, ресурси експлуатаційних організацій також мають обмежені ресурси, а потреби зростають швидше, ніж можливість відновлення. Відтак ключовим питанням стає пріоритезація: які мости ремонтувати першочергово, які – включити до середньострокових програм, а для яких достатньо посиленого моніторингу та локальних заходів з експлуатаційного утримання. Пріоритезація – це власне спроба формалізувати інженерне та управлінське мислення в умовах дефіциту ресурсів, щоб максимізувати безпеку та корисність витрат.

Протягом останніх десятиліть у світі сформувався великий масив досліджень про системи критеріїв, методики ранжування, комплексне прийняття рішень і оптимізаційні моделі, які допомагають обґрунтовувати розподіл обмежених ресурсів у поточному, середньостроковому та стратегічному плануванні. Однією з найбільш ґрунтовних робіт, на якій базується

наведений матеріал, визначено дослідження [1], у межах якого проаналізовано 380 рецензованих публікацій за 1990 – 2025 роки на основі баз Scopus та Web of Science, із застосуванням інструментів VOSviewer та Bibliometrix R для картографування наукового ландшафту. Важливість такого огляду полягає в тому, що він показує не лише «що писали», а й те, як еволюціонували підходи до управління технічним обслуговуванням мостів: від простого ранжування за технічним станом до інтегрованих систем підтримки рішень, які враховують життєвий цикл, ризики, дані моніторингу та навіть вплив кліматичних змін.

Основне завдання – перетворити досліджену інформацію на цілісну аналітичну публікацію зі зрозумілою логікою: чому пріоритезація необхідна, які методичні напрями сформували сучасний інструментарій, як виглядає математичний каркас ухвалення рішень і куди рухаються сучасні моделі управління мостовим фондом.

Основна частина

Технічне обслуговування мостів у масштабі країни або окремо по кожній із областей майже ніколи не є «чисто технічною» проблемою. Це управлінське завдання підвищеної складності, у якому необхідно одночасно враховувати технічний стан, транспортну роль, економічні наслідки, ризики небезпечних подій і соціальну ціну відмови. Один міст може мати відносно помірні дефекти, але бути критично важливим у мережі; другий – бути сильно зношеним, проте мати альтернативний маршрут об'їзду поруч і менші наслідки обмеження руху. Тому рішення «де ремонтувати першим» завжди зводиться до оцінки компромісів, а не до однофакторного вибору. На практиці це виявляється в тому, що у переліку критеріїв одночасно з'являються параметри надійності та довговічності, показники руху, економічні оцінки, екологічні обмеження, правові рамки та вимоги безпеки.

Оновлені оцінки стану транспортної інфраструктури ще раз демонструють, наскільки гострою є проблема належного утримання мостів. У США Федеральне управління автомобільних доріг (FHWA) зазначає, що в країні експлуатується понад 617 тис. мостів, і за останніми даними приблизно 7,4 % із них перебувають у «поганому» стані. Водночас Американське товариство цивільних інженерів (ASCE) у своєму звіті присвоїло мостам загальну оцінку «С», що свідчить про середній рівень їхнього технічного стану та наявність значної кількості споруд, які потребують реконструкції.

Подібна ситуація спостерігається й у Канаді: загальнонаціональні оцінювання вказують на істотні потреби в ремонті та обслуговуванні. Зокрема, за звітом про стан інфраструктури Канади за 2019 рік майже 40 % муніципальних доріг і мостів оцінено як такі, що перебувають у задовільному, поганому або дуже поганому стані, а близько 80 % цих об'єктів експлуатуються понад 20 років. Такі показники свідчать про накопичене відставання в ремонтах мостів зі значним віком будівництва і про необхідність у найближчій перспективі або проводити технічне обслуговування, або планувати їхню заміну. При цьому категорія «поганий» не завжди означає негайну небезпеку експлуатації, проте вказує на існування структурних проблем, які потребують ремонту чи посиленого контролю задля гарантування безпеки.

У роботі [1] автори виконали багатовимірний аналіз, у межах якого виокремили шість ключових методичних парадигм управління технічним обслуговуванням мостів (рис. 1).



Рис. 1. Методичні парадигми управління технічним обслуговуванням мостів

Прагнення розв'язувати такі завдання системно і стало причиною активного розвитку методів багатокритеріального прийняття рішень. Суть MCDM/MCDA-підходів полягає в тому, щоб перетворити множину різнорідних критеріїв на узгоджену процедуру порівняння альтернатив, де ними виступають мости або проекти втручань. У базовому випадку формується таблиця «міст – критерій», кожен критерій нормалізується, йому надається вагомість, а далі обчислюється інтегральний показник пріоритетності. Найпростіший варіант такого підходу – метод простого адитивного зважування (SAW), де підсумкова оцінка для i -го мосту може бути описана формулою:

$$S_i = \sum_{j=1}^n w_j r_{ij}, \quad (1)$$

де w_j – вагомість критеріїв (сума вагомостей дорівнює 1);

r_{ij} – нормалізовані значення критеріїв, приведені до порівнюваного масштабу.

Попри простоту, така модель може бути доволі ефективною, якщо критерії

добре підібрані, а вагомості – обґрунтовані.

Водночас саме визначення вагомостей часто стає найскладнішим елементом, адже воно відображає управлінські пріоритети: що важливіше – безпека чи економія коштів, соціальні наслідки чи швидкість робіт, поточний стан чи стратегічна роль у мережі. Один із найпоширеніших способів формування вагомостей – аналітичний ієрархічний процес (АНР), що структурує завдання у вигляді ієрархії та використовує парні порівняння критеріїв. Тобто АНР – це аналітичний ієрархічний процес (від англ. Analytic Hierarchy Process) математичний метод, який використовується для підтримання прийняття комплексних рішень шляхом структурування завдання у вигляді ієрархії критеріїв і альтернатив. Метод, заснований на математиці та психології, дозволяє порівнювати та зважувати різні варіанти, ґрунтуючись як на об'єктивних даних, так і на суб'єктивних судженнях, і визначати пріоритети для кожного варіанту. АНР застосовується для вибору, ранжування та обґрунтування рішень у ситуаціях із багатьма критеріями. Він допомагає впорядкувати складні проблеми та знайти оптимальний варіант. АНР/АНР – Аналітичний ієрархічний процес (АНР) та аналітичний мережевий процес (АНР) – це методи прийняття рішень, розроблені Томасом Л. Сааті для структурування та аналізування складних проблем за декількома критеріями. АНР використовує ієрархію, тоді як більш загальний АНР використовує мережеву структуру, що дозволяє враховувати зворотний зв'язок і залежності між критеріями.

Експерти порівнюють критерії «один з одним», а потім математично синтезуються ваги. Перевага АНР у тому, що він дає змогу формалізувати експертну думку і одночасно перевірити її узгодженість. Узгодженість зазвичай оцінюють через індекси CI і CR , які залежать від найбільшого власного значення матриці парних порівнянь:

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n-1}, CR = \frac{CI}{RI}. \quad (2)$$

Якщо узгодженість низька, модель фактично підказує, що експертні оцінки потрібно переглянути: інакше вагомості можуть виявитися випадковими. З практики дорожнього господарства, АНР корисний ще й тим, що забезпечує прозорість: можна показати, чому певні критерії отримали більшу вагомість, а отже, – чому певний міст опинився у верхній частині списку. Інший популярний підхід – TOPSIS, де пріоритет визначається не просто сумою балів, а близькістю альтернативи до ідеального рішення та віддаленістю від антиідеального.

TOPSIS (від англ. Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) – один із найпопулярніших методів багатокритеріального аналізу рішень (MCDA). Розроблений у 1981 році, цей метод використовують для ранжування альтернатив на основі їхньої близькості до ідеального рішення. Головні кроки методу базуються на формуванні матриці рішень, їхній нормалізації, зважуванні критеріїв, визначенні ідеального та антиідеального рішень, розрахунку відстаней і ранжування альтернатив. Переваги методу полягають у простоті та наочності, врахуванні множини критеріїв та гнучкості у застосуванні. Приклади використання включають управління проектами, фінансовий аналіз, медицину та логістику. Метод TOPSIS є потужним інструментом для прийняття рішень у багатокритеріальних задачах, тому що сприяє підвищенню ефективності та конкурентоспроможності.

Формально для кожного мосту обчислюють відстані до цих двох «полюсів» у багатовимірному просторі критеріїв:

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^+)^2}, D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2}, \quad (3)$$

а потім коефіцієнт близькості:

$$C_i = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-} \quad (4)$$

Чим більший C_i , тим кращий ранг. Для інфраструктурних задач це інтуїтивно: міст має бути одночасно «якомога ближче» до бажаних значень і «якомога далі» від найгірших сценаріїв. Перевага TOPSIS – у наочності та гнучкості, а також у тому, що підхід природно працює з багатьма критеріями. Коли критерії суперечливі, а рішення є пошуком компромісу, застосовують VIKOR – метод багатокритеріального прийняття рішень (MCDM). (від – серб. ViEkriterijumsko KOMpromisno Rangiranje). Цей метод був розроблений Серафімом Оприковичем у 1979 році з метою усунути проблему прийняття рішень із суперечливими та несумісними (різні одиниці виміру) критеріями. Він передбачає, що компроміс є прийнятним для вирішення конфлікту і що особа, яка ухвалює рішення, прагне знайти найближче до ідеального рішення, тому альтернативи оцінюються відповідно до всіх встановлених критеріїв.

Потім VIKOR ранжує альтернативи та визначає рішення, яке називається компромісом і є найближчим до ідеального. Методологія VIKOR виділяється як важливий метод прийняття багатокритеріальних рішень. VIKOR розшифровується як «багатокритеріальна оптимізація та компромісне рішення».

Він спирається на ідею балансу між «груповою корисністю» і мінімізацією найбільшого програшу за окремим критерієм. У підсумку формується інтегральний показник, наприклад:

$$Q_i = v \frac{S_i - S_{min}}{S_{max} - S_{min}} + (1 - v) \cdot \frac{R_i - R_{min}}{R_{max} - R_{min}}, \quad (5)$$

де параметр v визначає, наскільки рішення орієнтоване на «загальне благо» порівняно з уникненням найгіршого випадку. Саме це робить VIKOR корисним у ремонтних програмах, де завжди є вибір між максимальною користю для мережі та ризиками / витратами окремих об'єктів.

Поряд із VIKOR у задачах пріоритетизації технічного обслуговування мостів широко застосовується метод COPRAS (Complex Proportional Assessment – комплексна пропорційна оцінка) багатокритеріальна техніка прийняття рішень, що використовується для ранжування та оцінки альтернатив на основі різних критеріїв, які можуть бути як якісними, так і кількісними. Він працює шляхом присвоєння впливу критеріям, нормалізації ефективності альтернатив, а потім обчислення кінцевого балу на основі пропорційного співвідношення до ідеальних і антиідеальних рішень. Цей процес забезпечує кінцеве ранжування, де альтернатива з найвищим балом є найсприятливішим вибором.

Його ключова ідея полягає у пропорційному порівнянні альтернатив з урахуванням критеріїв двох типів: корисних (чим більше, тим краще) та витратних (чим менше, тим краще). На першому етапі формується матриця рішень x_{ij} , де x_{ij} , – значення j -го критерію для i -ї альтернативи (мосту). Далі виконують нормалізацію та зважування:

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^m x_{ij}}, \quad q_{ij} = w_{ij} r_{ij}. \quad (6)$$

Ще одним поширеним інструментом є метод MOORA (Multi-Objective Optimization on the basis of Ratio Analysis – багатоцільова оптимізація на основі аналізу співвідношень), який використовують для отримання рейтингу альтернатив у багатокритеріальних задачах з одночасною присутністю корисних і витратних критеріїв. Виконують нормалізацію матриці рішень за допомогою векторної (евклідової) нормалізації:

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}. \quad (7)$$

Змістивши акцент на гібридні моделі VIKOR, науковці запропонували метод визначення пріоритетних мостів для

підвищення їхньої стійкості. Для визначення впливу зазначених критеріїв, а саме віку, площі, проектного рівня високої поведінки та рівня дорожнього покриття, було використано метод CRITIC. Потім для визначення пріоритетності мостів було застосовано п'ять методів MCDM: TOPSIS, VIKOR, COPRAS, ARAS та MOORA. Згодом було застосовано метод WSM (метод зваженої суми для багатокритеріального аналізу – Weighted Sum Model) для формування остаточного рейтингу мостів шляхом об'єднання рейтингів, отриманих за допомогою зазначених вище методів MCDM. Був зроблений висновок, що COPRAS та MOORA продемонстрували найвищу кореляцію за рангом Спірмена, відповідно 1 та 0,993. Деякі автори оцінили проекти відновлення мостів на основі конкретних цілей, таких як вартість, термін експлуатації, середньодобовий рух, зокрема вантажних транспортних засобів тощо. Після цього було визначено об'єктивний вплив оцінки пріоритетності на основі методу стандартного відхилення від цільового значення та концепції ентропії. Далі було використано метод VIKOR для визначення пріоритетності втручання серед мостів, що потребують ремонту.

Для прийняття рішень щодо обслуговування інфраструктури було досліджено багато методів машинного навчання (ML) та оптимізації, кожен з яких має свої переваги та обмеження. Традиційні статистичні підходи, такі як лінійна регресія та аналіз часових рядів широко використовуються для прогнозування витрат та аналізування тенденцій у плануванні обслуговування. Наприклад, модель лінійної регресії прогнозує витрати на обслуговування як функцію відповідних змінних (наприклад, віку мосту). Для складного, багатопараметричного прийняття рішень використовуються моделі ML, такі як ймовірнісні нейронні мережі (PNN) та мережі радіальних базових функцій (RBFN). Ці моделі можуть фіксувати нелінійні взаємозв'язки і часто вдосконалюються за допомогою методів зменшення розмірності, таких як аналізування головних компонент (PCA), для підвищення точності прогнозування. Машини опорних векторів

(SVM) також використовуються для оцінювання ризиків і класифікації завдань. Сучасні архітектури глибокого аналізування (DL) ще більше покращили можливості моделювання. До них належать модель глибоких нейронних мереж (DNN), нейронні мережі з вбудованими сутностями (NN-EE) та самоорганізоване об'єднання кластерів на основі карт (SOMCM) з використанням багатовимірної матричної композитної нейронної мережі для ідентифікації поверхневих зображень.

Висновки

Пріоритезація технічного обслуговування мостів у сучасних умовах є необхідною відповіддю на одночасну дію трьох чинників: старіння мостового фонду, зростання навантажень і хронічну обмеженість фінансування. Коли кількість об'єктів, що потребують втручання, перевищує можливості бюджету і підрядних ресурсів, рішення «ремонтувати все» перетворюється на недосяжну декларацію, а відсутність пріоритетів – на прямий шлях до накопичення ризиків. Саме тому інструменти системного ранжування та планування мають розглядатися як компонент безпеки і керованості інфраструктури, а не як формальність. Для України, де транспортні споруди виконують ще й функції стійкості держави у кризових умовах, ця теза набуває додаткового значення: неправильна черговість втручань може означати не лише перевитрати, а й втрату критичних маршрутів у найменш сприятливий момент.

Світовий досвід, узагальнений у дослідженнях останніх десятиліть, показує, що ефективна пріоритезація повинна спиратися на багатокритеріальність. Відмова від «одного головного показника» на користь системи критеріїв дає змогу наблизити модель до реальності, де технічний стан, інтенсивність руху, наслідки перекриття, вартість робіт, екологічні обмеження та ризики небезпечних подій формують єдину картину. Методи MCDM/MCDA дають формалізований і, що принципово важливо, пояснюваний механізм вибору. Вони не лише будують рей-

тинг, а й надають можливість сформулювати логічні запитання: які саме критерії «підняли» міст угору, які «опустили», що станеться, якщо змінити вагомість критеріїв або додати нові дані. Така прозорість є ключовою для державних і муніципальних програм, де рішення повинні бути не тільки правильними технічно, а й легітимними з погляду суспільства та контролюючих інституцій.

Водночас сучасна практика дедалі більше рухається від «статичних» рейтингів до інтегрованого управління життєвим циклом. Оцінювання життєвого циклу змушує розглядати міст не як об'єкт разового ремонту, а як актив, що потребує тривалої стратегії: інколи дорожче втручання зараз виявляється дешевшим у сумі за 10–20 років, якщо воно різко зменшує ризики, частоту обстежень і майбутні ремонти, знижує суспільні втрати від обмеження руху. В цьому контексті оптимізаційні моделі стають інструментом перетворення пріоритетів на реальний, виконуваний план: вони дозволяють розкладати роботи у часі, враховувати бюджетні межі, потужності підрядників, логістичні обмеження, а також «вартість відкладання», коли зволікання робить проблему дорожчою і небезпечнішою.

Окремим поворотним моментом є інтеграція даних реального часу, SHM та цифрових двійників. Вони створюють передумови для адаптивного управління, коли пріоритетність не визначається «раз на рік» за інерцією, а коригується відповідно до фактичного стану, нових дефектів і змін експлуатаційних умов. У перспективі це відкриває можливість переходу до управління «за станом» і навіть до прогнозно-попереджувальної логіки, коли рішення приймають до настання критичної фази деградації. У таких системах методи машинного навчання та глибокого аналізування можуть виконувати роль «прискорювачів» – підвищувати точність прогнозів, автоматизувати оброблення даних обстежень і допомагати формувати сценарії втручання, що мінімізують сумарні витрати та ризики.

Згодом майбутнє планування технічного обслуговування мостів все частіше

визначатиметься ризиками кліматичних змін і невизначеністю. Зростаюча частота екстремальних подій вимагає включення показників уразливості та стійкості у моделі пріоритетизації, а також застосування стохастичних і надійних підходів до оптимізації. Це означає, що ефективна програма повинна бути «стійкою» не лише в інженерному сенсі, а й у планувальному: витримувати зміни фінансування, появу нових даних, зміну регуляторних пріоритетів і несподівані зовнішні удари. Паралельно критично зростає роль інструментів візуалізації та роз'яснень: інтерактивні панелі, карти, сценарії, аналіз чутливості ваг критеріїв стають механізмом перетворення складних моделей на практичні рішення, які можуть бути впроваджені інституційно.

Таким чином, найбільш результативною є інтегрована стратегія, де багатокритеріальне ранжування, оптимізація бюджетів, аналіз життєвого циклу, інтелектуальні методи оброблення даних і технології моніторингу працюють як єдина система. У цій логіці пріоритетність перестає бути списком «на поточний рік» і перетворюється на безперервний процес управління ризиками та ресурсами. Для України, з урахуванням безпекових викликів і потреб відновлення, впровадження такого підходу може забезпечити не лише ефективніше використання коштів, а й підвищення безпеки руху, збереження критичних маршрутів, підтримку економічної активності та формування фундаменту для довгострокової стійкості транспортної інфраструктури.

References

1. Abdelkader, E.M.; Al-Sakkaf, A.; Ebrahim, K.; Elkabalawy, M. (2025) Maintenance Budget Allocation Models of Existing Bridge Structures: Systematic Literature and Scientometric Reviews of the Last Three Decades. *Infrastructures* 252. <https://www.mdpi.com/2412-3811/10/9/252>
2. Matthew J. Whelan, Tara L. Cavalline, Aidan Alar, Kelsey Lane. (2019). *Guidelines for Prioritization of Bridge Replacement, Re-*

habilitation, and Preservation Projects. University of North Carolina at Charlotte.

https://www.researchgate.net/publication/341625502_Guidelines_for_Prioritization_of_Bridge_Replacement_Rehabilitation_and_Preservation_Projects

3. Audrey K. Moruza, Adam D. Matteo, P. E., Jonathan C. Mallard, P. E., Jeffrey L. Milton, Prasad L. Nallapaneni, P. E., and Rex L. Pearce, P. E. (2016). 61. https://uknowledge.uky.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=2709&context=krc_researchreports

4. Silimanotham H., Henry M. (2023). Bridge maintenance prioritization by using multi-criteria decision analysis *Life-Cycle of Structures and Infrastructure Systems*, PP. 2770–2777. https://www.researchgate.net/publication/373931168_Bridge_maintenance_prioritization_by_using_multi-criteria_decision_analysis

5. Lee, J., Jeong, Y., Chang, C. (2025). Developing a Bridge Health Index (BHI) with a Wighted Priority Index (PI) for Maintenance Decision-Making: An Open Data-Based Approach in Korea. 15, 6435.

<https://www.mdpi.com/2076-3417/15/12/6435>

6. Contreras-Nieto C., Shanb Y., Lewisc P., Hartellb J. A. (2019). Bridge maintenance prioritization using analytic hierarchy process and fusion tables. *Automation in Construction*, 99–110. <https://www.arataumodular.com/app/wp-content/uploads/2022/08/Bridge-Maintenance-Prioritization-Using-Analytic-Hierarchy-Process-And-Fusion-Tables.pdf>

7. Echaveguren T., Dechent P. (2019). Allocation of bridge maintenance costs based on prioritization indexes. *Revista de la Construcción*. 18, 3, 568–578. https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-915X2019000300568

ISSN 0365-8392

DOI: 10.33868/0365-8392-2026-1-286-5-12

Дата першого надходження статті: 28.02.2026

Дата прийняття до друку: 15.03.2026

Дата публікації: 31.03.2026



УДК 336.581

DOI: 10.33868/0365-8392-2026-1-286-13-19

© А. О. Безуглий, канд. екон. наук, доцент,
директор, ORCID: 0000-0003-3883-7968,
e-mail: ab@nidi.org.ua;

© В. Ю. Комар, начальник центру
забезпечення діяльності підприємства,
ORCID: 0000-0002-2634-9257,
e-mail: v.komar@niri.org.ua
(ДП «Національний інститут розвитку
інфраструктури»)

© Artem Bezuglyi, PhD in Economics,
Associate Professor, Director,
ORCID: 0000-0003-3883-7968,
e-mail: ab@nidi.org.ua;

© Viktor Komar, Head of the Center for
Enterprise Activity Support,
ORCID: 0000-0002-2634-9257,
e-mail: v.komar@niri.org.ua
(SE "National Institute for Infrastructure
Development")

ПУБЛІЧНІ ІНВЕСТИЦІЙНІ ПРОЄКТИ ЯК МОДЕРНИЙ ІНСТРУМЕНТ ВІДНОВЛЕННЯ ТРАНСПОРТНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ УКРАЇНИ

PUBLIC INVESTMENT PROJECTS AS A MODERN TOOL FOR RESTORING UKRAINE'S TRANSPORT INFRASTRUCTURE

Анотація. Визначено відновлення транспортної інфраструктури України як пріоритет повоєнної відбудови з урахуванням синергетичного ефекту на соціально-економічний розвиток України. Узагальнено іноземний досвід повоєнного відновлення транспортної інфраструктури та джерела фінансування. Визначено актуальність розробки механізму альтернативного фінансування відновлення транспортної інфраструктури через обмеженість бюджетного фінансування, неієвність інфраструктурних облігацій та інші інституційні обмеження. Підтверджено потенціал публічних інвестиційних проєктів як модерного інструменту відновлення транспортної інфраструктури України, що має перевагу з акцентом на оцінку ефективності та результативності для суспільства, високий рівень публічності та прозорості, суспільного контролю на всіх етапах інвестиційного проєкту. За результатами аналітичного модуля DREAM визначено проєкти за сектором «Транспорт» як пріоритетні, що поступають за вартісними показниками лише проєктам за сектором «Енергетика». Обґрунтована гіпотеза, про успішну реалізацію наявних ПІП на платформі DREAM як предтечу відновлення транспортної інфраструктури України із залученням міжнародних організацій, урядів іноземних країн, приватних інвесторів.

Ключові слова: транспортна інфраструктура, відновлення транспортної інфраструктури, публічні інвестиційні проєкти, принцип «Build Back Better», DREAM.

Abstract. The restoration of Ukraine's transport infrastructure is defined as a priority direction of post-war reconstruction and a relevant direction for ensuring the social and economic state of society. The undeniable relevance and priority of the restoration and reconstruction of transport infrastructure requires the search for effective tools and modernization of the organizational and economic mechanism of restoration.

The purpose of the work is to determine the potential of public investment projects as a modern tool for restoring Ukraine's transport infrastructure.

The foreign experience of post-war restoration of transport infrastructure and sources of financing is summarized. The relevance of developing a mechanism for alternative financing of the restoration of transport infrastructure is determined due to limited budget funding, ineffectiveness of infrastructure bonds and other institutional restrictions. The potential of public investment projects as a modern tool for the restoration of the transport infrastructure of Ukraine is confirmed, which has the advantage of focusing on assessing the effectiveness and efficiency for society, a high level of publicity and transparency, and public control at all stages of the investment project. According to the results of the DREAM analytical module, projects in the "Transport" sector are identified as priority, inferior in cost indicators only to projects in the "Energy" sector. The hypothesis of the successful implementation of existing public investment projects on the DREAM as a precursor to the restoration of the transport infrastructure of Ukraine with the involvement of international organizations, governments of foreign countries, and private investors is substantiated.

Keywords: transport infrastructure, transport infrastructure restoration, public investment projects, "Build Back Better" principle, DREAM.

Вступ

Постановка проблеми. Відновлення транспортної інфраструктури України визначається як пріоритетний напрям повоєнного відновлення та актуальний напрям забезпечення соціально-економічного життя суспільства в умовах воєнного стану. Беззаперечність актуальності та пріоритетності відновлення та відбудови транспортної інфраструктури вимагає пошуку дієвих інструментів та модернізації організаційно-економічного механізму відновлення в умовах невизначеності та сукупності економічних, політичних, соціальних та інших ризиків.

Національна транспортна стратегія України на період до 2030 року визначає три черги заходів та інвестиційних проєктів, при чому відбудова інфраструктури, пошкодженої через воєнні дії перебуватиметься у першу чергу, далі – ремонт існуючої транспортної інфраструктури, покращення існуючої або розвиток нової транспортної інфраструктури [1].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблематика відновлення транспортної інфраструктури України зайшла відображення у працях українських та іноземних учених (В. Задоя [2], В. Каськів [3], І. Линник [4], А. Пасічник [3], А. Полюх [5], Б. Стасюк [3], Т. Чаркіна [2], О. Юрчик [2] та інших), зокрема вчені обґрунтовують численні інструменти фінансування відновлення транспортної інфраструктури. дослідив досвід Німеччини, Польщі, Великої Британії, Хорватії з повоєнного відновлення транспортної інфраструктури та визначив для України відбудову за принципом «Build Back Better», що буде базуватися на адаптації до кліматичних викликів, цифровізації, енергоефективності та мульти-модальних логістичних рішень [5]. В. Задоя, Т. Чаркіна, О. Юрчик визначають умови відновлення транспортної інфраструктури України, які характеризуються обмеженістю ресурсів та високими ризиками, тому відновлення можливе за синергетичного поєднання державних та приватних ресурсів [2, с. 61], синергетичність також досягається від залучення міжнародних організацій та приватного бізнесу [6, с. 590].

Наукова спільнота посилює інтерес до пошуку альтернативних джерел фінансування відновлення транспортної інфраструктури, якими визначають фінансування публічних інвестиційних проєктів. Впровадження останніх відбулося з 2025 року, що хронологічно обмежує бібліографічний аналіз публікаціями останніх років. О. Нагорна, Ю. Васишишен, О. Мякишевська, Д. Горовий, Р. Рябий визначають публічні інвестиції як ефективний інструмент стимулювання економічного зростання та фінансування інфраструктури в кризових умовах, коли приватний бізнес та бюджетні фонди мають обмеження фінансових ресурсів [7]. Інші вчені (О. Ігнатенко [8], К. Єфіменко [9], Т. Солоджук [10]) обґрунтовують переваги публічних інвестицій як прогресивного інструменту модернізації економіки та інфраструктури, проте вказують на обмеженість бюджетних ресурсів, недосконалість методики оцінки ефективності реалізації інвестиційних програм, неякісне управління державними активами, недостатня кваліфікація кадрів з питань управління публічними інвестиціями [9, с. 96].

Враховуючи наукові розробки та наукові пошуки фінансування відновлення транспортної інфраструктури України, актуальними є впровадження модерних інструментів в умовах фіскального дефіциту, якими на сучасному етапі розвитку співпраці України та ЄС виступають публічні інвестиційні проєкти.

Метою роботи є визначення потенціалу публічних інвестиційних проєктів як модерного інструменту фінансування відновлення транспортної інфраструктури України.

Основна частина

Виклад основного матеріалу. В умовах завданих збитків транспортній інфраструктурі України відбудова передбачає синергію ресурсного потенціалу, проте одним з найважливіших є пошук фінансового ресурсу. На нашу думку, від наявності достатнього фінансування залежить можливість залучення матеріального ресурсу, інтелектуального та трудового ресурси, впровадження кращих технологій дорожнього будівництва тощо.

А. Полюх визначає можливі інструменти фінансування на основі іноземного досвіду повоєнного відновлення транспортної інфраструктури, а саме проектне фінансування на основі оцінки доцільності та співфінансування (муніципалітет-штат-федерація) на прикладі Німеччини, державні гранти, державні боргові облігації та спеціальні фонди на прикладі Великої Британії, переважно зовнішнє фінансування у формі позик Світового банку та програми технічної допомоги ЄС (Phare, CARDS) на прикладі Хорватії, Боснії і Герцеговини [5]. Адаптація іноземного досвіду до українських реалій неможлива, оскільки мають місце національні особливості та ретроспективний досвід реалізації різних економічних відносин у попередніх періодах щодо розбудови транспортної інфраструктури та потреби забезпечення соціально-економічного розвитку і відновлення за іншими напрямками (відновлення економічної активності, підтримка бізнес-активності, відновлення житлового фонду тощо).

Наукова спільнота обґрунтовує альтернативні джерела фінансування відновлення транспортної інфраструктури на засадах оптимальності за критерієм рівня мінімізації ризиків формування та достатності, диференціювання, мінімальної вартості тощо. Класичними джерелами фінансування дорожніх робіт є кошти державного бюджету, альтернативними можуть бути кошти від розміщення інфраструктурних облігацій згідно Закон України «Про ринки капіталу та організовані товарні ринки» від 23.02.2006 № 3480-IV, міжнародна допомога (наприклад, технічну допомогу від ПРООН, Світового банку, ЄІБ, Німецького фонду Маршала [5]); змішане фінансування, включаючи комерційні кредити та інвестиційні фонди [5]; механізм державно-приватного партнерства. У **табл. 1** наведена порівняльна характеристика джерел фінансування відновлення транспортної інфраструктури з формуванням переваг та недоліків кожного з джерел із фокусом уваги на ПІП.

Таблиця 1

Порівняльна характеристика джерел фінансування відновлення транспортної інфраструктури України

Джерело фінансування	Переваги	Недоліки
Бюджетне фінансування	Безоплатність, цільова спрямованість, публічність та прозорість	Обмеженість розмірів фінансування через хронічний фіскальний дефіцит та необхідність фінансування обороноздатності, соціальної сфери, погашення державного боргу
Інфраструктурні облігації	Можливість залучення тимчасово вільних коштів фінансового ринку, цільова спрямованість	Недостатня розвиненість фінансового ринку та його фондового сегменту, недостатня активність приватних інвесторів на фінансовому ринку, високий рівень відсоткових ставок, потенційна конкуренція з ОВДП, що мають інституційну підтримку (податкові пільги тощо)
Публічні інвестиційні проекти	Безоплатність, цільова спрямованість, публічність та прозорість, залучення міжнародних експертів та міжнародного досвіду	Обмеженість розмірів фінансування, високий рівень конкуренції за фінансування
Міжнародна допомога, пільгові кредити від урядів іноземних держав, міжнародних фінансових організацій	Безоплатність або низький рівень відсоткових ставок, цільова спрямованість, публічність та прозорість, залучення міжнародних експертів та міжнародного досвіду	Обмеженість розмірів фінансування, додаткові нефінансові умови
Комерційні кредити	Можливість залучення тимчасово вільних коштів комерційних банків	Високий рівень відсоткових ставок, низький суверенний кредитний рейтинг та похідні від нього кредитні рейтинги органів місцевого самоврядування та суб'єктів господарювання

Джерело: авторська розробка

Національна транспортна стратегія України на період до 2030 року базується на диверсифікації джерел фінансування з фокусом на фінансову допомогу від ЄС у розмірі 350 млн євро та інші джерела (кошти приватних інвесторів у рамках реалізації інвестиційних проєктів, бюджетні кошти)[1].

На основі співпраці Уряду України, інших державних інституцій та Європейської Комісії визначено, що модерним інструментом відновлення транспортної інфраструктури України є інвестиційні проєкти, які визначають як окремий їхній вид – ПІП (публічні інвестиційні проєкти). Для реалізації ПІП, зокрема інфраструктурних проєктів, сформовано на національному рівні інституційне середовище:

- Стратегічну інвестиційну раду та Міжвідомчу комісію з питань розподілу публічних інвестицій на чолі з Міністром фінансів України,
- цифрову екосистему «*DREAM*» з функціоналом прозорості та підзвітності, зменшення ризиків та підвищення ефективності використання бюджетних та донорських коштів,
- нормативне забезпечення (Закон України від 16.01.2025 № 4225-IX, Постанова КМУ від 15.11.2022 №1286, Розпорядження КМУ від 14.03.2023 №221-р, Постанова КМУ від 09.08.2024 №903, Постанова КМУ від 28.02.2025 №294, Постанова КМУ від 28.02.2025 №527, Постанова КМУ від 28.11.2025 р. № 1548 тощо).

Критерії пріоритезації публічних інвестиційних проєктів, визначені у додатку 2 Порядку підготовки, подання, оцінки та визначення критеріїв пріоритезації концепцій публічних інвестиційних проєктів на 2025 рік [13] встановлює для інфраструктурних проєктів одну з найвищих чисельностей балів, поступаючись лише проєктам з генерації електричної енергії, захисту інфраструктури:

6 балів – проєкт спрямований на будівництво нових/модернізацію та розширення пропускної спроможності наявних пунктів пропуску на кордоні з країнами ЄС, проєкт спрямований на розвиток транспортної інфраструктури з метою якнайшвидшого переміщення людей, товарів та послуг у західному напрямку або на експорт;

4 бали – проєкт спрямований на будівництво або розширення спроможності інженерно-транспортної інфраструктури;

3 бали – проєкт спрямований на збереження операційної здатності аеропортів та управління повітряним рухом.

Єдиний проєктний портфель держави станом на початок 2026 року демонструє впровадження ПІП у механізм відбудови та розбудови транспортної інфраструктури й загальною орієнтованою вартістю за проєктами у розмірі 732,82 млрд грн і програмами у розмірі 906,99 млрд грн, що поступається вартісним показникам за проєктами та програмами в енергетиці (**рис. 1**).

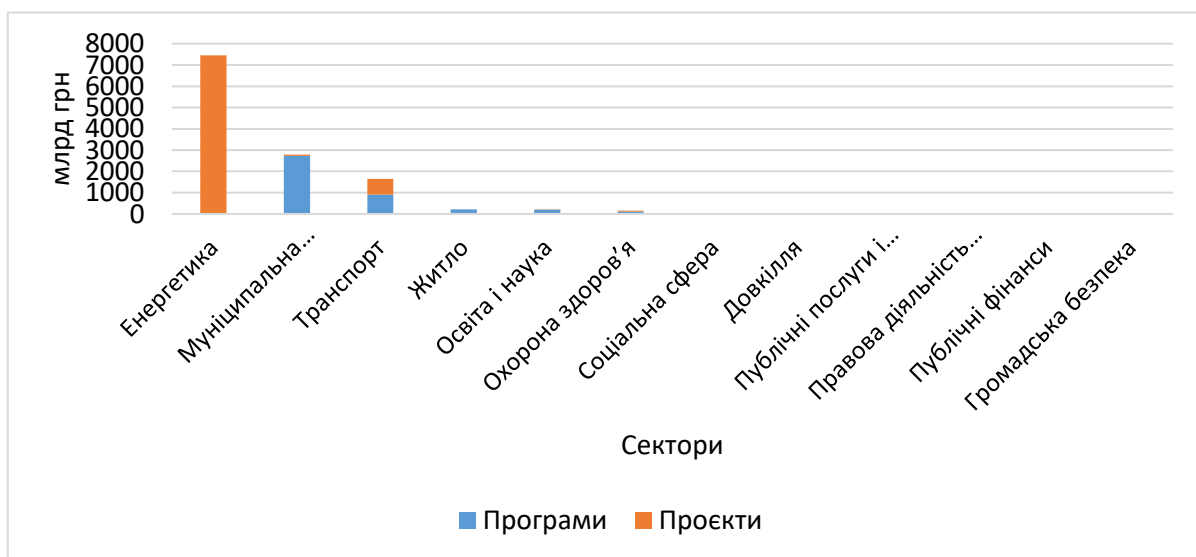


Рис. 1. Орієнтована вартість за програмами та проєктами станом на лютий 2026 року
Джерело: дані *DREAM* Аналітика [14]

Аналітичний модуль *DREAM* дає можливість констатувати реалізацію 131 проєкту та 64 програм, із них 44 проєкти реалізується за сектором «Транспорт» за ініціативи різних суб'єктів:

Міністерство розвитку громад та територій України (DREAM-UA-120825-9538C18E, DREAM-UA-070825-862D4887, DREAM-UA-050825-46E1CE35, DREAM-UA-060825-B659673C, DREAM-UA-040825-49ACBF24, DREAM-UA-100825-45ACD12D);

Державне агентство відновлення та розвитку інфраструктури України (DREAM-UA-060825-9735B7BD, DREAM-UA-150825-EA3DD38E, DREAM-UA-050825-0109BD1D);

Служби відновлення та розвитку інфраструктури у Волинській (DREAM-UA-140825-3F956099, DREAM-UA-140825-4E2C9AC6), Закарпатській (DREAM-UA-140825-6F7C86B2), Львівській (DREAM-UA-150825-8759EE8A), Одеській (DREAM-UA-080825-3B5D53F5, DREAM-UA-060825-76EFA795, DREAM-UA-080825-56D4AC5D),

Чернівецькій (DREAM-UA-150825-34E6DF6D) областях;

ПрАТ «Українське Дунайське судноплавство» (DREAM-UA-110825-8E87BD89);

ДП «Укрводшлях» (DREAM-UA-080825-67560229, DREAM-UA-080825-89F8C96A, DREAM-UA-080825-F6012025, DREAM-UA-110825-27784ED9);

АТ «Укрзалізниця» (DREAM-UA-080825-E1A44D46, DREAM-UA-110825-7DEF6D82, DREAM-UA-070825-F29FF288, DREAM-UA-100825-42515C54, DREAM-UA-060825-6E2A58AC, DREAM-UA-080825-786A428A та інші);

ДП «Група управління проєктами відновлення» (DREAM-UA-120825-FCD667D0, DREAM-UA-070825-6B904C92, DREAM-UA-090825-9D7D569B, DREAM-UA-070825-07BFF93A).

На **рис. 2** зображено переважну ініціативність за вартісними показниками Державного агентства відновлення та розвитку інфраструктури України та АТ «Укрзалізниця».

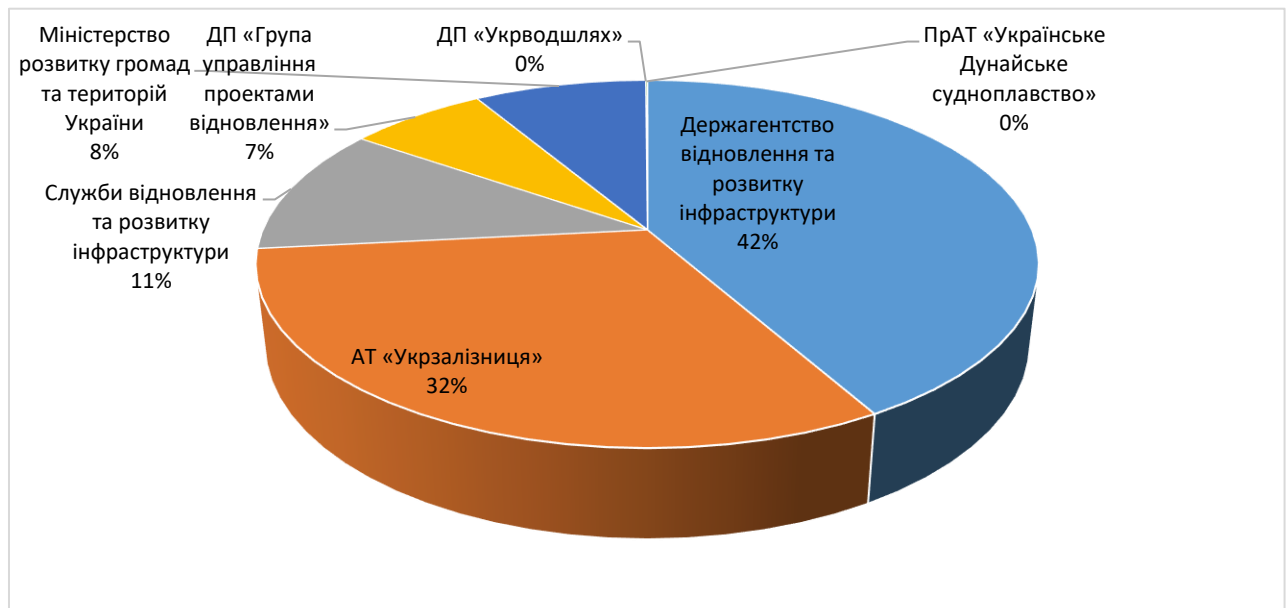


Рис. 2. Орієнтована вартість проєктів та програм за сектором «Транспорт» станом на лютий 2026 року

Джерело: дані *DREAM Аналітика* [14]

Викликами ПП варто вважати обмеженість фінансування від іноземних партнерів, корупційні ризики та ризики недофінансування під впливом геополітичних та інших ризиків, недостатня поінформованість потенційних ініціаторів з відновлення інфраструктури, зміна пріоритетів

відновлення за наслідками воєнного стану та руйнувань, а також: бюрократична неефективність [11], недостатня ефективність використання ресурсів [8], часті зміни в законодавстві [8], операційні проблеми, включаючи застаріле обладнання, недостатню цифрову інфраструктуру [11].

Основними перевагами PPP для стейкхолдерів транспортної інфраструктури слід вважати:

- ефективності [9] та результативності [8], ефективне адміністрування [7, с. 136] та конкурента оцінка ефективності всіх інвестиційних проєктів, відбір до реалізації проєктів з вищим рівнем соціально-економічної ефективності. Концептуальні засади пріоритезації проєктів та фінансового забезпечення заходів з дорожніх робіт визначені у наукових розвідках Б. Стасюка, С. Ілляша, Т. Печончика та інших вчених-дослідників відновлення транспортної інфраструктури [12],
- прозорість [9; 10] та публічність всіх етапів інвестиційного процесу,
- стратегічного планування публічних інвестицій [9],
- синергетичний ефект розвитку [7, с. 136],
- залучення міжнародних експертів та міжнародного досвіду [10], що зменшує національні корупційні ризики.

Потенціал PPP як модерного інструменту відновлення транспортної інфраструктури України формується за умови дотримання високого рівня публічності та прозорості витрат, залучення міжнародних експертів та зовнішнього фінансування. Успішна реалізація наявних PPP на платформі DREAM, забезпечення їх соціально-економічної ефективності та досягнення довгострокових стратегічних цілей має стати початком довгострокового та перспективного досвіду відновлення України, що сформує покращення урядового іміджу серед міжнародних організацій та урядів

References

1. Cabinet of Ministers of Ukraine. (2023). *Natsionalna transportna stratehiia Ukrainy na period do 2030 roku* [National Transport Strategy of Ukraine for the period until 2030]. Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1550-2024-%D0%BF#n22>
2. Charkina, T., Zadoia, V., & Yurchyk, O. (2024). Restoration of the transport infrastructure of Ukraine in the conditions of war: A comparative analysis of economic models and stabilisation mechanisms. *Philosophy*,

іноземних країн, підвищить рівень інвестиційної привабливості України.

Висновки

Відбудова транспортної інфраструктури України має найвищий рівень інституційного забезпечення та супроводу, проте в умовах фіскальних дисбалансів досягнення швидкої відбудови транспортної інфраструктури обмежується фінансуванням, що вимагає пошуку нових механізмів та інструментів. Модерним інструментом для відбудови транспортної інфраструктури України мають стати PPP на основі високого рівня ефективності та результативності, публічності та прозорості, суспільного контролю на всіх етапах інвестиційного процесу,

Науковий результат дослідження полягає у переосмисленні підходів до фінансування відновлення України та активізації наукових пошуків нових чи вдосконаленні чинних інструментів фінансування відбудови транспортної інфраструктури. Потенціал PPP для транспортної інфраструктури розпочав формування у 2025 році одночасно з реформуванням публічних інвестицій та проведено аналіз актуальних проєктів, однак авторські рекомендації полягають у підвищенні популяризації інфраструктурних PPP серед ініціаторів (органів держаної влади та місцевого самоврядування), активізації участі широкого кола ініціаторів, залучення більшої чисельності сторін фінансування, зменшення національних бюрократичних ризиків та посилення інституційного супроводу на засадах публічності та прозорості.

Economics and Law Review, 4(2), 50–61.
<https://doi.org/10.63341/2786-491X-2024-2>

3. Pasichnyk, A., Lebid, I., Kaskiv, V., Stasiuk, B. & Lebid, Y. (2023). Analysis and assessment of the volume of financing restore of transport and civil infrastructure of Ukraine. *Roads and bridges*, 27, 42–51.
<https://doi.org/10.36100/dorogimosti2023.27.042>

4. Lynnyk, I. (2025). Post-war reconstruction of transport infrastructure facilities with the assistance of international partners. *Urban Development and Spatial Planning*, (88),

283–294. <https://doi.org/10.32347/2076-815x.2025.88.283-294>

5. Poliukh, A. (2025). Transport Infrastructure Amid Protracted War: Challenges for Ukraine and Insights from International Post-War Reconstruction Practices.

Retrieved from: https://kse.ua/wp-content/uploads/2025/08/Transport-Infrastructure-Amid-Protracted-War_Poliukh-Artem.pdf

6. Cherviakov, V. (2024). Organizational and methodological approaches to the post-war restoration of Ukraine's transport and logistics infrastructure. *Journal of European Economy*, vol. 22, 4, 590–613.

<https://doi.org/10.35774/jee2023.04.590>.

7. Nahorna, O., Vasylyshen, Y., Miakyshevska, O., Horovyi, D. & Riabyi, R. (2025). The essence and specifics of public investment: requirements and functions. *Investments: practice and experience*, 4, 133–138.

<https://doi.org/10.32702/2306-6814.2025.4.133>.

8. Ignatenko, O. & Merkulov, M. (2024). Management and financing of investment projects in the public sphere of Ukraine. *Public administration: improvement and development* 12. Retrieved

from: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Duur_2024_12_6. <http://doi.org/10.32702/2307-2156.2024.12.4>

9. Yefimenko, K. O. (2025). The mechanism of public-private partnership in the context of reforming the public investment management

system in Ukraine. *Analytical and Comparative Jurisprudence*, 2, 3, 94–99.

<https://doi.org/10.24144/2788-6018.2025.03.2.14>

10. Solodzhuk, T. & Khudyk, M. (2025). Mechanism for implementing public investment projects in Ukraine. *Efficient economy*, 3. Retrieved from:

http://nbuv.gov.ua/UJRN/efek_2025_3_75. <http://doi.org/10.32702/2307-2105.2025.3.73>

11. Bezuglyi, A., Stasiuk, B., Illiash, S., Pechonchyk, T., Mudrychenko, N. & Komar, V. (2024). Conceptual framework for prioritizing financial support for road works and services. *Roads and bridges*, 29, 13–24. <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2024.29.013>

12. Cabinet of Ministers of Ukraine. (2024). Deiaki pytannia pidhotovky, podannia, otsinky ta kryteriiv priorityzatsii kontseptsii publichnykh investytsiinykh proektiv na 2025 rik [Some issues of preparation, submission, evaluation and prioritization criteria of public investment project concepts for 2025]. Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/903-2024-%D0%BF#Text>

13. DREAM Analytics. Retrieved from: <https://bi.dream.gov.ua/#/spp>

ISSN 0365-8392

DOI: 10.33868/0365-8392-2026-1-286-13-19

Дата першого надходження статті: 15.02.2026

Дата прийняття до друку: 15.03.2026

Дата публікації: 31.03.2026



УДК (504.05 +504.06) 622.692

DOI: 10.33868/0365-8392-2026-1-286-20-23

© В. І. Дмитренко, канд. техн. наук, доцент,
завідувачка кафедри,
ORCID: 0000-0002-1678-2575,
e-mail: nning.DmytrenkoVI@nupp.edu.ua;

© Є. Б. Степовий, аспірант,
ORCID: 0009-0001-4783-3929,
e-mail: alenastepovaja@gmail.com
(Національний університет «Полтавська полі-
техніка імені Юрія Кондратюка»)

© Viktoriia Dmytrenko, PhD,
Head of the Department,
ORCID: 0000-0002-1678-2575,
e-mail: nning.DmytrenkoVI@nupp.edu.ua;

© Yevhen Stepovyi, Postgraduate,
ORCID: 0009-0001-4783-3929,
e-mail: alenastepovaja@gmail.com
(National University «Yuri Kondratyuk Poltava
Polytechnic»)

МОДЕЛЮВАННЯ МАКРОГАЛЬВАНІЧНОЇ КОРОЗІЇ НАФТОПРОВОДІВ З УРАХУВАННЯМ ЗМІННИХ ФІЗИКО- ХІМІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ҐРУНТУ

MODELING OF MACROGALVANIC CORROSION OF OIL PIPELINES TAKING INTO ACCOUNT VARIABLE PHYSICAL AND CHEMICAL PROPERTIES OF THE SOIL

Анотація. Розглянуто проблему забезпечення надійності магістральних нафтопроводів в умовах змінного ґрунтового середовища, зокрема впливу вологості та омичного опору ґрунту на макрогальванічні процеси. Метою дослідження є розробка чисельної моделі, яка дозволяє адекватно враховувати електрохімічні параметри корозійного середовища та поляризаційні властивості трубопроводного металу.

Методологія базується на розв'язанні системи нелінійних алгебраїчних рівнянь, що описують розподіл потенціалів і корозійних струмів уздовж трубопроводу, з урахуванням впливу навколишнього середовища. У роботі застосовано ітераційний чисельний метод для побудови потенціалів, аналітично описано вплив зміни вологості ґрунту на параметри макрогальванічної пари, а також реалізовано розрахунок питомої поляризованості металу для кожної ділянки трубопроводу.

Запропонована модель дозволяє оцінювати залишковий ресурс металу, виявляти аварійно небезпечні ділянки та підвищувати ефективність систем катодного захисту. Результати дослідження можуть бути використані для створення інженерного програмного забезпечення, а також лягти в основу сучасних нормативно-технічних документів щодо моніторингу підземних трубопроводів.

Ключові слова: сталевий нафтопровід, електрохімічна корозія, поздовжня гальванопара, модель корозії, швидкість корозії, екологічна безпека.

Abstract. The article comprehensively examines the problem of ensuring the reliability of main oil pipelines in conditions of a changing soil environment, which significantly affects the intensity of corrosion processes. Particular attention is paid to the influence of soil moisture and ohmic resistance, which determine the electrochemical conditions for the formation of macrogalvanic couples – a key factor accelerating localized corrosion of pipeline metal.

The aim of the study is to create a mathematical model capable of accurately describing the distribution of electrochemical potentials and corrosion currents along the pipeline system, taking into account both the properties of the metal and the variable parameters of the external environment.

The proposed numerical model is based on solving a system of nonlinear algebraic equations using iterative methods, which allows for detailed simulation of the effect of variable soil moisture on the electrochemical behavior of metal surfaces.

The article also provides an analytical description of changes in the parameters of a macrogalvanic couple depending on the level of moisture and electrical resistance of the soil, and proposes a method for calculating the specific polarizability of pipeline metal in different sections of the pipeline. The proposed model allows not only to accurately assess the remaining resource of pipeline systems, but also to identify accident-prone areas in a timely manner, thereby increasing the efficiency of cathodic protection systems.

The results obtained are of practical value for the creation of specialized engineering software and can be used in the development of the latest regulatory and technical documents in the field of monitoring and protection of underground pipeline systems.

Keywords: steel oil pipeline, electrochemical corrosion, longitudinal galvanocouple, corrosion model, corrosion rate, environmental safety.

Вступ

На думку авторів [1], серед ключових екологічних викликів, що супроводжують діяльність нафтогазового сектору, особливо актуальними є питання транспортування вуглеводнів і забезпечення екологічної безпеки під час експлуатаційних процесів. Головна увага приділяється попередженню аварійних ситуацій і техногенних катастроф, пов'язаних із використанням трубопроводного транспорту. Дослідження причин пошкодження нафтопроводів свідчить, що основною з них є корозійні процеси, які виникають у сталевих трубах за умови вільного доступу агресивних середовищ, таких як соляні, кислотні чи лужні технологічні розчини. Подібні інженерні системи потребують ретельного нагляду та регулярного контролю зовнішнього стану щодо корозії. Сучасні методики оцінки корозійного зносу часто ґрунтуються на емпіричних підходах, які не враховують впливу пошкоджень ізоляційного шару або наявності електролітів. Точніші результати можна отримати лише шляхом аналізу корозійного процесу в конкретних умовах експлуатації та його впливу на міцність конструкцій.

Забезпечення надійності та довговічності магістральних нафтопроводів є критично важливим завданням для енергетичної безпеки країни. Одним із найнебезпечніших чинників деградації трубопроводних систем є корозія, яка виникає через електрохімічну взаємодію між віддаленими анодними та катодними ділянками трубопроводу.

Динамічні зміни омичного опору ґрунту, зумовлені зволоженням або підсиханням, значно ускладнюють прогнозування швидкості корозійного зношення. У таких умовах традиційні методи розрахунку часто виявляються недостатніми, що вимагає застосування чисельного моделювання для точної оцінки розподілу струмів і потенціалів уздовж трубопроводу.

Актуальність роботи зумовлена потребою в надійному інструменті для прогнозування корозійної активності, який дозволить оцінити залишковий ресурс металу, своєчасно виявити аварійно небезпечні ділянки та розробити ефективні

заходи захисту. Запропонований підхід до моделювання макрогальванічних процесів є важливим кроком до впровадження сучасних систем моніторингу технічного стану нафтотранспортної інфраструктури.

Проблематика безпечної експлуатації нафтопроводів та їхній екологічний вплив є предметом активного дослідження вітчизняних і зарубіжних учених. Зокрема, автори [1] досліджували механізми електрохімічної та ґрунтової корозії, а також специфіку корозійних процесів у різних регіонах України. Питання моделювання взаємозв'язку між корозійним зношенням металу та чинниками навколишнього середовища, а також прогнозування довговічності трубопроводів в умовах агресивного середовища розглянуто у працях [2–5]. Авторами [6–9] розглянуто вплив макрогальванічних елементів, які утворюються між віддаленими на значну відстань анодами та катодами на швидкість корозії трубопроводу. Встановлено, що збільшення відстані між катодом та анодом інтенсифікує корозійний елемент за рахунок збільшення катодної площі на один анод.

Протяжність макрогальванічних пар на трубопроводних елементах може бути різною. Вона залежить від навколишніх умов, омичного опору ґрунту та інших факторів. В процесі зволоження ґрунту значно полегшується анодний процес і зменшується омичний опір системи. Підсихання ґрунту впливає на омичний опір ґрунту та анодну поляризованість сталі. Тому в процесі зволоження та підсихання струм макрогальванопари змінюється.

Внаслідок різноманітних умов, в яких експлуатуються нафтопроводи, виникають труднощі врахування врівноважених струмів при роботі макрогальванічних пар при корозійних процесах на трубопроводах. Тому для розрахунку доцільно приймати тільки чисельні наближені методи, наприклад, викладені у [10] при розрахунку макрогальванічних елементів на підземних трубопроводах.

Попри наявність значної кількості досліджень у сфері корозійного зношення трубопроводів, питання впливу макрога-

льванічних елементів за умов змінного стану ґрунту (зволоження, підсихання) залишалося недостатньо вивченим. Зокрема, не було запропоновано ефективних чисельних моделей, здатних адекватно враховувати динаміку омичного опору та анодної поляризованості сталі в реальних умовах експлуатації.

Ця стаття присвячена саме вдосконаленню підходів до моделювання корозійних процесів з урахуванням змінних фізико-хімічних характеристик ґрунтового середовища, що дозволяє точніше визначати швидкість зношення та прогнозувати залишковий ресурс трубопроводу.

Основна частина

У роботі умовно розділено нафтопровід по довжині на m ділянок, у межах яких прийнято постійні параметри, що визначають кінетику корозійних процесів. Кожному відрізку нафтопроводу відповідає власна швидкість та потенціал корозії та власна поляризаційна діаграма. Між цими ділянками виникають врівноважувальні струми, які замикаються по ґрунту, що оточує нафтопровід. Струм I_i , який припадає на відрізок трубопроводу з i -м номером, можна розглядати як зовнішній поляризуючий струм, який змінює швидкість корозії нафтопроводу.

Потенціал U_i відрізка з номером i визначається як різниця електричного потенціалу між металом трубопроводу та нескінченно віддаленою точкою

$$U_i = \phi_{ci} + \Delta\phi_i + I(R_{pi} + \tau_{ii}) + \sum_{k=1}^{i-1} (\tau_{ki} + \eta_{ki}) I_k + \sum_{k=i+1}^m (\tau_{ki} + \eta_{ki}) \cdot I \quad (1)$$

де m – число ділянок;

I_i, I_k – струми, що припадають на i -у та k -у ділянку;

ϕ_{ci} – потенціал корозії відрізка з номером i ;

$\Delta\phi_i = \frac{I_i R_{ni}}{S}$ – зміна потенціалу корозії

під дією поляризуючого струму;

R_{ni} – питома поляризованість металу, яка залежить від поляризуючого струму j ;

R_{pi} – опір розтіканню струму;

η_{ki}, τ_{ki} – функції впливу, чисельно рівні потенціалу, який виникає на відрізка з

номером i під дією одиничного струму, і відповідно стікаючого з відрізка k та його дзеркального відображення відносно поперхні трубопроводу.

Оскільки струм I_i гальванічного походження, то можна записати ще одне рівняння:

$$\sum_{i=1}^m I_i = 0 \quad (2)$$

Враховуючи, що питомий електричний опір трубопроводу значно менший за навколишній ґрунт, можна також записати, що

$$U_i = U = const. \quad (3)$$

Рівняння (1) та (2) утворюють систему з $2m$ нелінійних алгебраїчних рівнянь відносно невідомих U_i та I_i . Вона може бути зведена до системи з $(m+1)$ -го рівняння відносно U та I :

$$U = \phi_{ci} + I_i \left(R_{pi} + \tau_{ii} + \frac{R_{ni}}{S_i} \right) + \sum_{k=1}^{i-1} (\tau_{ki} + \eta_{ki}) I_k + \sum_{k=i+1}^m (\tau_{ki} + \eta_{ki}) I_k$$

$$\sum_{i=1}^m I_i = 0 \quad (i = 1, 2, 3, \dots, m). \quad (4)$$

Нелінійність системи обумовлена нелінійністю залежності питомої поляризованості R_{ni} від щільності поляризуючого струму j . Однак для кожного i -го відрізка R_{ni} можуть бути розраховані й табульовані.

Рішення системи (4) може бути виконане звичайним чисельним методом. Вже із задовільною точністю результати можуть бути отримані завдяки застосуванню простого ітераційного методу.

З фізичного змісту задачі виходить, що завжди

$$I_i \left(R_{pi} + \tau_{ii} + \frac{R_{ni}}{S_i} \right) > \sum_{k=1}^{i-1} (\tau_{ki} + \eta_{ki}) I_k + \sum_{k=i+1}^m (\tau_{ki} + \eta_{ki}) I_k \quad (5)$$

Тому перше наближення шуканих значень струмів I_i знаходимо рішенням системи

$$\begin{cases} U = \phi_{ci} + I_i \left(R_{pi} + \tau_{ii} + \frac{R_{ni}^0}{S} \right); \\ \sum_{i=1}^m I_i = 0. \end{cases} \quad (6)$$

Тоді

$$I_i = \frac{S_i}{S_i(R_{pi} + \tau_{ii}) + R_{ni}^0} \cdot \frac{\sum_{i=1}^m \frac{\varphi_{ci} \cdot S_i}{S_i(R_{pi} + \tau_{ii}) + R_{ni}^0}}{\sum_{i=1}^m \frac{S_i}{S_i(R_{pi} + \tau_{ii}) + R_{ni}^0}}, \quad (7)$$

де R_{ni}^0 – значення питомих поляризованих за відсутності струму.

Отже, адекватне чисельне моделювання макрогальванічних процесів забезпечує можливість оцінки розподілу корозійних струмів уздовж трубопроводу, що критично важливо для прогнозування зношення та оптимізації захисних заходів. Запропонована модель дає змогу прогнозувати швидкість корозії на окремих ділянках трубопроводу, що дозволяє оцінити залишковий ресурс металу та планувати своєчасне обслуговування або заміну аварійно небезпечних відрізків.

Висновки

Результати дослідження мають практичне значення для вдосконалення систем катодного захисту трубопроводів, оскільки дозволяють точніше оцінювати розподіл корозійних струмів уздовж їхньої довжини з урахуванням змін навколишніх умов, зокрема вологості ґрунту та його омичного опору. Це дозволяє прогнозувати швидкість корозії на окремих ділянках, планувати технічне обслуговування і ремонт, а також оптимізувати розміщення захисного обладнання. Крім того, математична модель і чисельні методи, що застосовуються у дослідженні, можуть бути основою для створення інженерного програмного забезпечення або використані як аналітична база для розробки сучасних нормативних документів з оцінки технічного стану підземних трубопроводів.

References

1. Rohozniuk, V.V., Huzhov, Yu. P. & Kuzmenko, Yu. O. (2000). Technical operation of underground corrosion protection systems for main oil pipelines. *Techdiagaz*, 3–5.

2. Stepova, O. V. (2018). Taking into account corrosion processes of steel oil pipelines in order to improve environmental safety. *Environmental Sciences: Scientific and Practical Journal*, Т. 2, 15–21.

3. Stepova, O., Parashchiienko, I. & Lartseva, I. (2018). Calculation of steel pipeline corrosion depth at the work of galvanic corrosion element operating. *International Journal of Engineering & Technology*, 7, 3.2, 431–435

4. Stepova, O. & Parashchiienko, I. (2017). Modeling of the corrosion process in steel oil pipelines in order to improve environmental safety. *Eastern-european journal of enterprise technologies, industrial and technology systems*, 2, 15–20.

5. Poberezhnyi, L. Ya. (2008). Patterns of corrosion-mechanical degradation of pipelines in difficult operating conditions: *Abstract for the degree of Doctor of Technical Sciences*, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, 34.

6. He, L., Wang, Y., Zhang, Q., Li, X., Xu, Y., & Huang, Y. (2023). *Electrochemical study on the macro-cell corrosion of pipeline steel partially covered by different kinds of mineral deposits*.

<https://doi.org/10.1021/acsomega.3c06189>

7. Lyu, F., Zhou, X., Ding, Z., Zhang, S., Zou, G., Wang, G., Wang, X., Qiao, X., Xu, J., & Song, D. (2024). *Research on the macro-cell corrosion behavior of alloyed corrosion-resistant steel for a transmission line steel structure under a chloride corrosion environment*. *Metals*. 14(8), 879.

<https://doi.org/10.3390/met14080879>

8. Lliso-Ferrando, J. R., Climent, A., Laurens, S., & Castel, A. (2010). *Influence of steel-concrete interface condition on galvanic corrosion currents in carbonated concrete*.

Corrosion Science, 2010, 52(9), 2878–2890.

<https://doi.org/10.1016/j.corsci.2010.04.039>

9. Elsener, B., Jaggi, S., & Bohni, H. (2001). *Macrocell corrosion of steel in concrete: Experiments and numerical modelling*, Associazione Italiana Metallurgia, EUROCORR.

10. Metcalfe, G. I. (1953). *Journal of the Institute of Metals*, 81 (pt. 6), 269–278.

ISSN 0365-8392

DOI: 10.33868/0365-8392-2026-1-286-20-23

Дата першого надходження статті: 14.01.2026

Дата прийняття до друку: 15.03.2026

Дата публікації: 31.03.2026



УДК 625.72:528.4

DOI: 10.33868/0365-8392-2026-1-286-24-32

© Я. П. Романчук, канд. фіз.-мат. наук,
старший наук. співробітник, доцент,
ORCID: 0000-0003-3993-0128,
e-mail: romanchuky@ukr.net;
© А. Р. Согор, канд. техн. наук, доцент,
доцент кафедри,
ORCID: 0000-0002-0084-9552,
e-mail: andrii.r.sohor@lpnu.ua,
(Національний університет
«Львівська політехніка»)

© Yaroslav Romanchuk, PhD in Physics
and Mathematics Sciences,
Senior Research Fellow, Associate Professor,
ORCID: 0000-0003-3993-0128,
e-mail: romanchuky@ukr.net;
© Andriy Sohor, PhD in Technical Sciences,
Docent, Associate Professor at CGM Department,
ORCID: 0000-0002-0084-9552,
e-mail: andrii.r.sohor@lpnu.ua
(Lviv Polytechnic National University)

ОПТИМАЛЬНИЙ ВИБІР ЕЛЕКТРОННОГО ТЕОДОЛІТА ДЛЯ БУДІВНИЦТВА АВТОШЛЯХІВ

OPTIMAL CHOICE OF ELECTRONIC THEODOLITE FOR HIGHWAY CONSTRUCTION

Анотація. Присвячено аналізу сучасного стану розвитку ринку електронних теодолітів, вивченню їхніх основних характеристик і особливостей застосування. Сформульована задача вибору найкращого теодоліта (як управлінського рішення) на основі використання методу аналізу ієрархій Т. Сааті. Обговорюється питання експертних оцінок критеріїв. Наведені основні етапи розв'язування задачі. Обґрунтований підхід щодо оцінки окремих критеріїв у разі суперечливості інформації про них. Практичне використання методу аналізу ієрархій проілюстроване на задачі про оцінювання технічного рівня деяких моделей електронних теодолітів. Пропонується як додаткові критерії врахувати специфіку роботи з іншими системами, характер і причини виникнення можливих похибок під час проведення вимірювань, суперечливість і неповноту інформації стосовно розглядуваних вимірювальних приладів.

Ключові слова: електронні теодоліти, метод аналізу ієрархій, критерії оптимізації та альтернативи, нормовані вектори локальних пріоритетів критеріїв і альтернатив, оцінювання технічного рівня електронних теодолітів.

Abstract. In order to optimize engineering and surveying support for the building and repair of motorways and roads, it is proposed to use the latest surveying instruments and technologies, the effective use of which often depends on choosing the best available option based on an assessment of their technical and economic characteristics. The use of new instruments and technologies makes it possible to significantly expand the range of tasks, speed and accuracy of their implementation, and increase the availability of topographic and geodetic materials when developing project documentation.

The article is devoted to the analysis of the current state of development of the electronic theodolite market, the study of their main characteristics and features of application. Among the characteristics considered are multiplicity of magnification, battery life, dust and moisture protection, angular measurement accuracy, liquid crystal display characteristics, weight, cost (price) of the device, and warranty period. The task of selecting the best theodolite (as a management decision) is formulated based on the use of T. Saaty's Analytic Hierarchy Process. The issue of expert assessment of criteria is discussed. The main stages of solving the problem are presented. A reasonable approach to evaluating individual criteria in the case of conflicting information about them is justified. The practical use of the hierarchy analysis method is illustrated by the problem of evaluating the technical level of some models of electronic theodolites. It is proposed to take into account, as additional criteria, the specifics of working with other systems, the nature and causes of possible errors during measurements, contradictory and incomplete information regarding the measuring devices under consideration.

Keywords: electronic theodolites, hierarchy analysis method, optimization criteria and alternatives, normalized vectors of local priorities of criteria and alternatives, assessment of the technical level of electronic theodolites.

Вступ

З метою оптимізації інженерно-геодезичного забезпечення робіт під час будівництва та ремонту автомобільних доріг доводиться використовувати новітні геодезичні прилади й технології. Їхнє ефективне застосування часто залежить від вибору найкращого на основі оцінювання техніко-економічних характеристик.

Постановка проблеми. Нові прилади й технології дозволяють істотно розширити коло завдань і швидкість їхнього виконання, підвищують доступність топографо-геодезичних матеріалів для розроблення проектної документації. На зміну застарілим приладам приходять оптико-електронні (електронні теодоліти й тахеометри), активно впроваджується лазерне обладнання. Приймати рішення щодо вибору того чи іншого приладу часто доводиться терміново в умовах невизначеності, неточності та неповноти інформації. Використання науково обґрунтованих методів математичного моделювання, зокрема методу аналізу ієрархій [1], дає змогу зробити цей процес більш прозорим і об'єктивним, поєднати математичний апарат із досвідом та інтуїцією особи, що приймає рішення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На відміну від традиційних методик виконання геодезичних робіт сьогодні все ширше застосовуються технології з використанням сучасних геодезичних приладів. У працях Я. Костецької, Т. Шевченка, О. Мороза, І. Тревого, Н. Арсенєвої, А. Войтенка, І. Калинича, Д. Коня і ін. [2–5] розглянута динаміка розвитку електронних теодолітів (далі ЕТ), які випускаються закордонними виробниками, описані їхні основні характеристики й технічні можливості, наведена класифікація електронних теодолітів і проаналізовані перспективи їхнього розвитку.

Сучасне програмне забезпечення ЕТ не тільки надає широкі можливості автоматизації процесу створення моделей місцевості, а й формулює особливі вимоги до приладів. Зокрема, залежно від їхнього виробника опції приладів у частині кодування та реєстрації даних є різними. Тому, вибираючи прилад, варто враховувати

можливість його стикування з тим або іншим програмним забезпеченням [7, с. 249].

Електронні (цифрові) теодоліти знайшли широке застосування у питаннях геодезичного забезпечення та обслуговування в процесі вишукувань, проектування, будівництва й експлуатації автомобільних доріг, будівель і споруд промислового та цивільного призначення.

Так, наприклад, у роботі Надзіра та Ірфансі (2024) аналізується ефективність застосування електронного теодоліта і нівеліра для визначення об'ємів земляних робіт у дорожньому будівництві в Індонезії [12]. Автори показують, що, хоча точність електронного теодоліта дещо нижча порівняно з тахеометром, він забезпечує значну економію часу та коштів.

Сучасні електронні теодоліти (ЕТ) – це здебільшого точні ($2-9''$) прилади для вимірювання вертикальних і горизонтальних кутів, оснащені рідкокристалічними 2–4-рядковими дисплеями (іноді двосторонніми), що автоматично відображають відліки. Завдяки мікропроцесору та дисплею ЕТ можуть здійснювати автоматичний розрахунок кутів і координат, їхнє зберігання [13–17].

Більшість ЕТ передають дані вимірювань із використанням інтерфейсу послідовного зв'язку RS-232. Однак, якщо потрібні більша швидкість, довша відстань або передача великих обсягів даних, слід використовувати інтерфейси RS-485, USB або Ethernet (Bluetooth або Wi-Fi).

Вбудовані в ЕТ обчислювальні функції спрощують і прискорюють роботу геодезиста. Прилади стійкі до суворих погодних умов (IPX6), а висока ємність батареї дозволяє використовувати їх у польових умовах безперервно протягом тривалого часу. Стійкість до вібрації і струшувань забезпечує вбудований компенсатор. Робочі температури ЕТ лежать у діапазоні від -20 °C до $+50$ °C. Вага приладів становить переважно від 3,5 до 5 кг [2–5].

Більшість ЕТ мають високу операційну швидкодію. Їхня експлуатаційна ефективність суттєво впливає на продуктивність і точність геодезичних робіт.

На українському ринку ЕТ представлені сьогодні такими відомими фірмами,

як Leica-Geosystems (Швейцарія), Sokkia, Topcon (Японія), CST/Berger (США), South (Китай), GeoMax (Швеція) тощо. Інформацію про наявні в продажу ЕТ можна знайти на сайтах таких організацій як «Акс-Юг Система», «Геолазер», «Геомагазин», «Геомаркет», «Навгеотех» та ін. [2–5].

Детальний огляд низки електронних теодолітів, методи, тенденції їхнього застосування та ключові висновки наведені в джерелах [10, 11].

Постановка завдання. Електронні (цифрові) теодоліти – це прилади, які використовують для супроводу геодезичними вимірюваннями будівництва, реконструкції чи ремонту автомобільних доріг. Точні геодезичні вимірювання на лінійних об'єктах потребують великих часових затрат. Тому для скорочення термінів виконання робіт необхідне сучасне геодезичне обладнання. Однак рішення про вибір найкращого з них часто є проблематичним.

Питанням прийняття рішень за наявності багатьох критеріїв присвячені праці таких вітчизняних і зарубіжних учених, як: В. Вітлінський, Н. Єршова, Л. Варгас, С. Наконечний, М. Перестюк, Т. Сааті, О. Тригуб та ін. Разом із тим, розроблення системи підтримки прийняття рішень для оцінювання техніко-економічного рівня електронних теодолітів є новим і недостатньо дослідженим. На практиці спеціалісти часто зустрічаються з труднощами вибору тієї чи іншої моделі ЕТ залежно від поставленого завдання, часу його виконання, вибору ЕТ з найкращими технічними характеристиками. Тому питання оптимального вибору ЕТ є особливо актуальним для

особи, що приймає рішення стосовно матеріально-технічного забезпечення виконання геодезичних робіт.

Мета статті полягає в обґрунтуванні та дослідженні використання методу аналізу ієрархій (МАІ) Т. Сааті для прийняття управлінських рішень щодо вибору з обраних моделей оптимального електронного теодоліта на основі оцінювання їхнього технічного рівня за умов суперечливості окремих критеріїв.

Основна частина

МАІ застосовують для розв'язування багатокритеріальних задач із якісними та кількісними факторами (останні можуть мати різну роз-мірність) на основі використання простих і обґрунтованих правил. Він використовується для розв'язування слабоструктурованих і неструктурованих проблем. Метод заснований на декомпозиції задачі та поданні її у вигляді ієрархічної структури. Як результат, визначається чисельно виражений відносний ступінь взаємодії елементів в ієрархії [12, с. 39]. Серед відомих з літератури робіт, присвячених методології та практиці застосування МАІ, виокремимо роботи зі створення відповідного програмного забезпечення (ПЗ), наприклад [12, 15].

Для оцінювання та вибору найкращої за її техніко-експлуатаційними характеристиками моделі ЕТ, як і в роботі [13], згідно з інформацією, наведеною в джерелах [2–5], за вхідні дані були обрані з представлених на українському ринку 6 електронних теодолітів (**табл. 1**).

Порівняльні характеристики електронних теодолітів (ЕТ)

№ з/п	Марка ЕТ	Збільшення (кратність),	Час роботи від акумулятора, год.	Пило-волого-захист, ІР	Кутова точність вимірювання, сек.	Кількість рядків дисплею.	Маса приладу, кг.	Вартість, тис. грн	Гарантія, років
1	Nivel System DT-2L	30	20	66	2	2	4,8	42,9	1
2	South NT-023	30	8	54	3	4	4,7	56,5	2
3	Nivoline DT02	30	24	54	2	2	4,8	40,8	1
4	CST/Berger DGT10	30	15	54	5	2	4,4	34,5	2
5	Sokkia DT-940/940L	26	170	66	9	2	3,5	125	3
6	Spectra Precision DET-2	30	36	54	2	4	4,5	155	1

Примітка: окремі характеристики можуть змінюватися або містити неточності.

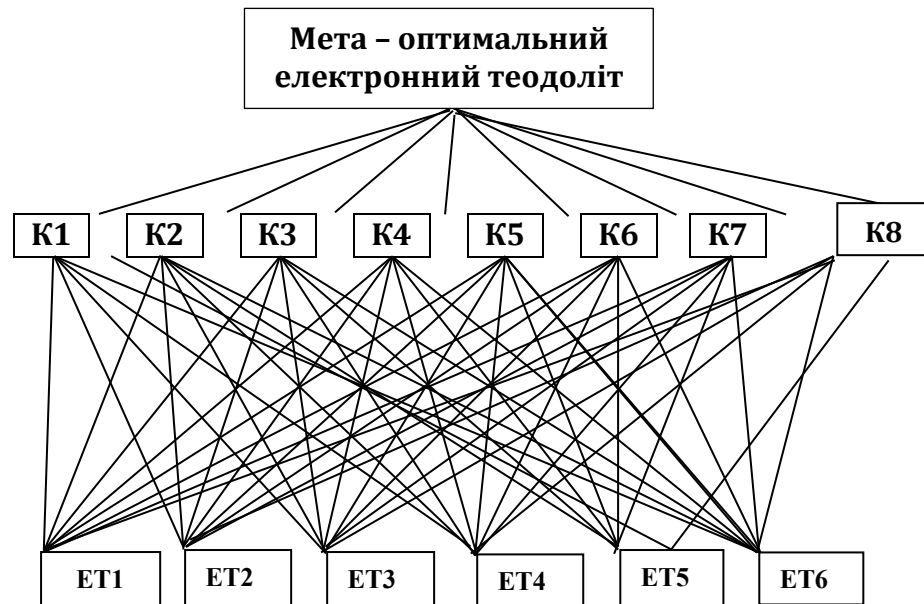


Рис. 1. Ієрархія оцінювання технічного рівня електронних теодолітів

Відзначимо, що оцінювання технічного рівня ЕТ значною мірою залежить від системи переваг особи чи осіб, які здійснюють вибір, і має багатокритеріальний характер. Задача прийняття рішення полягає в виборі найкращого, оптимального варіанту серед заданої множини альтернатив

(ЕТ1–ЕТ6), за якого функція цілі (мети) набуває максимального значення.

Відповідно до методу Т. Сааті будувалася ієрархія критеріїв (К1–К8) та альтернатив (ЕТ1–ЕТ6) (рис. 1). Далі виконувалися попарні порівняння альтернативних варіантів за різними критеріями, а також

подальше ранжування набору альтернатив за всіма критеріями [13, с. 37]. При цьому враховували той факт, що критерії К4, К6 і К7 суперечать іншим: чим менше їхнє значення, тим більший внесок вони роблять у зростання цільової функції.

Відшукування оптимального ЕТ з використанням МАІ здійснено поетапно:

1. Структурування задачі у вигляді ієрархічної структури (на вершині ієрархії – мета – визначення моделі ЕТ з

найкращими характеристиками (властивостями); на проміжному рівні – критерії (характеристики) ($N=8$), а на нижньому рівні розміщені альтернативи – розглядувані типи теодолітів ($M=6$)).

2. На другому етапі проводиться оцінювання значущості кожного з критеріїв стосовно головної мети. Для оцінки значущості критеріїв при їхньому попарному порівнянні використовували шкалу Т. Саати (табл. 2).

Таблиця 2

Шкала відносної важливості

Ступінь	Визначення важливості
1	Однакова значущість
3	Незначна перевага значущості одного елемента над іншим
5	Суттєва або сильна перевага одного елемента над іншим
7	Сильна перевага одного елемента над іншим
9	Абсолютна перевага одного елемента над іншим
2, 4, 6, 8	Проміжні значення між сусідніми важливостями

На основі аналізу наведених у табл. 1 характеристик (властивостей) – критеріїв оптимізації теодолітів стосовно досягнення сформульованої мети п'ятьма досвідченими експертами (геодезичний стаж

кожного – понад 10 років) було проведено оцінювання важливості цих критеріїв, результати якого (в балах) наведені нижче в табл. 3.

Таблиця 3

Експертна оцінка важливості параметрів задачі (критеріїв)

(Бали для кожного критерію заокруглені до більшого цілого від середніх)

Критерії Позначення	Збільшення (кратність), разів.	Час роботи від акумулятора, год.	Пило-вологозахист, IP	Кутлова точність вимірювання, сек.	Кількість рядків дисплею.	Маса приладу, кг	Вартість, тис. грн	Гарантія, років
К	К1	К2	К3	К4	К5	К6	К7	К8
Бал	3	5	6	7	6	5	9	8

Далі, на основі даних **табл. 3**, проводилося оцінювання важливості критеріїв К1, К2, ..., К8 шляхом попарного порівняння відношень їхніх балів, вираховували середнє геометричне відношень і нормований

вектор для кожного з критеріїв.

Як результат, була сформована обернено-симетрична матриця **A** порівнянь [14, с. 94]]. Результати оцінювання наведені в **табл. 4**.

Таблиця 4

Оцінка значущості критеріїв

К	К1	К2	К3	К4	К5	К6	К7	К8	Середнє гео-метр.	Норм. вектор
К1	1	0,6	0,5000	0,4286	0,5000	0,6000	0,3333	0,3750	0,5133	0,0612
К2	1,6667	1	0,8333	0,7143	0,8333	1,0000	0,5556	0,6250	0,8556	0,1020
К3	2,0000	1,2	1,00	0,8571	1,0000	1,2000	0,6667	0,7500	1,0267	0,1224
К4	2,3333	1,4	1,1667	1,0000	1,1667	1,4000	0,7778	0,8750	1,1978	0,1429
К5	2,0000	1,2	1,0000	0,8571	1,0000	1,2000	0,6667	0,7500	1,0267	0,1224
К6	1,6667	1	0,8333	0,7143	0,8333	1,0000	0,5556	0,6250	0,8556	0,1020
К7	3,0000	1,8	1,5000	1,2857	1,5000	1,8000	1,0000	1,1250	1,5400	0,1837
К8	2,6667	1,6	1,3333	1,1429	1,3333	1,6000	0,8889	1,0000	1,3689	0,1633
Сума	16,3333	9,8	8,1667	7,0000	8,1667	9,8000	5,4444	6,1250	8,3844	1,0000

Узгодженість експертної оцінки критеріїв визначалася так [13, с. 39]:
 $\lambda_{\max} = 16,33 \cdot 0,062 + 9,8 \cdot 0,102 + 8,167 \cdot 0,122 + 7 \cdot 0,143 + 8,17 \cdot 0,122 + 9,8 \cdot 0,102 + 5,44 \cdot 0,1837 + 6,125 \cdot 0,1633 = 8,0052$.
 $I_y = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1) = (8,0052 - 8) / 7 = 0,0007$.

Тоді, згідно з даними **табл. 5**, для $n=8$ маємо, що узгодженість $B_y = \frac{I_y}{I_e} = \frac{0,0007}{1,41} = 0,0005$ або 0,05%, тобто вона є в межах норми (менша за 10%).

Таблиця 5

Значення випадкового індексу узгодженості за Т. Сааті [1]

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
I_e	0	0	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49	1,51	1,48	1,56	1,57	1,59

3. На цьому етапі проводили порівняння альтернатив (ЕТ1–ЕТ6) відносно критеріїв (К1-К8) ієрархії за кожним із восьми критеріїв, на основі чого були обчислені нормовані вектори пріоритетів альтернатив. У **табл. 6** як приклад наведені результати обчислення компонент нормованого вектора за критеріями К3 (пряма залежність – більшому значенню відношення порівняння відповідає більше значення цільової функції, тобто чим більший коефіцієнт захисту приладу, тим краще для цільової функції). А також К4 – обернена залежність: чим менше відношення,

тим краще для цільової функції (меншому значенню секунд відповідає краща точність вимірювання).

Перевірено, що для всіх обчислених нормованих векторів показники відношення узгодженості перебувають у допустимих межах.

Зауваження: для наповнення **табл. 6** «Оцінка значущості за критеріями К4, К6 і К7» нами бралися обернені величини, тобто теодолітам з меншими значеннями секунд (вища точність) маси та ціни присвоювалися більші значення відношень порівняння.

Покритеріальне оцінювання

Оцінка значущості за критерієм К2									
К2	ET1	ET2	ET3	ET4	ET5	ET6	Добуток	Сер. гео-метр.	Норм. вектор
ET1	1	2,5	0,8333	1,3333	0,1177	0,5556	0,1816	0,7525	0,07330
ET2	0,4	1	0,3333	0,5333	0,0471	0,2222	0,0007	0,3010	0,02934
ET3	1,2	3	1	1,6	0,1412	0,6667	0,5421	0,9030	0,08791
ET4	0,75	1,875	0,625	1	0,0882	0,4167	0,0323	0,5644	0,05495
ET5	8,5	21,25	7,0833	11,3333	1	4,7222	68472	4,0220	0,62271
ET6	1,8	4,5	1,5	2,4	0,2118	1,0000	6,1751	1,3545	0,13187
СУМА	13,650	34,1250	11,375	18,200	1,6059	7,5833		10,2715	1,00000
Оцінка значущості за критерієм К4									
К4	ET1	ET2	ET3	ET4	ET5	ET6	Добуток	Сер. гео-метр.	Норм. вектор
ET1	1,0000	1,5000	1,0000	2,5000	4,5000	1,0000	16,8750	1,6016	0,271831
ET2	0,6667	1,0000	0,6667	1,6667	3,0000	0,6667	1,4815	1,0677	0,181221
ET3	1,0000	1,5000	1,0000	2,5000	4,5000	1,0000	16,8750	1,6016	0,271831
ET4	0,4000	0,6000	0,4000	1,0000	1,8000	0,4000	0,0691	0,6406	0,108732
ET5	0,2222	0,3333	0,2222	0,5556	1,0000	0,2222	0,00	0,3559	0,060407
ET6	1,0000	0,6667	1,0000	0,4000	0,2222	1,0000	0,06	0,6244	0,105978
СУМА	4,2889	5,6000	4,2889	8,6222	15,0222	4,2889		5,8917	1,000000

4. Далі були розраховані компоненти вектора глобальних пріоритетів як добуток матриці нормованих векторів локальних пріоритетів альтернатив, і вектора-

стовпця локальних пріоритетів критеріїв (табл. 4 і 6 – сині стовпці). Розв'язок задачі одержали у вигляді стовпця:

$$\begin{pmatrix} 0,1698 & 0,0733 & 0,2138 & 0,2718 & 0,1250 & 0,1527 & 0,2139 & 0,1000 \\ 0,1698 & 0,0293 & 0,1431 & 0,1812 & 0,2500 & 0,1559 & 0,1624 & 0,2000 \\ 0,1698 & 0,0879 & 0,1431 & 0,2718 & 0,1250 & 0,1527 & 0,2250 & 0,1000 \\ 0,1698 & 0,0550 & 0,1431 & 0,1087 & 0,1250 & 0,1665 & 0,2660 & 0,2000 \\ 0,1471 & 0,6227 & 0,2138 & 0,0604 & 0,1250 & 0,2094 & 0,0734 & 0,3000 \\ 0,1471 & 0,1319 & 0,1431 & 0,1060 & 0,2500 & 0,1628 & 0,0592 & 0,1000 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 0,0612 \\ 0,1020 \\ 0,1224 \\ 0,1429 \\ 0,1224 \\ 0,1020 \\ 0,1837 \\ 0,1633 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,1639 \\ 0,1621 \\ 0,1587 \\ 0,1607 \\ 0,2053 \\ 0,1494 \end{pmatrix}$$

Найбільша компонента вектора глобальних пріоритетів вказує на модель електронного теодоліта з найкращими технічними характеристиками.

Обчислені з використанням заданих експертних оцінок і методу Сааті рейтинги розглянутих електронних теодолітів за їхнім технічним рівнем показані на рис. 2

нижче. Як видно з діаграми, найвищий технічний рівень має модель Sokkia DT-940/940L (ET5) із показником 0,2053. Друге місце належить моделі моделі Nivel System DT-2L (0,1639). Електронний теодоліт South NT-023 (ET2) – на третьому місці (0,1621), а CST/Berger DGT10 (ET4) і Nivoline DT02 (ET3) – на четвертому і

п'ятому місцях (0,1607 і 0,1587). Модель Spectra Precision DET-2 (ET6) має найнижчий рейтинг (0,1494).

Якщо найвищий технічний рівень

прийняти за 100 %, то рівні решти п'яти моделей становитимуть 79,8; 79; 78; 77,3; 72,8 % відповідно, тобто є близькими між собою.

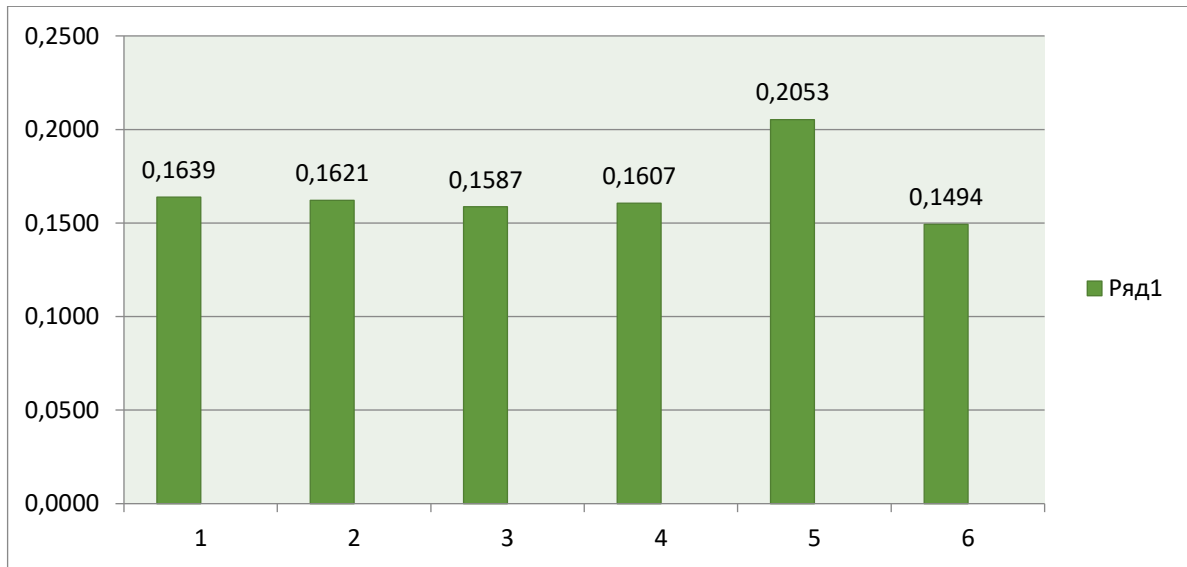


Рис. 2. Діаграма рейтингів електронних теодолітів

Висновки

Електронні теодоліти нового покоління мають вдосконалену конструкцію і є досить надійними. Аналіз одержаних результатів показує, що створені останнім часом моделі ЕТ, хоч і відрізняються певними техніко-економічними характеристиками, проте за своїм технічним рівнем є досить близькі між собою.

Більш точну оцінку технічного рівня ЕТ можна зробити, ввівши в розрахункову схему (як додаткові критерії) наявність спеціального обладнання та програмного забезпечення, комфортність і зручність

роботи геодезистів тощо.

Метод Сааті є ефективним інструментом оцінювання технічних систем і дозволяє особі, що робить вибір, приймати обґрунтовані рішення. Перспективними напрямками подальших досліджень і оцінювання технічного рівня ЕТ можуть стати дослідження залежності між критеріями на основі їхнього кореляційного та факторного аналізу, врахування специфіки роботи з іншими системами, характеру і причин виникнення можливих похибок під час проведення вимірювань, їхньої оснащеності ПЗ.

References

1. Saaty Thomas L., Vargas Luis G. (2012). Models, Methods, Concepts & Applications of the Analytic Hierarchy Process. Second Edition. University of Pittsburgh. Springer: Science + Business Media. New York, 343.
2. Anisenko, O. V. & Platonova, K. A. (2019). 'Suchasni heodezychni prylady, yikh znachennia i rol u heodezychnykh vymyriuvanniakh'. [Modern geodetic devices, their significance and role in geodetic measurements]. *Investments: practice and*

experience. 4, 80–83.

3. Arsenyeva, N. O. & Fomenko, G. R. (2021). 'Heodezychni prylady [Elektronnyi resurs]: konspekt lektsii'. [Modern geodetic devices used during construction, reconstruction and repair work of automobile roads]. *Scientific notes of the V.I. Vernadsky TNU. Series: Technical Sciences*, 32(71), 2, 248–253.
4. Rii, I.F., Bochko, O.I., Bida, O. Yu. 'Suchasni materialy ta instrumenty dlia budivnytstva ta promyslovosti vid TOV «AKS-YUH SYSTEMA»'. [Modern materials and tools for construction

and industry from LLC AKS-YUG SYSTEM] Electronic geodetic instruments: teaching aids / Lviv, 336.

5. Kin, D. O. (2024). *'Heodezychna obladnannia ta instrumenty'* [Geodetic instruments] / D. O. Kin, N. Yu. Lazorenko, V. S. Onyshchuk. [Electronic resource]: lecture notes Kyiv: KNUCA, 173.

6. Nadzir, Z. A., Irfansyah, M. (2024) Using Geodetic Methods in Road Construction Planning: To What Extent Will It Be Effective? *Journal of Infrastructure Policy and Management*. 7(2). 167–180.

7. 7S. (2025). Modern materials and tools for construction and industry from LLC AKS-YUG SYSTEM. [Electronic resource]. Retrieved from: <https://systema.dp.ua/ua/p1221942-cstberger-dgt10-elektron-nyj.html>

8. Geomagazin. (2026). Geodetic equipment and tools. [Electronic resource]. Retrieved from: https://geomagazin.com.ua/ua/g8047801-teodolity?srsId=Afm-BOootY6gRCJsHD0KrQe37JSjqMZb4V98RLr32k1C6_lGJynjMzbj.

9. Geomarket. (2026). Geodetic equipment, instruments for geodesy. [Electronic resource]. Retrieved from: <https://geomarket.in.ua/ua/south-nt-023>.

10. Geoshop. (2024) *'Teodolity elektronni'*. [Electronic theodolites [Electronic resource]]. Retrieved from: <https://geoshop.com.ua/products/teodolit-elektronnij-nivel-system-dt-5>.

11. Uniquenav. (2026). Electronic-digital-theodolite. 2025.04.22 [Electronic resource,

Retrieved from: <https://www.uniquenav.com/application/electronic-digital-theodolite>

12. Iershova, N. M. (2015). *'Prinyatie reshenii na osnove metoda analiza ierarkhii'*. [Decision-making based on the method of hierarchy analysis]. *Bulletin of the Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture*, 9 (210), 38–45.

13. Romanchuk, Ya. P., Sokil, B. I. & Baranov, A. V. (2021). *'Vykorystannia metodu analizu ierarkhii dlia otsiniuvannia tekhnichnoho rivnia viisko-vykh avtokraniv'* [Using the method of hierarchy analysis to assess the technical level of military truck cranes]. *Armaments and military equipment*, 2(30). 35–43.

14. Tkachova O. K. (2015). *'Metod Saaty pry pryiniatti upravlinskykh rishen'*. [Saaty's method in making management decisions]. *State and regions. Series: Economy and entrepreneurship*, 4, 92–96.

15. Vakulchyk, S. O., Baybuz, O. G. (2024). *'Analiz ta realizatsiia metodu pidtrymky pryiniattia rishen'*. [Analysis and implementation of the decision support method]. *Current problems of automation and information technologies*, 28, 265–273.

ISSN 0365-8392

DOI: 10.33868/0365-8392-2026-1-286-24-32

Дата першого надходження статті: 27.01.2026

Дата прийняття до друку: 15.03.2026

Дата публікації: 31.03.2026



УДК 625.7

DOI: 10.33868/0365-8392-2026-1-286-33-41

© Т. А. Терещенко, канд. хім. наук,
 провідний науковий співробітник,
 ORCID: 0000-0001-7584-9031,
 e-mail: chemistry@nidi.org.ua
 (ДП «НИІ»)

© Tatyana Tereshchenko,
 Candidate of Chemical Sciences (PhD),
 Senior Research Officer,
 ORCID: 0000-0001-7584-9031,
 e-mail: chemistry@nidi.org.ua
 ("NIDI" SE)

ПРИМИКАННЯ/ПЕРЕХРЕЩЕННЯ АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРІГ В ОДНОМУ РІВНІ З ОРГАНІЗУВАННЯМ РУХУ ПО КОЛУ: ДОСВІД США ТА ЄВРОПИ

ROUNDAABOUTS: THE EXPERIENCE IN THE USA AND EUROPE

Анотація. Примикання/перехрещення автомобільних доріг в одному рівні з організуванням руху по колу (ПРК), визначувані англomовним терміном *roundabouts*, є одним з видів примикань/перехрещень в одному рівні кільцевого типу, де власне геометрія елементів ПРК є засобом організування руху та пріоритет у русі мають транспортні засоби на кільцевій проїзній частині. Доведена світовою практикою ефективність ПРК вказує на доцільність більш широкого впровадження відповідних проектних рішень на національному рівні.

У статті, з урахуванням останніх досягнень світової практики з цього напрямку, виконано загальний аналіз принципів проектування та функціонування ПРК відповідно до категоризації для ПРК, що функціонують з обслуговуванням усіх категорій учасників дорожнього руху або у складі систем перерозподілення транспортних потоків, зокрема транспортних розв'язок автомагістралей.

У висновках визначено основні напрямки розширення, на національному рівні, вимог щодо проектування та принципів сталого функціонування ПРК із урахуванням сучасних практик.

Ключові слова: автомобільна дорога, дорожній одяг, примикання/перехрещення автомобільних доріг в одному рівні з організуванням руху по колу, розрахунковий транспортний засіб, транспортна розв'язка.

Abstract. The roundabout has been considered the prominent concept for the motor roads at-grade intersections equally important for urban streets network in built-up areas and for transnational roads network. A roundabout differs from other types of at-grade circular intersections for two basic points: the geometry of the roundabout elements itself is the measure of traffic organization independent from many external factors; the priority shall be given to circulating vehicles. The roundabout appears to be an element of the "Vision Zero" strategy for the road safety.

This paper deals with the concept of a roundabout through its operational and designing principles in relation with the roundabout type and functions. The roundabout design and operation were analyzed in certain main directions: systematization of the roundabout elements and their operational principles, principles of the roundabout elements vertical and horizontal alignment, principles for the selection of the vehicle type to be assigned for the roundabout design, and principles for the pavement type selection. According to the results of main roundabout elements geometry analysis, the principles of roundabouts categorization were defined which allow designers to justify the roundabout parameters to operational conditions and traffic flow characteristics. The vertical and horizontal alignment, peculiarly the alignment of road axes on approaches with the roundabout geometrical center shall be accepted as a perfect design toll for objects in restricted or congested areas.

Conclusions from that brief research pointed out the necessity for elaborating, at the national level, standard provisions fixing the concept of a roundabout through singling out the principles of the roundabout functional efficiency and design approaches including alignment, design vehicle selection and pavement design.

Keywords: design vehicle, interchange, motor road, road pavement, roundabout.

Вступ

Згідно зі світовою практикою питання безпеки на автомобільних дорогах ефективно вирішують улаштуванням примикань/перехрещень в одному рівні з організуванням руху по колу (далі – ПРК), де транспортні засоби (ТЗ) рухаються в

одному напрямку, зі швидкістю, регульованою геометрією елемента дороги; передумови безпеки є сталими й практично не залежать від зовнішніх чинників, що дозволяє уникати потенційно небезпечних маневрів та епізодів, які можуть призвести до фронтального зіткнення ТЗ.

Визначення ПРК як примикання/перехрещення в одному рівні з організуванням руху по колу, з урахуванням положень регуляторних актів ЄС [1], було запропоновано в [2] для англomовного терміна «*roundabout*» і застосовано в [3].

ПРК надають можливість суттєво знизити кількість ДТП з тяжкими наслідками, тому вони є перспективними інженерними рішеннями концепції «*Vision Zero*» для мережі автомобільних доріг. Згідно з даними [4] у США кількість ПРК за період з 1998 р. до 2021 р. збільшилася на два порядки.

У цій статті проаналізовано загальні сучасні підходи до проектування ПРК, які можуть бути застосовані для розширення вимог на національному рівні. Викладений матеріал певною мірою є продовженням тематики публікації [2].

Порівняльний аналіз різних видів примикань/перехрещень в одному рівні кільцевого типу

Згідно з [4] виділяють примикання/перехрещення в одному рівні кільцевого типу (*circular intersections*):

- з організуванням руху по колу (ПРК), *roundabouts*;
- великого діаметра, *rotaries*;
- з організуванням руху через застосування сигналів, *signalized traffic circles*;
- для уповільнення руху, *traffic calming circles*.

На підставі деталізації, наданої в [4], ПРК є примикання/перехрещення автомобільних доріг в одному рівні з кільцевою проїзною частиною, з забезпеченням циркуляції транспортного потоку навколо центрального острівця за напрямком проти годинникової стрілки¹ і з наданням переваги в русі ТЗ на кільцевій проїзній частині – ПРК набули популярності після виділення пріоритетності цього принципу.

ТЗ на в'їзді, для доступу на кільцеву проїзну частину, мають використовувати

інтервали між ТЗ на ній, що вимагає обмеження співвідношення між кількістю ТЗ, які циркулюють на ПРК, та її пропускною здатністю (*volume-to-capacity ratio*)² – рекомендовано в межах від 0,85 до 0,90. За перевищення верхнього значення може відбутися швидке блокування транспортного потоку у зв'язку з тривалим очікуванням на в'їзді.

В окремих випадках рух на відгалуженнях на підходах до ПРК упорядковують через застосування сигналів, проте зі збереженням принципів функціонування ПРК.

Основними елементами ПРК є:

- центральний острівць (*central island*) – центральний елемент переважно круглої форми, навколо якого організовано рух та який, частково або повністю, може бути проїжджим; непроїжджа частина може нести елементи ландшафтного дизайну;
- розділювальний острівць (*splitter island*) – елемент дороги на відгалуженні ПРК, що розділяє транспортні потоки на в'їзд та виїзд, за потреби – піднесений над рівнем проїзної частини, геометрія якого може слугувати уповільненню ТЗ на в'їзді; у разі виконання з піднесеним профілем та за достатньої ширини може слугувати острівцем безпеки пішоходів;
- кільцева проїзна частина (*circulatory roadway*) – проїзна частина переважно круглої форми, на якій організовано циркуляцію ТЗ;
- перон для проїзду вантажного автомобіля (*truck apron*) – улаштований на центральному острівці або за межами смуг руху ззовні (охоплюючи в'їзди та виїзди з ПРК), за потреби – також на розділювальних острівцях піднесений над рівнем проїзної частини елемент, застосований для проїзду по ньому вантажних автомобілів (далі – перон вантажного автомобіля);³
- контрольований в'їзд на кільцеву проїзну частину (*yield at entry*) – елемент організування руху, який регламентує надання

¹ Для правостороннього руху.

² Пропускна здатність (*capacity*) ПРК визначається пропускною здатністю та кількістю смуг на кільцевій проїзній частині. Стосовно визначення

вказаного відношення: інтервал для аналізування може становити від 15 хв, до 1 год.

³ Проектують так, щоб забезпечувати поворот вантажних автомобілів із причепами, напівпричепами з заїздом на перон переважно лише задніх коліс.

переваги в русі ТЗ на кільцевій проїзній частині з лівого боку від ТЗ на в'їзді.

Для певних категорій ПРК проєктують пішохідні доріжки, за потреби – буферну смугу, а також заїзди/виїзди для велосипедистів.

Геометрична форма ПРК може відрізнятися від круглої, що залежить від діаметра вписаного кола *ICD* (*inscribed circle diameter*), який визначають на відтинку між зовнішніми крайками кільцевої проїзної частини. Проєктування у формі овалу, еліпсу є доцільним у разі різної ширини проїзної частини доріг на відгалуженнях ПРК та за зміщення осевої лінії дороги на відгалуженні від радіального положення, а також є поширеним, якщо кількість відгалужень перевищує чотири.

Примикання/перехрещення в одному рівні кільцевого типу великого діаметра тип *rotary* (з діаметром понад 100 м) наведено на **рис. 1**.



Рис. 1. Примикання/перехрещення в одному рівні кільцевого типу великого діаметра (*rotary*), згідно з [4]

Порівняно з ПРК примикання/перехрещення тип *rotary* характеризується значно більшою швидкістю руху ТЗ, частим змінюванням швидкості руху і смуг руху на кільцевій проїзній частині. В'їзд ТЗ на кільцеву проїзну частину на таких примиканнях/перехрещеннях може відбуватися на значній швидкості й перевагу в русі набувають ТЗ на в'їзді.

Поряд із цим для типу *rotary* часто застосовують змішане - для транспортних потоків на кільцевій проїзній частині та на в'їзді – регулювання руху, що не сприяє безпеці учасників дорожнього руху.

Тип *signalized traffic circle* передбачає застосування сигналів на одному або на кількох в'їздах, відповідно до чого на кільцевій проїзній частині відбувається регульоване накопичення ТЗ.

Тип *traffic calming circle* влаштовують переважно у населених пунктах, за малої інтенсивності руху ТЗ, із центральним острівцем, піднесеним над проїзною частиною, де для вантажних автомобілів може бути дозволений лівий поворот перед центральним острівцем.

Загальні підходи до категоризації ПРК

Пропоновану в [4] категоризацію ПРК наведено в **табл. 1**, проте віднесення ПРК до певної категорії за будь-яким з цих параметрів не є вичерпним – автори зазначають, що категорії ПРК не приймають за основу проєктування, першочергове значення має адаптація функцій ПРК до умов функціонування об'єкту і транспортних потоків.

Категорії та параметри ПРК

Категорія ПРК	Центральний острівцець	Розділювальний острівцець	ICD, м	Кількість кільцевих смуг руху
Міні - ПРК	проїжджий	за потреби – проїжджий, із наскрізним пішохідним переходом	від 14 до 27	1
Компактна ПРК	за потреби – проїжджий	те ж саме	від 20 до 37	1
ПРК з кільцевою проїзною частиною з одною смугою руху (односмугова ПРК)	непроїжджий, переважно з пероном вантажного автомобіля	непроїжджий, за потреби – з наскрізним або з таким, де передбачено острівцець безпеки, пішохідним переходом	від 27 до 55	1
ПРК з багатосмуговою кільцевою проїзною частиною (багатосмугова ПРК)	те ж саме	те ж саме	від 46 до 61*	2+
* У роботі [4] окремо наведено також деталізацію значень ICD для ПРК з дво- та трисмуговою кільцевою проїзною частиною і зазначено, що ICD приймають переважно в інтервалах від 41 м до 55 м та від 58 до 73 м відповідно.				

На параметри основних елементів ПРК впливають параметри розрахункового ТЗ. Улаштування правоповоротних об'їздів дозволяє зменшувати ICD. Наведені в **табл. 1** значення ICD для міні – ПРК і компактної ПРК корелюють із певними параметрами ПРК, що влаштовують у межах зон забудови (*built-up areas*) згідно з [5] (Німеччина). У складі мережі автомобільних доріг США переважну кількість ПРК становлять односмугові ПРК (70 %) [6].

Засади проектування та ефективного функціонування ПРК

ПРК можуть бути влаштовані для обслуговування всіх категорій учасників дорожнього руху або в складі системи перерозподілення транспортних потоків, переважно на автомагістралях.

Міні-ПРК та компактні ПРК улаштовують у межах зон забудови, на ділянках обмеженої площі, у зв'язку з чим на таких ПРК передбачено певні проїжджі елементи [4, 5]. Проектні рішення і організування руху на ПРК з проїжджими елементами повинні спрямовувати водіїв великих ТЗ так, щоб зводити до мінімуму потребу в русі центральним острівцем, проте чим меншим є ICD, тим більшою є така потреба; на міні-ПРК, а в окремих випадках і компактних ПРК потребується наскрізний, через центральний

острівцець, проїзд для автобусів [4, 5]. Особливої уваги потребує також організування руху на відгалуженнях у разі влаштування проїжджих розділювальних острівців.

Для ПРК зі значенням ICD > 27 м у більшості випадків передбачено перон вантажного автомобіля на центральному острівці, але проектні рішення повинні забезпечувати проїзд найбільшого за розмірами ТЗ для перевезення пасажирів, який прогнозовано в складі транспортного потоку, без заїзду на перон вантажного автомобіля.

Багатосмугові ПРК мають не менше ніж дві кільцеві смуги руху хоча б на одній частині ПРК. Проектні рішення для багатосмугових ПРК уможливають більшу швидкість руху ТЗ на в'їздах та на кільцевих смугах, що пояснюється більшою шириною в'їздів, більшою загальною шириною проїзної частини, і, відповідно, більшим радіусом кривих на ПРК. У даному випадку визначають мінімальну ширину проїзної частини, що забезпечує належне функціонування ПРК.

На **рис. 2** наведено схему, яку застосовують, щоб уможливити досягнення водієм певних точок виїзду з ПРК без маневрування та уникнути ризику блокування ТЗ в транспортному потоці; ТЗ перешиковується на виїзді з ПРК на зовнішню смугу без виконання власне маневру зі зміни смуги руху.



Рис. 2. ПРК зі спіралеподібним розміщенням кільцевої проїзної частини [4]

У більшості випадків зазначена на **рис. 2** схема нанесення дорожньої розмітки пов'язана із центральним острівцем неправильної форми. У разі організування руху на ПРК, де виконано спіралеподібне розміщення, з розділенням транспортних потоків на кільцевій проїзній частині (часто – з застосуванням механічних засобів), ПРК визначають як турбо-ПРК; така категоризація є застосовною переважно в Європі [7].

Для одно- та багатосмугових ПРК потрібно забезпечувати проїзд вантажних автомобілів із напівпричепами, причепами – у процесі проектування ПРК такі ТЗ можуть бути прийняті як розрахункові ТЗ. Проектування одно- та багатосмугових ПРК має забезпечувати проїзд розрахункового ТЗ по одній смузі руху, або з виїздом на суміжну смугу чи з заїздом на перон вантажного автомобіля. Критичним є вибір розрахункового ТЗ, оскільки вони можуть різнитися для транспортних потоків, що взаємодіють на ПРК. Пожежні автомобілі й інші автомобілі служб екстреного реагування та автобуси як правило віднесено до ТЗ, проїзд яких має бути забезпечено виключно по проїзній частині.

Поряд з цим під час проектування ПРК може потребуватися урахування ТЗ, для яких очікують меншу інтенсивність руху, проте які мають більші габаритні розміри (охоплюючи, за потреби, ТЗ, які за своїми габаритно-ваговими параметрами потребують отримання дозволу на проїзд за встановленим маршрутом *oversize/overweight vehicle, OSOW*). Відповідний алгоритм проектування ПРК характеризують як

проектування за максимально можливими габаритами ТЗ. У таких випадках визначають проїжджі елементи ПРК (перон вантажного автомобіля на центральному острівці, на розділювальних острівцях) і, за потреби, передбачають укріплену поверхню, прилеглу ззовні до проїзної частини ПРК, для можливості виїзду на неї ТЗ під час руху, а також можливість застосування переносних дорожніх знаків. Прийнятою практикою забезпечення проїзду *OSOW* є застосування правоповоротної об'їзної смуги з виконанням повороту ліворуч на зустрічну смугу руху на відгалуженні, з перетинанням розділювальної смуги першої дороги, як це наведено на **рис. 3**.



Рис. 3. Маршрут руху великогабаритних/великовагових ТЗ на ПРК, згідно з [4]

Прокладання маршруту аналогічно до **рис. 3** може бути особливо ефективним у разі обмежень на виконання повороту великогабаритного/великовагового ТЗ праворуч між двома суміжними відгалуженнями ПРК. На таких ПРК інші ТЗ великого розміру застосовують для проїзду на кільцевій проїзній частині перон вантажного автомобіля, ширина якого може сягати 4,6 м; під час проектування ширину перону визначають з урахуванням траєкторії (шаблону) повороту ТЗ.

У складі транспортних розв'язок (переважно ромбічних, а також типу «лист конюшини») ПРК проектують на сполучних зонах з'їздів (заїздів/виїздів) транспортної розв'язки на прикінцевих ділянках (*ramp terminal intersection*) (**рис. 4**).



Рис. 4. ПРК як елемент ромбічної транспортної розв'язки на сполучних зонах з'їздів, згідно з [4]

Зазначений підхід до проектування з'їздів транспортних розв'язок є особливо актуальним, коли здатність транспортної споруди до накопичування ТЗ на відтинку між примиканнями/перехрещеннями є обмеженою.

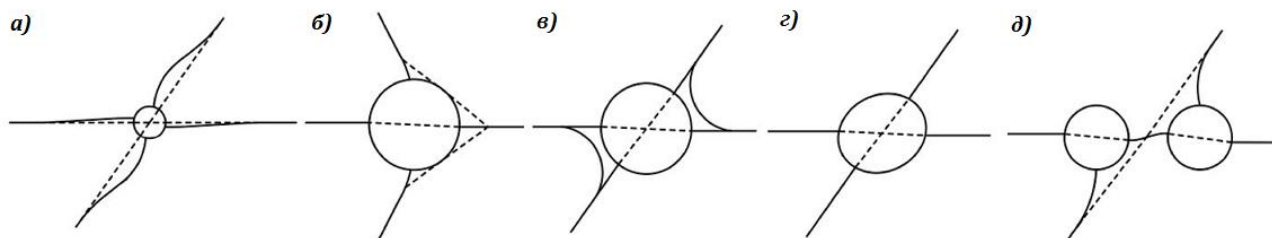


Рис. 5. Загальні схеми основних проектних рішень для оптимізації скісних кутів ПРК, згідно з [4]

Регулювання швидкості руху ТЗ через геометрію елементів ПРК і оптимальне сполучення функціональності ПРК та вартості будівництва забезпечують шляхом оптимізації розташування осьових ліній доріг на відгалуженнях відносно центра ІС; існує три варіанти рішень (рис. 6).

Радіальне розташування осьових ліній у разі проектування односмугової ПРК (рис. 6 а) забезпечує ефективне регулювання швидкості руху ТЗ на в'їзді та виїзді з ПРК. Водночас зцентровування забезпечує помітність центрального острівця.

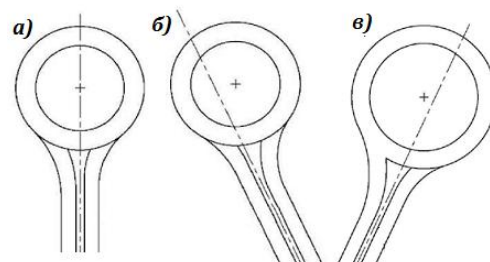


Рис. 6. Розташування осьової лінії дороги на відгалуженні відносно центра ІС: а) зцентровування; б) лівостороннє зміщення; в) правостороннє зміщення

Лівостороннє зміщення осьової лінії дороги на відгалуженні (рис. 6 б) у порівнянні зі зцентровуванням потребує переважно менших значень ICD для врегулювання швидкості руху.

Правостороннє зміщення (рис. 6 в)) спричиняє зміну геометрії на в'їзді зі збільшенням швидкості руху ТЗ, проте таке рішення є дозволеним, якщо зниження швидкості може бути забезпечено іншим шляхом; рішення переважно є застосовним на ПРК із великими значеннями *ICD*.

Перетинання осьових ліній доріг на відгалуженнях під прямим кутом або з наближенням до такого значення є оптимальним для руху на всіх частинах ПРК. Скісні кути переважно потребують більш високих значень *ICD* для належного функціонування ПРК. Великі кути перетинання осьових ліній негативно впливають на безпеку внаслідок уможливлення високої швидкості руху, особливо під час виконання повороту праворуч – прикладом можуть слугувати ПРК У – подібної форми. Якщо кут перетинання є більшим ніж 105° , потребується лівостороннє зміщення осьової лінії на відповідному відгалуженні або коригування геометрії розділювальних островців.

Особливості проектування проїзної частини та центрального островця

Для односмугової ПРК найбільш поширеним підходом є проектування проїзної частини з односхилим поперечним профілем, низхідним назовні, прийнятим є похил

2 % [4]. Таке проектне рішення забезпечує помітність центрального островця, сприяє зниженню швидкості руху ТЗ на кільцевій проїзній частині й забезпечує відсутність зламів профілю поверхні на в'їздах та виїздах. Інші варіанти проектних рішень для ПРК наведено на рис. 7.

Схема на рис. 7 а) є оптимальною для забезпечення помітності центрального островця; схеми на рис. 7 б), в) та г) потребують забезпечення водовідведення з конструкції ПРК або влаштування дрена на пероні вантажного автомобіля чи на пероні вантажного автомобіля і по периметру ПРК відповідно.

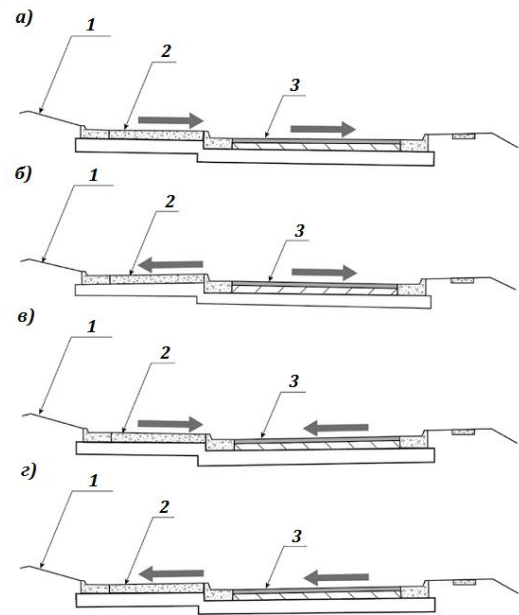


Рис. 7. Схеми проектування ПРК у перерізі, згідно з [4]:
1 – центральний острівець; 2 – перон вантажного автомобіля; 3 – кільцева проїзна частина.

Для багатосмугових ПРК профіль кільцевої проїзної частини проектують дво-схилим, переважно - на 2/3 ширини низхідним у напрямку центрального островця, та на 1/3 – у напрямку зовнішньої крайки. Такий підхід дозволяє скоротити (розділити) контури поверхневого водовідведення і регулює похил поверхні під задніми колесами вантажного автомобіля з причепом, який застосовує для проїзду перон вантажного автомобіля, проте такі проектні рішення є більш складними для реалізації.

Перони вантажного автомобіля для одно- та багатосмугових ПРК проектують з похилом до 2 % (в окремих випадках – 1 %) [8], переважно низхідними назовні; між пероном і кільцевою проїзною частиною влаштовують бордюри для згладжування різниці висот під час проїзду коліс вантажного автомобіля.

Для центральних островців міні – ПРК та компактних ПРК зі згладженим або опуклим профілем рекомендовано вживати додаткових заходів з підвищення помітності. Для міні – ПРК є можливим односхилий профіль центрального островця, де найбільш висока точка ПРК не співпадає з центром центрального островця, що є

доцільним для забезпечення проїзду ТЗ з малим кліренсом.

Загальні питання проектування конструкції дорожнього одягу на ПРК

Згідно з [4, 6] на кільцевій проїзній частині ПРК, а також на підходах до ПРК дорожній одяг може бути влаштований з верхніми шарами бетону або асфальтобетону, залежно від контексту проєкту в цілому й прийнятих практик. У рекомендаціях [6] зазначено, що всі типи бетонних покривів на ПРК функціонують ідентично до інших «традиційних» елементів автомобільних доріг, на відміну від чого асфальтобетонні покриття зазнають більшого обсягу пошкоджень через вплив відцентрових сил під час проїзду ТЗ. Такий розподіл навантажень від коліс призводить до швидкого утворення колії, особливо на зовнішній траєкторії кочення коліс. За нежорсткої конструкції дорожнього одягу кільцевої проїзної частини перон вантажного автомобіля може бути влаштований з бетонним покритвом або з елементів мостіння [5].

Перевагу за можливості надають ПРК з жорсткою конструкцією дорожнього одягу: з шовним неармованим, безперервно армованим або збірним бетонним покритвом, де в другому випадку поздовжню арматуру розташовують концентрично – згідно з [6] саме такий тип конструкції дорожнього одягу ПРК є поширеним у Європі. За наявності швів бетонного покриття важливим є винесення місць розташування швів за межі границь смуг руху для уникнення помилок водіїв, коли траєкторію руху приймають уздовж шва, що створює небезпеку проїзду ТЗ «бік-о-бік». Розроблення плану розташування (улаштування) швів є важливим елементом проектування ПРК з бетонним покритвом [4].

Обсяги робіт з утримування, ремонтів асфальтобетонного покриття на ПРК, у порівнянні з іншими елементами доріг, є більшими. Окремі типи бетонних покривів на ПРК потребують більш інтенсивного моніторингу швів. Після завершення строку служби ПРК з жорстким дорожнім одягом потребується повна заміна конструкції [4].

Висновки

1. Примикання/перехрещення автомобільних доріг в одному рівні з організаціями руху по колу, ПРК, (англомовний термін – *roundabout*), є окремою категорією примикань/перехрещень в одному рівні кільцевого типу, з організаціями руху через геометрію елементів ПРК і наданням переваги в русі ТЗ на кільцевій проїзній частині, де засадою ефективного функціонування є обмеження відношення кількості ТЗ на кільцевій проїзній частині до пропускної здатності ПРК.

2. Гнучкість проєктних рішень забезпечує можливість улаштування ПРК як виділеного елемента автомобільної дороги – з обслуговуванням усіх категорій учасників дорожнього руху, або в складі системи перерозподілення транспортних потоків, на автомагістралях, з відповідним вибором основних елементів ПРК.

3. Важливим чинником сталого функціонування транспортної інфраструктури і, відтак, економічного розвитку, доцільно визнати проектування ПРК не тільки за параметрами розрахункового ТЗ, але, за потреби, й за максимально можливими розмірами ТЗ для забезпечення проїзду великогабаритних/великовагових ТЗ.

4. Якщо інтенсивність руху потребує улаштування ПРК з кількома смугами руху на кільцевій проїзній частині, більш економічно ефективним може бути улаштування ПРК із жорстким дорожнім одягом.

5. Зазначені на рівні висновків особливості проектування та функціонування ПРК доцільно урахувати на рівні національних вимог. Відправною точкою такої роботи доцільно прийняти розділення за функціональністю ПРК як виділеного елемента автомобільної дороги і ПРК як елемента системи перерозподілення транспортних потоків.

References

1. United Nations. (2016). European Agreement on Main Inter-National Traffic Arteries (AGR).

Consolidated version
ECE/TRANS/SC.1/2016/3/Rev.1. 43.

Retrieved from:
<https://unece.org/DAM/trans/doc/2016/sc1/ECE-TRANS-SC1-2016-03-Rev1e.pdf>

2. Tereshchenko, T. (2024). Interchange systems. Interchanges. Used terminology. Roads and bridges, Kyiv, 30, 398–406 [in Ukrainian]

DOI: <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2024.30.398>

3. TC. (2025). DSTU EN 13863-1:2024 (EN 13863-1:2003, IDT) Betonni pokryvy. Chastyna 1. Metod vyprobuvan z vyznachennia tovshchyny betonnoho pokryvu metodom obstezhennia (National Ukrainian Standard (DSTU EN 13863-1:2024 (EN 13863-1:2003, IDT)) Concrete pavements – Part 1: Test method for the determination of the thickness of a concrete pavement by survey method). Kyiv, 5 (Information and documentation) [in Ukrainian]

4. Hedges, C. J., Dekelbab, W., Hanna, A. N., Griswold, E., Barnes, N., DiAngelis, H. (2023). Guide for roundabouts. NCHRP research Report 1043. Transportation research Board, 426.

Retrieved from: <https://nap.nationalacademies.org/catalog/27069/guide-for-roundabouts>

5. FGSV. (2006). Directives for the design of urban roads. English Version of «Richtlinien für die Anlage von Stadtstraßen», Edition 2006, Translation 2012. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen

e.V., Köln, 131. Retrieved from: https://www.fgsv-verlag.de/pub/media/pdf/200_E_PDF.v.pdf

6. Department of Transportation, Federal Highway Administration. (2023). Selection of pavement types for roundabout intersections. Tech Brief

FHWA – HIF – 23 – 075. U.S. 2023. Retrieved June from: <https://www.fhwa.dot.gov/pavement/pubs/hif23075.pdf>

7. Petru, J.; Krivda, V. (2021). An Analysis of Turbo Roundabouts from the Perspective of Sustainability of Road Transportation. Sustainability. 2021, 13, 2119. Retrieved from: <https://doi.org/10.3390/su13042119>

8. Rens, L. (2013). Concrete roundabouts. European Concrete Paving Association, 28. Retrieved from: <https://www.eupave.eu/wp-content/uploads/eupave-concrete-roundabouts.pdf>.

ISSN 0365-8392

DOI: 10.33868/0365-8392-2026-1-286-33-41

Дата першого надходження статті: 30.12.2025

Дата прийняття до друку: 15.03.2026

Дата публікації: 31.03.2026



УДК 656.072

DOI: 10.33868/0365-8392-2026-1-286-42-48

© Л. С. Абрамова, докт. техн. наук, професор кафедри організації та безпеки дорожнього руху, ORCID: 0000-0003-1182-9618, e-mail: abramova_ls@ukr.net;

© І. С. Наглюк, докт. техн. наук, завідувач кафедри організації та безпеки дорожнього руху, ORCID: 0000-0001-9411-4479, e-mail: isnagluk@ukr.net;

© О. С. Черепакха, канд. техн. наук, доцент кафедри транспортних технологій, ORCID: 0009-0004-6129-1945, e-mail: a.cherepaha@tek-europa.com.ua (Харківський національний автомобільно-дорожній університет)

© Lyudmyla Abramova, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Road Traffic Management and Safety, ORCID: 0000-0003-1182-9618, e-mail: abramova_ls@ukr.net

© Ivan Nahliuk, Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Road Traffic Management and Safety, ORCID: 0000-0001-9411-4479, e-mail: isnagluk@ukr.net;

© Oleksandr Cherepakha, PhD, Associate Professor of the Department of Transport Technologies, ORCID: 0009-0004-6129-1945, e-mail: a.cherepaha@tek-europa.com.ua (Kharkiv National Automobile and Highway University)

ОЦІНКА ЯКОСТІ ТРАНСПОРТНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ ПАСАЖИРІВ У ТРАНСПОРТНО-ПЕРЕСАДОЧНИХ ВУЗЛАХ

EVALUATION OF PASSENGER TRANSPORT SERVICE QUALITY AT PUBLIC TRANSPORT INTERCHANGES

Анотація. Досліджено особливості організації транспортно-обслуговування пасажирів у транспортно-пересадочних вузлах на прикладі вузла «пл. Вокзальна» м. Дніпра з позицій оцінювання якості послуг громадського транспорту. Виявлено основні проблеми функціонування пасажирського транспорту в місті. Запропоновано структурну модель інформаційного обміну у транспортно-пересадочному вузлі, що дозволяє аналізувати інформаційні та маршрутні потоки, виявляти конфліктні зони та оптимізувати взаємодію видів транспорту. Основним оціночним критерієм визначено мінімальний час пересадки пасажирів за умови допустимого рівня конфліктності потоків, як одного з ключових показників якості транспортних послуг. Експериментальні дослідження підтвердили доцільність коригування тривалості простою транспортних засобів для скорочення часу очікування у години пікового навантаження. Отримані результати можуть бути використані для удосконалення системи міських пасажирських перевезень і підвищення якості транспортно-обслуговування у транспортно-пересадочних вузлах.

Ключові слова: громадський транспорт, транспортно-пересадочний вузол, якість транспортно-обслуговування, синхронізація розкладу руху

Abstract. The paper addresses the problem of insufficient quality of passenger transport services at public transport interchanges, caused by inefficient coordination of transport modes and excessive transfer waiting times. The main problems in the operation of urban public transport in Dnipro include the uneven distribution of the transport fleet across routes, insufficient traffic frequency during rush hours, overloading at transport hubs, and low passenger comfort due to excessive waiting times for transfers. A structural model of the public transport interchange is proposed, enabling analysis of internal parameters, information flows, and interactions between routes. This approach enables the identification of conflict points, the management of arrival time information, and the synchronization of transport operations. The main assessment criterion is to minimize passenger transfer time, subject to constraints on the acceptable level of traffic flow conflicts.

Experimental studies conducted at the "Vokzalna Square" transport hub revealed significant variations in passenger flows during the morning and evening peak periods, largely dependent on schedules, arrival times of different transport modes, and deviations from timetables. The results demonstrate that moderate increases in vehicle dwell time at stops reduce transfer waiting times, whereas excessive dwell time has negative effects.

Keywords: public transport, transport interchange, quality of transport services, synchronization of timetables.

Вступ

Міський пасажирський транспорт (далі – МПТ) відіграє ключову роль у функціонуванні транспортної системи великих міст, забезпечуючи щоденну мобільність населення. Водночас значна частина проблем, пов'язаних із якістю транспортного обслуговування, виникає саме у транспортно-пересадочних вузлах (далі – ТПВ), що забезпечують пересадку пасажирів з одного виду транспорту на другий. Недостатньо ефективна організація роботи таких вузлів спричиняє затримки, перевантаження інфраструктури, погіршення рівня сервісу та створює додаткові незручності для пасажирів. Однією з ключових проблем взаємодії міського пасажирського транспорту в межах ТПВ є неузгодженість розкладів руху різних маршрутів, що ускладнює оперативну та комфортну пересадку пасажирів.

Теоретичні дослідження у даній сфері охоплюють кілька ключових напрямів [1].

По-перше, значна увага приділяється моделюванню транспортних процесів. Застосування математичних моделей дає можливість прогнозувати обсяги пасажиропотоків і підвищувати ефективність роботи рухомого складу. Одним із найпоширеніших інструментів є імітаційне моделювання, яке дозволяє оцінити наслідки змін у розкладах руху або структурі ТПВ для функціонування всієї системи.

По-друге, важливим напрямом є оптимізація розкладів руху. Теоретичні підходи акцентують на необхідності узгодження графіків різних видів транспорту. Особлива увага приділяється скороченню часу очікування під час пересадок, що безпосередньо впливає на рівень задоволеності пасажирів.

По-третє, розглядається системний підхід до проектування ТПВ, який має ґрунтуватися на принципах безпеки, ергономічності та доступності. Планувальні рішення повинні забезпечувати зручність пересадок, мінімізувати конфлікти пішохідних потоків і створювати належні умови для маломобільних груп населення.

Більшість сучасних дослідників зосереджується на впровадженні системних

показників оцінювання якості функціонування ТПВ. Так, авторами роботи [2] запропоновано комплексний підхід до формування ефективних транспортних вузлів у системі сталої міської мобільності. Серед запропонованих критеріїв оцінки ефективності вузлів, як багатофункціональних міських просторів, зазначено пропускну здатність, мінімальний час пересадки, рівень безпеки та інтеграцію різних видів транспорту. Підкреслюється, що якість обслуговування залежить не тільки від технічних характеристик, а й від комфорту перебування, зручності навігації, інформаційного забезпечення та доступності для маломобільних груп населення. В роботі [3] обґрунтовано доцільність використання комплексного підходу до оцінки якості обслуговування пасажирів. Автори зазначають, що ефективність ТПВ має визначатися не лише технічними характеристиками, а й сервісними показниками, такими як комфорт, інформаційне забезпечення, безпека та зручність пересадок. Доведено, що інтеграція різних видів транспорту та узгодженість їх роботи в межах ТПВ суттєво підвищують привабливість громадського транспорту та рівень задоволеності пасажирів.

Деякі науковці пропонують оцінювати роботу ТПВ із використанням такого критерію, як «штраф за пересадку» (transfer penalty). В роботі [4] обґрунтовано, що додаткові часові витрати, складність навігації, необхідність подолання значних відстаней між платформами та психологічний дискомфорт формують негативне сприйняття пересадки й знижують загальну привабливість громадського транспорту. Автори доводять, що навіть незначне збільшення часу очікування або ускладнення маршруту пересадки може суттєво впливати на вибір пасажиром способу пересування. У зв'язку з цим пропонується враховувати «штраф за пересадку» як інтегральний показник, що поєднує часові, просторові та поведінкові чинники.

Подібні підходи підтримуються й іншими дослідниками, які аналізують поведінку користувачів ТПВ та рівень їхньої задоволеності. На основі статистичних до-

сліджень встановлено, що ключовими факторами комфортної пересадки є зрозуміла система навігації, мінімальна відстань між платформами, безпечність пересадкових маршрутів і наявність якісного інформаційного забезпечення. Таким чином, оцінювання роботи ТПВ через показник «штрафу за пересадку» дозволяє комплексно врахувати не лише технічні, а й психологічні аспекти сприйняття якості обслуговування [5].

У сучасних дослідженнях значна увага приділяється цифровим методам управління ТПВ. Зокрема, у роботі [6] розглянуто використання інтелектуальних систем моніторингу пасажирських потоків, технологій Big Data та алгоритмів адаптивного регулювання навантаження на інфраструктуру. Доведено, що впровадження цифрових інструментів для прогнозування пікових навантажень, оперативного перерозподілу потоків і запобігання перевантаженням сприяє підвищенню пропускної здатності вузлів, зменшенню ризиків виникнення небезпечних ситуацій та загальному покращенню організації пересадочного процесу.

В науковій роботі [7] основна увага зосереджена на математичному моделюванні пасажирських потоків і розробці методів оптимізації планувальних рішень ТПВ. У роботах запропоновано розрахункові моделі визначення пропускної здатності, алгоритми оцінювання інтенсивності руху пасажирів та заходи щодо зменшення скупчень у години пік. При цьому автори акцентують увагу переважно на техніко-економічних та інженерних аспектах функціонування ТПВ, тоді як соціальні та поведінкові чинники оцінювання якості обслуговування потребують подальшого поглибленого дослідження.

Практичний досвід організації ТПВ відрізняється залежно від країни та особливостей міської інфраструктури. Водночас можна виокремити низку універсальних принципів, що застосовуються у світовій практиці [8].

Одним із них є використання сучасних інформаційних технологій. У багатьох містах впроваджуються електронні табло,

системи оперативного інформування пасажирів та мобільні застосунки для планування маршрутів і пересадок, що значно підвищує зручність користування транспортом. Ще одним важливим принципом є інтеграція різних видів транспорту в межах єдиного вузла. Ефективні ТПВ забезпечують узгоджену взаємодію автобусного, трамвайного, метрополітену та інших видів транспорту, доповнену зручними пішохідними зв'язками для швидкої та безпечної пересадки.

Крім того, вагоме значення має раціональна організація простору. Оптимальне розміщення зупинок, платформ і пішохідних маршрутів сприяє запобіганню скупченню пасажирів та забезпечує комфортний доступ до транспортних засобів, що є особливо важливим у містах із високою інтенсивністю пасажиропотоків.

Особлива роль ТПВ полягає в тому, що саме на цьому рівні формуються основні показники якості транспортного обслуговування на принципах сталої мобільності, зокрема час пересадки, комфорт очікування, безпека та доступність інфраструктури.

Водночас, у практиці функціонування ТПВ спостерігаються суттєві проблеми: неузгодженість розкладів руху різних маршрутів, нерівномірний розподіл пасажирських потоків, перевантаження вузлів у години пік, недостатній рівень інформаційного забезпечення та недосконалість планувальних рішень. Це призводить до збільшення часу пересадки, виникнення скупчень пасажирів, зниження рівня комфорту та загального погіршення якості транспортного обслуговування.

Незважаючи на наявність значної кількості наукових досліджень, більшість із них зосереджені переважно на окремих аспектах функціонування ТПВ, зокрема моделюванні пасажирських потоків або визначенні пропускної здатності. При цьому питання комплексного підвищення якості обслуговування з урахуванням технічних, організаційних і поведінкових чинників залишається недостатньо систематизованим.

Основною метою статті є розробка підходу щодо оцінки якості транспортно-обслуговування пасажирів у ТПВ, спрямованого на мінімізацію часу пересадки, зменшення перевантаження інфраструктури та підвищення рівня задоволеності пасажирів.

Основна частина

Оцінка якості транспортного обслуговування пасажирів у ТПВ проведено на прикладі м. Дніпра, а саме ТПВ «пл. Вокзальна», що є важливою складовою вдосконалення функціонування міської транспортної системи. Даний ТПВ належить до об'єктів наземного транспорту комбінованого типу і має стратегічне значення, оскільки забезпечує пересадку між автобусними, трамвайними, тролейбусними маршрутами та приміським залізничним транспортом і характеризується значними пасажиропотоками. Схема розташування зупинних пунктів в ТПВ «пл. Вокзальна» наведено на **рис. 1**.

Методична база дослідження складається з анкетного опитування пасажирів, натурних спостережень та аналізу експлуатаційних показників затримок руху й пропускну здатності вузла.



Рис. 1. Схема розташування зупиночних пунктів в ТПВ «пл. Вокзальна»

Оцінювання здійснювалося за такими групами показників: доступність і зручність пересадок (час очікування, стан інфраструктури зупинок), узгодженість ро-

зкладів руху (синхронізація маршрутів та дотримання графіків), інформаційне забезпечення (наявність табло та систем навігації), безпека і комфорт (освітлення, відеоспостереження, умови очікування, доступність для маломобільних груп населення). Додатково враховувалися показники комфорту під час поїздки та загальна задоволеність пасажирів якістю обслуговування.

Для оцінювання якості транспортного обслуговування в межах ТПВ «пл. Вокзальна» було проведено анкетування пасажирів, що дозволило виявити проблеми функціонування вузла та визначити напрями його вдосконалення. Аналіз результатів показав, що негативний вплив на рівень якості обслуговування пасажирів мають тривалий час очікування транспорту, нерегулярність руху та перевантаженість у години пік. Проблемними залишаються також питання інформаційного забезпечення та безпеки: не всі зупинки обладнані сучасними інформаційними табло, навігація в межах вузла є недостатньо зрозумілою, а рівень освітлення та організації простору не завжди забезпечує відчуття безпеки, особливо у вечірній час. Оцінка тривалості пересадок показала, що лише 38 % пасажирів витрачають на пересадку до 10 хвилин, тоді як решта перевищує прийнятний, з погляду користувачів, інтервал часу. Загальний рівень повної задоволеності транспортним обслуговуванням становить лише 9 %, що підтверджує необхідність удосконалення організації взаємодії маршрутів у межах вузла.

За результатами опитування встановлено, що основними проблемами функціонування ТПВ є нерегулярність руху транспорту, недостатня синхронізація розкладів, перевантаженість у години пік та обмеженість інфраструктурного й інформаційного забезпечення. Отримані результати свідчать про необхідність комплексного удосконалення організації пересадочного процесу з метою підвищення рівня якості транспортного обслуговування. При цьому важливу роль відіграє інформація про пасажирообмін зупинних пунк-

тів, результати аналізу якої свідчать про відсутність домінуючих маршрутів та орієнтованість ТПВ, що досліджується, на транзитні пересування пасажирів.

З метою забезпечення ефективності та стійкості транспортного обслуговування запропоновано структурну модель інформаційного обміну у ТПВ (рис. 2).

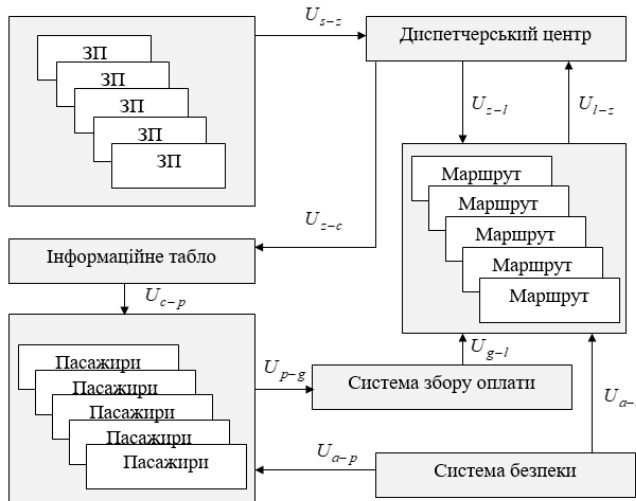


Рис. 2. Структурна модель інформаційного обміну у ТПВ

У межах запропонованої моделі елемент «Маршрут» розглядається як організаційно-функціональна підсистема, що включає сукупність транспортних засобів, які здійснюють перевезення пасажирів на відповідному маршруті згідно з графіком руху. В моделі виділено основні канали інформаційної взаємодії, зокрема такі зв'язки: між зупинними пунктами (ЗП) та диспетчерським центром (U_{s-z}), між інформаційною системою і пасажирами (U_{c-p}), між системою безпеки, пасажирами та маршрутами (U_{a-p}, U_{a-l}), між маршрутами та диспетчерським центром, що реалізуються через транспортні засоби, оснащені GPS-трекерами та двосторонніми каналами передачі даних GSM/LTE (U_{z-l}, U_{l-z}), інтеграція елементів із автоматизованою системою збору оплати (U_{p-g}, U_{g-l}), що дає змогу аналізувати параметри руху транспортних засобів, інформаційні та маршрутні потоки, виявляти

можливі відхилення від графіка руху, зумовлені підвищеною щільністю транспортного потоку, зокрема у періоди пікового навантаження, визначати конфліктні зони та оптимізувати взаємодію видів транспорту.

Середній час пересадки між транспортними засобами є одним із ключових показників якості транспортного обслуговування, оскільки він безпосередньо впливає на рівень зручності, доступності та задоволеності пасажирів.

Тому як оціночний критерій обрано мінімальний час пересадки пасажирів за умови допустимого рівня конфліктності потоків.

Узгодженість розкладів руху, пропускна здатність ТПВ та ефективність взаємодії маршрутів формалізовані у вигляді математичної моделі із зваженими параметрами, що забезпечує комплексну оцінку рівня сервісу. На підставі формалізованої моделі визначено цільову функцію оціночного критерію, що дозволяє оптимізувати процес взаємодії елементів у ТПВ:

$$T_o^n = \frac{\sum_{i=1}^{q_s} \left(t_{e_i}^n - t_{n_i}^n \right)}{q_s} \rightarrow \min, \quad (1)$$

де t_n^n – момент прибуття пасажирів в зупинний пункт ТПВ, год хв; t_e^n – момент відправлення пасажирів із зупинного пункту ТПВ, год хв; q_s – кількість пасажирів, що здійснюють пересадку, пас.

Систему припущень та обмежень сформовано з урахуванням умов взаємодії суб'єктів маршрутного потоку на ЗП у ТПВ та параметрів функціонування системи громадського транспорту.

За мету моделювання процесу транспортного обслуговування було встановлено синхронізацію маршрутів, скорочення часу очікування пасажирів, зниження конфліктності транспортних потоків і підвищення ефективності функціонування ТПВ. Серед основних етапів моделю-

вання виділено: формування вхідних параметрів, розрахунок показників руху й обслуговування та аналіз взаємодії маршрутів у ТПВ. Для реалізації застосовано дискретно-подієве моделювання, яке дозволило враховувати моменти прибуття, відправлення та час пересадки на підставі попередньо встановленої низки аналітичних залежностей визначення параметрів роботи ТПВ.

Із метою проведення імітаційного експерименту розраховано значення показників формування попиту на транспортні послуги, зокрема динаміку формування пасажиропотоків на ЗП у період пікового навантаження (17:00–18:00), а також добовий пасажирообмін ЗП. У результаті дослідження виявлено загальну тенденцію до виникнення пікових моментів формування пасажиропотоку, що зумовлюють хвилеподібний характер його зміни. Такі коливання пояснюються впливом прибуття транспортних засобів з інших маршрутів МПТ, а також зміною щільності транспортного потоку. Встановлено, що величина пікового підходу пасажирів до зупиночного пункту змінюється в межах від 9 до 30 осіб. Підтверджено гіпотези про нормальний закон розподілу випадкових величин параметрів процесу обслуговування (часу маневрування автобусів при виїзді та заїзді на ЗП, середній час посадки та висадки пасажирів) за критерієм Пірсона, розрахункові значення якого не перевищують табличні.

У результаті моделювання виявлено характеристичні залежності між вхідними параметрами (додатковим часом простою автобусів для сервісного обслуговування) і оціночним критерієм, а також системою припущень та обмежень. Приклад отриманих залежностей наведено для ЗП №1 (рис. 3).

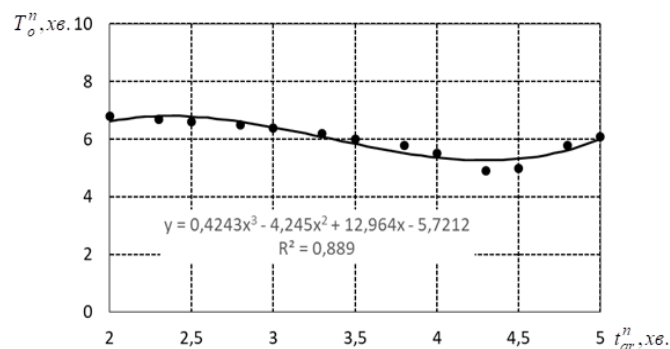


Рис. 3. Залежність середнього часу очікування пересадки пасажирів у ТПВ від тривалості простою автобусу на ЗП

У результаті моделювання встановлено, що збільшення часу простою автобусів на ЗП №1 з 2 до 3,5 хв призводить лише до незначного скорочення середнього часу очікування пересадки пасажирів (на 11,7 %), що не забезпечує достатньої синхронізації маршрутів. Найбільший ефект досягається за тривалості простою від 3,5 до 4,5 хв, коли час очікування зменшується на 27,9 %. Подальше збільшення тривалості простою спричиняє зворотний результат. Отримана залежність описується поліноміальною моделлю третього порядку з коефіцієнтом детермінації 0,889, що підтверджує її адекватність і дає змогу обґрунтувати доцільність встановлення оптимального значення додаткового простою в межах 3,5–4,5 хв.

Висновки

Запропонований підхід на основі моделювання маршрутних потоків з урахуванням динаміки формування пасажиропотоків у години пікового навантаження дозволяє оцінювати та підвищувати якість обслуговування пасажирів у ТПВ. Визначено, що помірне збільшення часу простою автобусів на ЗП у ТПВ сприяє зменшенню середнього часу очікування пересадки пасажиром, тоді як надмірне подовження простою призводить до накопичення пасажирів і зростання інтервалів руху.

Отримані результати свідчать про наявність резервів для підвищення ефективності ТПВ за рахунок синхронізації розкладів руху, покращення умов пересадок,

розвитку інформаційної інфраструктури та впровадження інтелектуальних систем управління транспортними потоками з метою підвищення якості обслуговування пасажирів.

References

1. Vdovychenko, V. (2018). Influence of reserve of carrying capacity of mass of points is on the sentinel parameters of outage of passenger of transport vehicles. *Technology Audit and Production Reserves*. 1-2, (39), 69–75. <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2018.123604>
2. Monzón, A., Hernández, S., & Di Ciommo, F. (2016). Efficient Urban Interchanges: The City-HUB Model. *Transportation Research Procedia*. 14, 1124–1133. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.183>
3. Pshinko O., Charkina T., Martseniuk L., & Orlovska O. (2022). HUBs as a key tool for improving the quality of service and development of multimodal passenger traffic. *Transport Problems*, 17 (1), 5–16. <https://doi.org/10.20858/tp.2022.17.1.17>
4. Guo, Z., & Wilson, N. H. M. (2011). Assessing the cost of transfer inconvenience in public transport systems. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 45 (2), 91–104. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2010.11.002>

5. Wardman, M. (2004). Public transport values of time. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 38 (6), 439–458. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2004.05.001>

6. Fernández-Lobo, A., Benavente, J., & Monzon, A. (2025). Dynamic Management Tool for Improving Passenger Experience at Transport Interchanges. *Future Transportation*, 5 (2), 59. <https://doi.org/10.3390/futuretransp5020059>

7. Stepanchuk, O., Timkina, S., & Chernyshova, O. (2025). The Impact of Pedestrian and Passenger Flows on the Engineering and Planning Solutions for Transit Stops. *Theory and Practice of Design*, 35, 65–74. <https://doi.org/10.32782/2415-8151.2025.35.7>

8. Postnikov, V. (2018). Current problems and prospects of the development of the city transport system. *Science Works Journal "Ekonomichnyy analiz"*, 28, (2), 64–70. <http://dx.doi.org/10.35774/econa2018.02.064>

ISSN 0365-8392

DOI: 10.33868/0365-8392-2026-1-286-42-48

Дата першого надходження статті: 27.01.2026

Дата прийняття до друку: 15.03.2026

Дата публікації: 31.03.2026



УДК 629.3.018.7:621.31

DOI: 10.33868/0365-8392-2026-1-286-49-63

© С. В. Ковбасенко, канд. техн. наук,
 професор, професор кафедри,
 ORCID: 0000-0002-7309-8200,
 e-mail: s-kov@ukr.net
 (Національний транспортний університет);
 © Ю. В. Гонтар, аспірант,
 завідувач відділу,
 ORCID: 0009-0005-6261-5216,
 e-mail: yuragontar0511@gmail.com
 (ДП «ДержавтотрансНДІпроект»)

© Serhii Kovbasenko, Candidate of Technical
 Sciences, Professor,
 Professor of the Department,
 ORCID: 0000-0002-7309-8200,
 e-mail: s-kov@ukr.net;
 (National Transport University);
 © Yurii Gontar, Postgraduate Student,
 Head of the Department,
 ORCID: 0009-0005-6261-5216,
 e-mail: yuragontar0511@gmail.com
 (SE "State Road Transport Research Institute")

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ РУХУ ТА РЕЖИМІВ РОБОТИ АВТОТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ ЗА ДОПОМОГОЮ ВИМІРЮВАЛЬНО-РЕЄСТРУВАЛЬНОГО КОМПЛЕКСУ ДЛЯ ФОРМУВАННЯ ТИПОВОГО МІСЬКОГО ІЗДОВОГО ЦИКЛУ

EXPERIMENTAL STUDY OF MOTION PARAMETERS AND OPERATING MODES OF MOTOR VEHICLES USING A MEASURING-RECORDING COMPLEX FOR FORMING A TYPICAL URBAN DRIVING CYCLE

Анотація. Обґрунтовано доцільність формування локально орієнтованих їздових циклів, оскільки стандартні випробувальні режими (NEDC, WLTC/WLTP, FTP-75 тощо) не повною мірою відображають структуру міського трафіку та характерні перехідні режими руху. Розглянуто підхід до отримання експериментальних експлуатаційних даних, необхідних для формування типового міського їздового циклу та коректного оцінювання паливної економічності й екологічних показників автотранспортних засобів у реальних умовах експлуатації. Обґрунтовано склад і структуру вимірювально-реєструвального комплексу, призначеного для синхронного збору параметрів руху та режимів роботи силової установки з використанням даних бортової діагностики та супутникової навігації, а також наведено принципи первинної обробки експериментальних даних. Визначено мінімально необхідний і розширений набір параметрів, придатних для подальшої сегментації руху та синтезу профілю «швидкість–час». За результатами натурних заїздів у міських умовах сформовано масиви синхронізованих експериментальних даних, що забезпечують підвищення репрезентативності майбутнього їздового циклу та достовірність оцінювання експлуатаційних, паливно-енергетичних і екологічних показників автотранспортних засобів.

Ключові слова: випробувальний їздовий цикл, міський цикл, реєстрація даних, OBD-II, CAN-шина, GNSS, GPS-трекер, Teltonika FMB140, Vgate iCar 2, швидкість–час, micro-trips, кластеризація, спрощення профілю.

Abstract. The article substantiates the feasibility of forming locally oriented driving cycles, since standard test modes (NEDC, WLTC/WLTP, FTP-75, etc.) do not fully reflect the structure of urban traffic, the frequency of stops and characteristic transitional modes of movement. The article considers an approach to obtaining experimental operational data necessary for the formation of a typical urban driving cycle and the correct assessment of fuel efficiency and environmental performance of motor vehicles in real operating conditions. The principles of construction and the composition of a measuring and recording complex designed for the synchronous collection of kinematic parameters of movement and power plant operating modes using GNSS satellite navigation and on-board diagnostic data via OBD-II/CAN are presented and justified. The logic of organising two recording channels (Teltonika FMB140 GNSS tracker as a reference source of time, coordinates and speed, and Vgate iCar 2 OBD adapter for reading PID parameters) is described, as well as approaches to their further time coordination. The minimum required and extended set of parameters (time, speed according to GNSS and CAN/OBD, coordinates, acceleration and distance derivatives, RPM, load, MAF/MAP, control position, fuel and energy indicators, etc.) suitable for segmenting movement into micro-trips, calculating features and synthesising a 'speed-time' profile. Separate emphasis is placed on the requirements for primary data processing: unification of the sampling rate (typically 1 Hz), control of omissions and emissions,

comparison of GNSS speed with wheel speed via CAN to reduce the impact of urban GNSS errors. Based on the results of field trips at different times of the day in Kyiv, arrays of synchronised time series of traffic parameters and power plant operation were formed, creating an information basis for further clustering of micro-trips, statistical synthesis of a representative urban cycle and its subsequent laboratory reproduction. The results obtained increase the representativeness of the future driving cycle and the reliability of assessing the operational, fuel and energy, and environmental performance of motor vehicles.

Keywords: test driving cycle, urban cycle, data recording, OBD-II, CAN bus, GNSS, GPS tracker, Teltonika FMB140, Vgate iCar 2, speed-time, micro-trips, clustering, profile simplification.

Вступ

Для дослідження показників паливної економічності та рівня викидів шкідливих речовин автомобільним транспортом у світовій практиці широко застосовують їздові випробувальні цикли. Відомо, що їздовий випробувальний цикл – це формалізована, відтворювана в часі послідовність режимів руху транспортного засобу, яка використовується як еталонний (стандартизований або локально репрезентативний) сценарій для стендових, дорожніх чи модельних випробувань з метою кількісного оцінювання паливної економічності, рівня викидів та динамічних характеристик автомобіля [1–5].

Оцінювання відповідності та інформативності їздових випробувальних циклів здійснюють за системою показників, що описують (1) кінематичну структуру руху та (2) рівень навантаження силової установки. До кінематичних показників належать тривалість і протяжність циклу, середня та максимальна швидкість, розподіл часу за інтервалами швидкостей і прискорень, кількість і тривалість зупинок, частка холостого ходу, а також інтенсивність розгонів і гальмувань (ступінь транзйентності). Рівень навантаження додатково характеризують показники роботи двигуна й паливно-енергетичні параметри, зокрема витрата палива/енергоспоживання, а також масові викиди забруднювальних речовин (CO_2 , CO, CH/HC, NO_x , PM та інші) і розрахункова потужність. Водночас зазначені критерії є коректними лише за умови, що випробувальний цикл сформовано на підставі достовірних експериментальних даних про реальні режими руху, оскільки спотворення профілю швидкості, структури зупинок або динаміки прискорень спричиняє систематичні похибки під час оцінювання паливної економічності та екологічних показників. Отже, побудова репрезентативного їздового циклу потребує накопичення значного масиву

натурних вимірювань у реальних умовах експлуатації з обов'язковою часовою синхронізацією кінематичних параметрів руху з параметрами функціонування силової установки та характеристиками дорожньої ситуації. Практична реалізація такого підходу забезпечується застосуванням спеціалізованого вимірювально-реєструвального комплексу, інтегрованого з бортовими системами дослідного автомобіля, який здійснює узгоджений (синхронний) запис кінематичних, енергетичних і експлуатаційних параметрів руху.

Наразі у світовій практиці використовується значна кількість їздових випробувальних циклів, зокрема NEDC, WLTC/WLTP, FTP-75, HWFET, US06 тощо. Стандартні випробувальні режими забезпечують уніфіковані умови випробувань і відтворюваність результатів. Проте їхній узагальнений характер зумовлює виникнення відхилень між результатами випробувань і фактичними експлуатаційними показниками, зокрема для окремих міст або регіонів зі специфічними умовами руху. Саме це зумовлює необхідність формування локально-орієнтованих циклів на основі даних реальних поїздок. [4, 6–8].

Метою статті є експериментальне отримання та аналіз параметрів руху і режимів роботи авто-транспортних засобів у міських умовах із використанням вимірювально-реєструвального комплексу. У межах поставленої мети передбачено визначення параметрів, необхідних для опису режимів міського руху, та оцінювання придатності експериментальних даних для подальшого формування типового міського їздового циклу.

Основна частина

У сучасних дослідженнях сформовано широкий спектр підходів до побудови випробувальних їздових циклів, що відрізняються за рівнем деталізації, способом обробки експлуата-

ційних даних та характером від-творення режимів руху. До них належать метод мікропоїздок, сегментний і модальний підходи, методи класифікації за патернами руху, паливно-орієнтовані, детерміновані та стохастичні методи, а також гібридні рішення й підходи на основі машинного навчання. [3] Незважаючи на відмінності в методах обробки та синтезу профілю руху, спільною передумовою застосування будь-якого з них є наявність достатнього масиву експериментальних даних, що достовірно відображає реальні умови експлуатації транспортних засобів. Формування типового міського випробувального їздового циклу потребує накопичення масиву експериментальних даних, що адекватно відтворюють реальні

умови руху в межах міської інфраструктури. До таких умов належать затори, зупинково-розгінна структура руху, нерівномірність транспортного потоку, вплив світлофорного регулювання, а також ділянки з різними швидкісними режимами та характеристиками рельєфу. З метою забезпечення репрезентативності база даних має охоплювати як зони з високою щільністю перехрест'я і домінуванням режимів «старт-стоп», так і відрізки магістральних коридорів, де формуються підвищені швидкості та інтенсивні перехідні процеси. Як приклад реалізації запропонованого підходу в роботі розглянуто експериментальні заїзди в умовах м. Києва за попередньо обраним маршрутом (рис. 1).

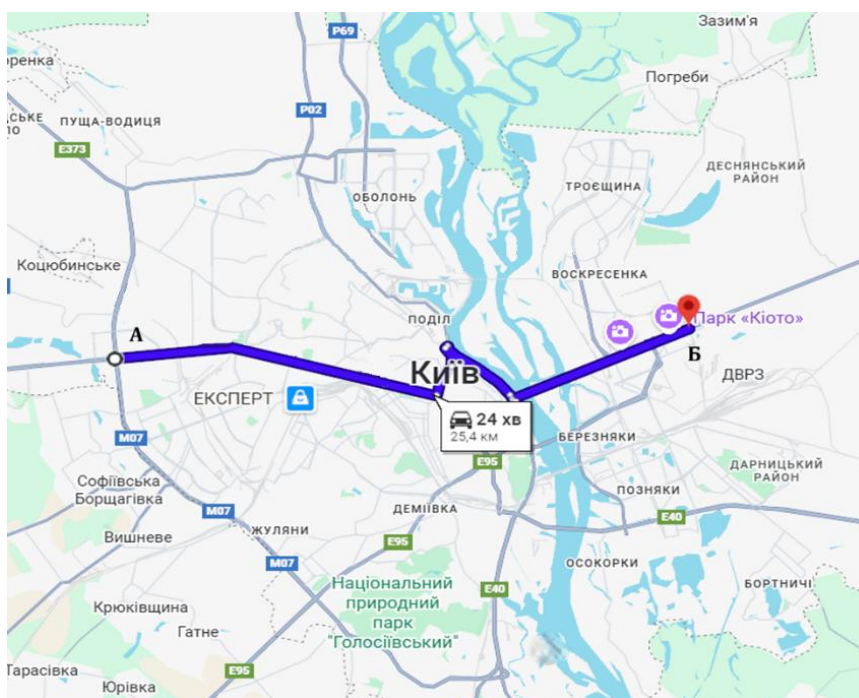


Рис. 1. Експериментальний маршрут

Експериментальна база даних для побудови їздового циклу має формуватися на основі різнотипних поїздок, що відтворюють увесь спектр умов руху на обраних маршрутах – від мінімального, умовно «невантаженого», часу їх проходження до максимального, за умов перевантаження дорожньої мережі. Збір експлуатаційних даних доцільно здійснювати в різні періоди доби

(ранковий і вечірній пікові інтервали, міжпіковий період, нічний режим), а також у різні дні тижня з метою забезпечення репрезентативності їздового циклу щодо добової та тижневої варіабельності транспортних потоків. Така часова неоднорідність є необхідною для зменшення систематичної похибки, зумовленої мінливістю інтенсивності

руху, тимчасовими змінами організації дорожнього руху та нерівномірністю світлофорного регулювання.

Підхід до створення узагальненого міського їздового циклу полягає у накопиченні великого масиву реальних профілів руху (насамперед «час-швидкість» із синхронізованими параметрами силової установки), після чого отримані записи поїздок сегментують на однорідні ділянки типу місто-trips (відрізки між двома зупинками або між подіями, що змінюють режим руху). Далі ці сегменти групують за подібністю статистичних ознак (тривалість, середня/максимальна швидкість, інтенсивність розгонів, частка простою тощо) і виконують статистичний синтез репрезентативного профілю, який відтворює цільові узагальнені показники міського руху та є придатним для подальшого спрощення і відтворення в лабораторних умовах (на динамометричному стенді) або під час математичного моделювання [4, 6, 9–12].

Технічна реєстрація даних для формування випробувального їздового циклу реалізується як послідовність «джерело → шина/інтерфейс → реєстратор → канал передавання/збереження → програмне забезпечення → підготовка даних». Джерелами інформації є електронні блоки керування автомобіля, що надають параметри через OBD-II та/або CAN-шину, а також навігаційна підсистема GNSS трекера. Синхронна реєстрація цих потоків забезпечує отримання профілю «час-швидкість» разом із супровідними параметрами роботи силової установки (частота обертання колінчастого вала, навантаження, витрата повітря, тиск у впуску, паливні показники тощо), необхідними для подальшої обробки та оцінювання репрезентативності сформованого циклу [6, 12]. З урахуванням зазначеного в роботі розроблено та впроваджено вимірювально-реєструвальний комплекс, інтегрований із бортовими системами дослідного автомобіля. Комплекс забезпечує одночасний запис кінематичних параметрів руху та параметрів режимів роботи силової

установки з подальшим збереженням даних у форматі, придатному для обробки й аналізу. Структура вимірювально-реєструвального комплексу збору даних представлена на **рис. 2**.

Об'єктом дослідження обрано автомобіль Volkswagen Passat B7 (клас D, категорія B) з дизелем робочим об'ємом 1968 см³ і турбонаддувом, максимальною потужністю 103 кВт (140 к.с.) та максимальним крутним моментом 320 Н·м у діапазоні 1750–2500 об/хв; трансмісія – 6-ступенева гідromеханічна. Автомобіль Volkswagen Passat B7, оснащений OBD-II адаптером Vgate iCar 2 Wi-Fi та GPS/GNSS-трекером Teltonika FMB140 (зі зчитуванням параметрів із CAN-шини), у межах роботи розглядається як єдиний вимірювально-реєструвальний комплекс, що забезпечує синхронний збір параметрів руху та режимів роботи силової установки: Vgate iCar 2 виконує реєстрацію діагностичних PID-параметрів, а Teltonika FMB140 — реєстрацію координат і швидкості та зчитування CAN-параметрів [13].

Каналом кінематики та часу виступає GNSS. Супутникові навігаційні системи (GPS, Galileo, BeiDou тощо) забезпечують визначення координат і швидкості за сигналами від супутників, використовуючи вимірювання часу проходження сигналу та трилатерацію. На практиці для надійного 3D-позиціонування та синхронізації часу приймач використовує сигнали щонайменше від чотирьох супутників, що дозволяє визначати x, y, z і поправку часу приймача [14–16]. Навігаційне повідомлення GPS (інтерфейсні специфікації ICD) описує структуру даних, частоти, склад ефемерид/альманаху та механізми кодування. Ця інформація є базовою для коректного трактування точності, затримок та умов прийому сигналу [17].

Для побудови випробувального їздового циклу важливий не тільки маршрут на карті, а й точний час для кожного заміру. Більшість GNSS-трекерів беруть час із супутників (або синхронізують його через ме-

режу), тому дані з різних джерел можна правильно узагальнити — наприклад, порівняти швидкість за GNSS зі швидкістю коліс із CAN. [18]. Після цього всі записи приводять до єдиного часового кроку (зазвичай 1 раз на секунду, тобто 1 Гц), щоб зручно аналізувати відрізки руху між зупинками (micro-trips). [6]. У щільній міській забудові якість GNSS-вимірювань часто погіршується, оскільки супутниковий сигнал може частково екрануватися будівлями та відбиватися від перешкод, що спричиняє завади і короточасні спотворення координат та швидкості. Це безпосередньо впливає на розрахунок похідних параметрів, насамперед прискорення, і може знижувати точність подальшої сегментації поїздки на однорідні ділянки руху. З огляду на це доцільно забезпечити фільтрацію GNSS-похибок, можливість контролю достовірності швидкості шляхом порівняння GNSS-швидкості зі швидкістю коліс за даними CAN, а також механізми тимчасового збереження вимірювальної інформації у внутрішній пам'яті пристрою при втраті GSM-каналу з метою забезпечення безперервності реєстрації даних. [16, 19–21].

Основним елементом вимірювально-реєструвального комплексу є GPS/GNSS-трекер Teltonika FMB140, який поєднує функції навігаційного реєстратора та CAN-шлюзу. Це автомобільний GNSS/GSM-термінал, що, окрім GNSS-позиціонування, забезпечує зчитування параметрів із CAN-шини через відповідні інтерфейси та адаптери, а також

має внутрішню пам'ять для автономного збереження даних. Згідно з технічною документацією виробника, FMB140 працює в мережах GSM (2G) із передаванням даних через GPRS і підтримкою SMS, оснащений внутрішніми антенами GNSS і GSM, має внутрішню флеш-пам'ять, резервне живлення, акселерометр, інтерфейси вводу/виводу й CAN-інтерфейси, а також механізми конфігурації (USB/Bluetooth тощо). Пристрій забезпечує визначення координат із типовою точністю до $\pm 2,5\text{--}3$ м, а швидкості – з похибкою близько $\pm 0,1\text{--}0,2$ м/с за умови стабільного прийому супутникового сигналу [18–20]. Його технічна цінність у контексті випробувального іздового циклу полягає в поєднанні трьох функцій: реєстрації GNSS-параметрів (широта, довгота, висота та швидкість), фіксації подій і прискорень (акселерометр) для контролю різких маневрів та валідації динамічності, а також зчитування вибраних параметрів із CAN (зокрема швидкості по колесах, частота обертання колінчастого вала, пробігу, паливних показників) для дублювання та контролю даних OBD-каналу й підвищення стійкості до GNSS-помилки у щільній забудові [18–21]. У системі Teltonika дані з трекера передаються на сервер у вигляді окремих записів, у яких для кожного моменту часу зберігаються часова мітка, координати та значення додаткових параметрів (наприклад, швидкість, сигнали датчиків, CAN-показники) [20–22]. Технічні характеристики Teltonika FMB140 наведені в **табл. 1**.

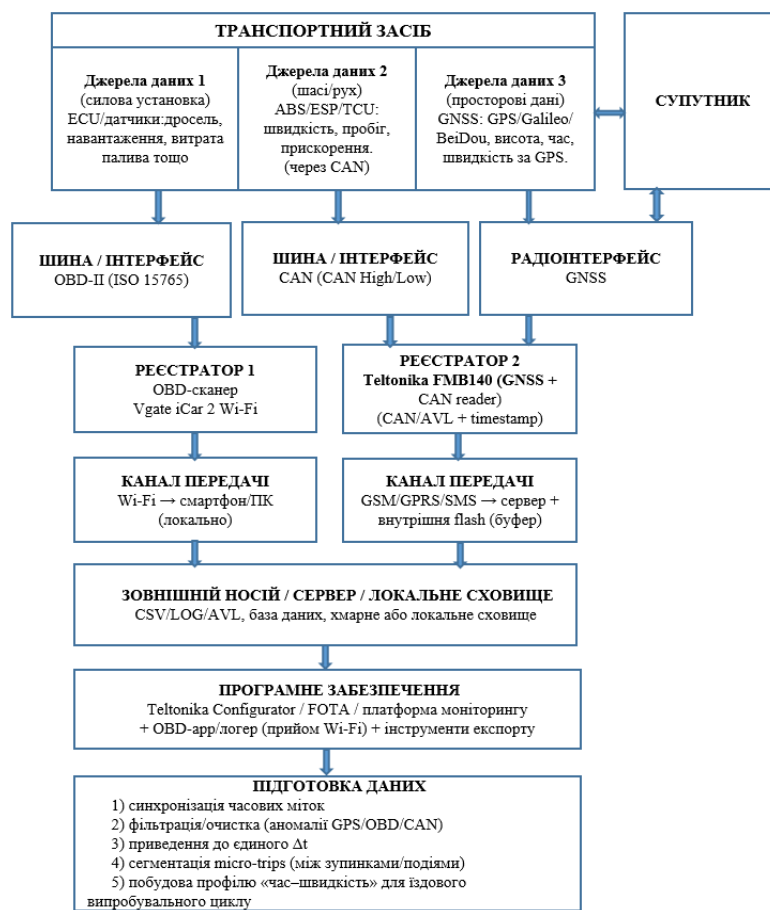


Рис. 2. Структура вимірювально-реєструвального комплексу збору даних

Таблиця 1

Основні технічні характеристики Teltonika FMB140

Параметр	Значення
Навігаційний приймач (GNSS)	GPS, Galileo, BeiDou, QZSS
Кількість каналів GNSS	33
Чутливість приймача	до -165 dBm
Точність позиціонування	≤ 2.5-3 м (CEP) за стабільного прийому супутників
Точність визначення швидкості	≤ 0.1 м/с (типова GNSS-похибка)
Час пошуку супутників	гарячий старт < 1 с; теплий < 25 с; холодний < 35 с
Мобільна мережа	GSM 2G (850 / 900 / 1800 / 1900 MHz)
Передавання даних	GPRS Class 12
Внутрішня пам'ять	128 МБ флеш-пам'яті
Живлення	10-30 V DC
Резервне живлення	вбудована Li-Ion батарея 170 mAh
Інтерфейси	2 × CAN, цифрові та аналогові I/O, Bluetooth 4.0 LE, 1-Wire, USB
Діапазон робочих температур	-40 °C ... +85 °C
Ступінь захисту корпусу	IP41

Під'єднання Teltonika FMB140 до CAN-мережі забезпечує інтеграцію пристрою з бортовою комунікаційною шиною автомобіля, через яку електронні блоки керування (двигуна, ABS/ESP, трансмісії тощо) обмінюються даними. CAN-шина спроектована для надійної роботи в умовах електромагнітних завад і підтримує швидку передачу повідомлень у режимі реального часу. У разі одночасної передачі кількох повідомлень пріоритет визначається їхнім ідентифікатором, що забезпечує доставку критично важливих даних із мінімальною затримкою. Завдяки такому під'єднанню FMB140 може зчитувати необхідні параметри з CAN (зокрема швидкість по колесах, частота обертання колінчастого вала, пробіг, паливні показники) залежно від підтримки протоколів, конфігурації та типу CAN-адаптера [23–25]. Для діагностики та телематики широко застосовуються протоколи поверх CAN для діагностичних повідомлень (зокрема ISO 15765-4 / DoCAN), що узгоджується з OBD-II у частині транспорту діагностичних PID-даних [24, 26].

Паралельним каналом доступу до параметрів роботи двигуна/силового агрегату виступає OBD-II, реалізований через OBD-адаптер Vgate iCar 2 Wi-Fi. OBD-II розглядається як уніфікований підхід до діагностичного доступу через стандартний роз'єм (типово SAE J1962) і набір сервісів/параметрів (PID), визначених у SAE J1979 та

споріднених документах ISO 15031 [27–29]. Технічно Vgate iCar 2 Wi-Fi підключається до роз'єму OBD-II й організовує обмін діагностичними кадрами між електронним блоком управління та зовнішнім пристроєм (смартфон/ПК) через Wi-Fi. У більшості таких OBD-адаптерів використовується типова «прошивка-посередник», яка працює за стандартними текстовими командами, подібними до ELM327. Вона автоматично вибирає потрібний протокол зв'язку з автомобілем, надсилає запити до ЕБУ за потрібними параметрами (PID) і приймає відповіді, після чого передає їх на смартфон або ПК. Саме через цю стандартну схему роботи адаптер зазвичай сумісний із популярними програмами для запису даних, такими як Torque, Car Scanner, OBD Auto Doctor тощо [30–32]. Слід мати на увазі, що адаптер не забезпечує метрологічно достовірного визначення PID-параметрів. Точність визначається реалізацією датчиків і алгоритмів у конкретному електронному блоці керування автомобіля, а також режимом опитування через бездротовий інтерфейс. Тому параметри, отримані через OBD-II, у роботі розглядаються як експлуатаційні діагностичні дані, а їх достовірність контролюється шляхом порівняння з незалежними джерелами (зокрема швидкість за GNSS і CAN). Підключення GPS/GNSS-трекера Teltonika FMB140 та OBD-адаптера Vgate iCar 2 Wi-Fi зображено на **рис. 3**.

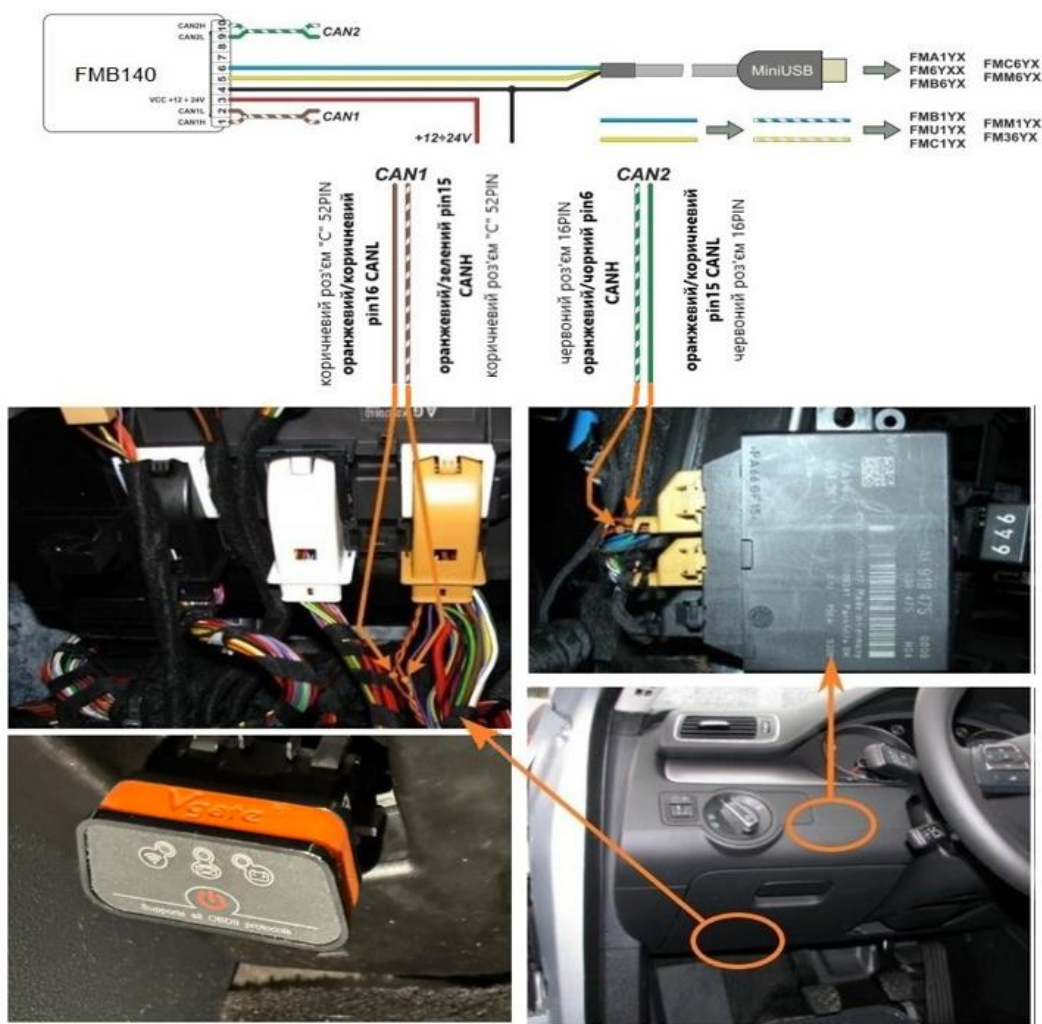


Рис. 3. Встановлення GPS/GNSS-трекера Teltonika FMB140 та OBD-адаптера Vgate iCar 2 Wi-Fi на дослідному автомобілі

Для побудови випробувального іздового циклу ключовим є визначення переліку доступних параметрів та забезпечення їхнього запису з достатньою частотою. У межах дослідження формувалася масив показників, який включає миттєву витрату палива, частоту обертання колінчастого вала, положення дросельної заслінки, розрахункове навантаження, масову витрату повітря (MAF), тиск у впускному колекторі (MAP), сигнали/корекції кисневих датчиків, швидкість автомобіля, а також похідні параметри такі як розрахункова потужність двигуна за масовою витратою повітря і контрольні лічильники пробігу/витрат за інтервали

(день/тиждень/загалом). Частина цих величин є стандартизованими PID (RPM, VSS, MAF, MAP, Calculated Load), тоді як інша частина формується як розрахункові показники, що обчислюються програмним забезпеченням логера на основі первинних PID та/або моделей перерахунку; у зв'язку з цим під час проектування системи збору даних принципово фіксувати, які параметри є первинними з ЕБУ, які – розрахунковими, і за яким алгоритмом вони отримані, щоб коректно інтерпретувати можливі розбіжності між OBD-оцінками та CAN-даними трекера [27–29, 33]. Перелік параметрів, які дає змогу визначити вимірювально-реєструвальний комплекс наведений в **табл. 2**.

Таблиця 2

Перелік параметрів, які визначалися вимірювально-реєструвальний комплексом під час експериментальних досліджень

Параметр	Джерело даних	Тип параметра	Призначення в дослідженні
Час (timestamp)	GNSS (FMB140)	первинний	Синхронізація потоків даних, формування часових рядів
Координати (lat, lon)	GNSS (FMB140)	первинний	Контекст маршруту, мап-матчинг, фільтрація GNSS-похибок
Швидкість (GNSS)	GNSS (FMB140)	первинний	Побудова профілю «швидкість-час», контроль CAN/OBD
Швидкість автомобіля	CAN / OBD-II	первинний	Контроль GNSS-швидкості, аналіз режимів руху
Прискорення	GNSS / акселерометр	розрахунковий	Оцінка динамічності, сегментація micro-trips
Пройдений шлях	GNSS / OBD-II	розрахунковий	Інтегральні характеристики циклу
Частота обертання колінчастого вала (RPM)	OBD-II / CAN	первинний	Оцінка режимів роботи силової установки
Розрахункове навантаження двигуна	OBD-II	первинний	Аналіз інтенсивності режимів руху
Масова витрата повітря (MAF)	OBD-II	первинний	Оцінка паливно-енергетичних режимів
Тиск у впускному колекторі (MAP)	OBD-II	первинний	Контроль навантаження двигуна
Положення дросельної заслінки	OBD-II	первинний	Аналіз керування тягою
Миттєва витрата палива	OBD-II (через ПЗ)	розрахунковий	Оцінка енергоспоживання режимів
Середня витрата палива	OBD-II (через ПЗ)	інтегральний	Порівняння узагальнених характеристик
Потужність двигуна (за MAF/паливом)	OBD-II (через ПЗ)	розрахунковий	Контроль енергетичної відповідності циклу
Корекція паливно-повітряної суміші	OBD-II	первинний	Аналіз режимів сумішоутворення
Кисневий датчик (напруга)	OBD-II	первинний	Контроль роботи системи упорскування

Схема «OBD-сканер у роз'ємі OBD + трекер у CAN» дає два окремі потоки даних, які потім потрібно об'єднати в один. OBD-сканер Vgate iCar 2 через Wi-Fi передає зчитані з ЕБУ параметри (PID) на смартфон або ПК, де програма записує їх у файл (CSV/лог) із часовими мітками. Одночасно трекер Teltonika FMB140 записує координати, швидкість і висоту за

GNSS, зчитує потрібні дані з CAN-шини та формує власні телематичні записи, які зберігаються у пам'яті пристрою або передаються на сервер через мобільний зв'язок (GSM/GPRS). Далі ці два набори даних зводять разом за часом: як «опорний» час зазвичай беруть GNSS-час трекера, а OBD-лог прив'язують до нього з

урахуванням можливого невеликого розходження в годинниках. [18–22, 34]. У результаті формується уніфікований набір даних, який безпосередньо використовується для подальшої побудови випробувального їздового циклу.

Для побудови міського випробувального їздового циклу фіксувалися такі дані: час, швидкість (краще одразу з двох джерел – за GNSS і з CAN/OBD для перевірки), координати (широта/довгота, щоб розуміти маршрут і відфільтрувати помилки), а також можливість правильно отримати прискорення – або як зміну швидкості з часом, або з акселерометра. Додатково записувалися параметри роботи двигуна (RPM, MAF/MAP, положення дроселя, навантаження, витрату палива), тому що вони допомагають оцінити, наскільки інтенсивними є режими руху, порівнювати ділянки з однаковою швидкістю, але різним навантаженням (наприклад, на підйомі), і перевіряти, що спрощений цикл схожий не тільки за графіком швидкості $v(t)$, а й за витратою палива/енергії [2, 5, 6, 11].

Уніфікація даних зазвичай передбачає приведення до кроку реєстрації даних 1 Гц (або 2–10 Гц за наявності технічної можливості), але для профілю швидкості за часом у практиці формування циклів найчастіше застосовують 1 Гц як компроміс між обсягом і здатністю відтворити динаміку [6, 10–12]. Водночас необхідно враховувати політику обробки пропусків: GNSS може мати втрати в тунелях/підестакадами, а OBD-PID у Wi-Fi-режимі – змінний інтервал опитування. Тому технічно обґрунтована процедура включає попередній аудит якості даних: частку пропусків, розподіл інтервалів, виявлення стрибків координат та порівняння швидкості за GNSS і CAN. Для Києва це особливо актуально, оскільки GNSS-похибки в щільній забудові можуть призводити до хибних оцінок прискорення й, як наслідок, до некоректної сегментації та кластеризації micro-trips [16, 35–37].

Враховуючи мету експериментальних досліджень, а також те, що випробування проводилися в м. Києві, набір поїздок має охоплювати типові сценарії міського руху (короткі поїздки зі «спальних» районів через магістралі

до центральної частини, переміщення в межах центральної зони, рух мостами та підходами до них, змішані маршрути). У публікаціях науковців щодо локальних їздових випробувальних циклів, сформованих micro-trip-методами, показано, що репрезентативність зростає зі збільшенням обсягу даних і різноманітності умов, а контроль синтезу здійснюється за набором метрик (середня швидкість, частка простою, розподіл швидкостей, середні/пікові прискорення, кількість зупинок на км тощо) [3, 6, 9–12]. Для міста, де часто бувають затори, важливо, щоб у даних було достатньо ділянок із повними зупинками ($S=0$) і рухом на малих швидкостях. Якщо таких режимів буде мало, то отриманий цикл вийде з надто заниженим навантаженням і показуватиме нижчу витрату палива/енергії, ніж у реальних умовах їзди. [2–4, 6].

Сформований масив експериментальних даних підлягає апроксимації та структуризації режимів руху для забезпечення можливості їх лабораторного відтворення на шасі-динамометрі. Практично це реалізується через сегментацію на micro-trips (часто «від зупинки до зупинки»), розрахунок ознак micro-trip (тривалість, шлях, v_{mean} , v_{max} , частка простою, середні прискорення, показники транзйентності), групування подібних сегментів (кластеризація/оптимізаційний відбір) і синтез профілю заданої тривалості/довжини з контролем цільових статистик. За потреби можливе додаткове спрощення до набору типових «елементів» (фрагментів), придатних для стенового відтворення [6, 9–12, 38–40]. Марковські підходи до генерації циклів також застосовуються, однак для прикладної задачі міського циклу Києва micro-trip підхід часто є більш практичним з точки зору відтворюваності та інженерної інтерпретації [9,41].

У результаті натурних заїздів дослідного автомобіля зі встановленим вимірювально-реєструвальним комплексом отримано масиви синхронізованих даних реального руху на прикладі міста Києва, представлені у вигляді часових рядів параметрів руху та роботи силової установки. На основі цих даних сформовано набір графіків, що відображають режими руху

на обраному маршруті, а також супровідні параметри силової установки під час поїздки. Отримані параметри та графічні матеріали становлять вихідну інформаційну базу для подальшої сегментації, статистичного синтезу та формування міського випробувального їздового циклу для міста Києва. Заїзди проводилися у різні часові інтервали доби з метою

відтворення різноманітних умов дорожнього руху – від варіантів із мінімальним часом проходження маршруту (умовно вільний рух) до варіантів із максимальною тривалістю поїздки, характерною для інтенсивного трафіку. Приклад реєстрації експлуатаційних та кінематичних показників наведено на **рис. 4–5**.

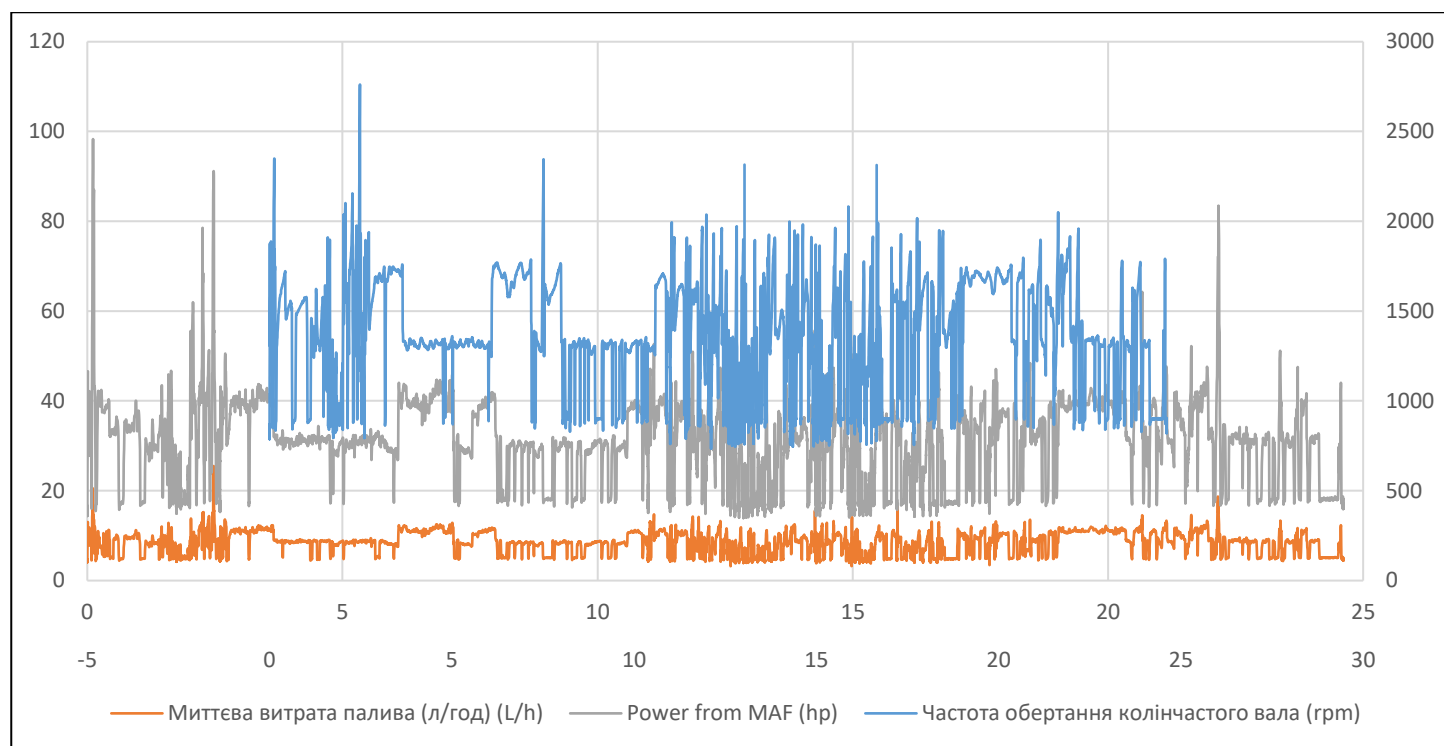


Рис. 4. Експлуатаційні показники за заданим маршрутом у часовому діапазоні 30–35 хв

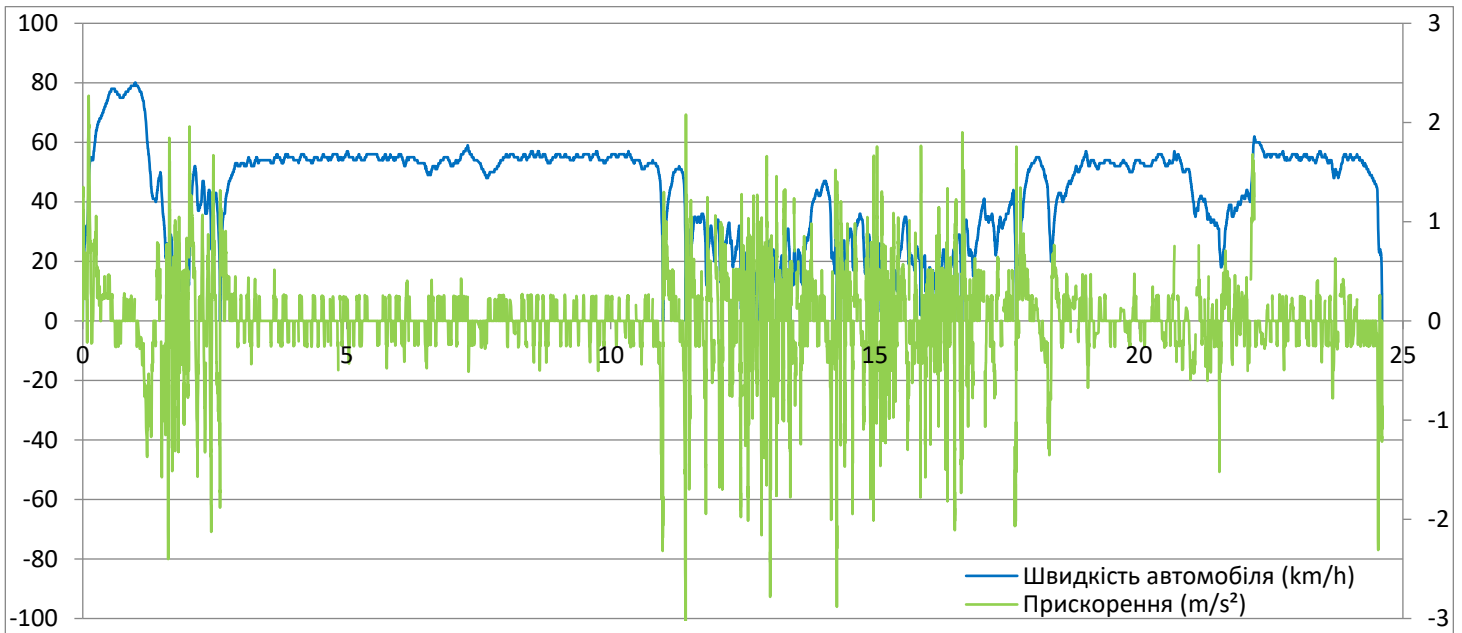


Рис. 5. Кінематичні показники за заданим маршрутом у часовому діапазоні 30–35 хв

У ході експерименту під час усієї серії заїздів реєструвалися часові ряди швидкості автомобіля, положення педалі акселератора, частота обертання колінчастого валу, витрата палива та інші кінематичні й експлуатаційні параметри. Зібрані дані дозволяють оцінити характерні перехідні процеси, частоту та тривалість зупинок, профілі прискорень і уповільнень, а також взаємозв'язок режимів роботи силової установки з динамікою руху. Наступним етапом синтезу міського їздового циклу є сегментація та класифікація зібраних даних за типами режимів руху, включаючи режими «старт-стоп», рівномірний рух та інтенсивні переходи на швидкісних відрізках. Після цього планується статистичний аналіз часових рядів, який дозволить визначити ймовірності переходів між режимами та середні характеристики прискорень і швидкостей. На основі цих результатів буде проведено синтез профілю «швидкість-час» для типового міського циклу, придатного для лабораторного відтворення, зберігаючи характерні перехідні процеси та інтенсивність навантажень на силову установку. Такий підхід дозволить отримати репрезентативний цикл, що відображає реальні умови руху, та забезпечить достовірну оцінку експлу-

атаційних, паливно-енергетичних і екологічних показників транспортних засобів у міських умовах.

Висновки

У статті обґрунтовано необхідність формування локально орієнтованих міських випробувальних їздових циклів на основі даних реальної експлуатації автотранспортних засобів. Застосування стандартних узагальнених циклів часто не дозволяє відобразити специфічні режими руху конкретного міста, зокрема частоту «старт-стоп», нерівномірність потоків та характерні перехідні процеси, що створює потребу у розробці локальних циклів на основі натурних вимірювань.

Для вирішення цієї задачі в роботі було використано експериментальний автомобіль Volkswagen Passat B7, оснащений вимірювально-реєструвальним комплексом, що став ключовим інструментом збору даних. Комплекс включає GNSS-трекер Teltonika FMB140, інтегрований із бортовою CAN-мережею, та OBD-сканер Vgate iCar 2 Wi-Fi, підключений до стандартного роз'єму OBD-II. Завдяки цій конфігурації забезпечується одночасний збір кінематичних параметрів руху та показників ро-

боти силової установки у синхронізованому часовому ряді, що є передумовою для подальшого аналізу режимів руху та оцінки паливно-енергетичних характеристик.

Реєстрація даних з використанням GNSS як опорного джерела часу дозволяє узгоджувати потоки інформації із різних каналів і формувати уніфіковані часові ряди, придатні для сегментації на мікропоїздки (micro-trips) та синтезу профілю «швидкість–час». Мінімумально необхідний набір даних для побудови міського циклу включає час, швидкість (GNSS та CAN/OBD), координати маршруту та похідні параметри руху, а додаткові показники силової установки дозволяють контролювати інтенсивність режимів та відповідність циклу за енергоспоживанням.

Натурні заїзди в різні часові інтервали доби на експериментальному автомобілі забезпечили синхронізовану базу реальних даних міського руху Києва. Ці дані лягли в основу графічних матеріалів режимів руху та роботи силової установки, що використовуються для подальшої сегментації, групування режимів та формування міського випробувального їздового циклу.

Запропонований підхід і вимірювально-реєструвальний комплекс демонструють універсальність і придатність для використання у різних містах та регіонах. Сам автомобіль із комплексом виступає як ключовий інструмент отримання репрезентативних даних, що закладає достовірність та точність подальшого синтезу циклу, лабораторного відтворення режимів руху та оцінки паливної ефективності, енергоємності та екологічних характеристик транспортних засобів у міських умовах. Реєстрація, уніфікація та первинна структуризація даних, описані в роботі, розглядаються як один із ключових етапів реалізації методики формування типового міського їздового циклу, оскільки саме на цьому етапі закладається достовірність і репрезентативність подальшої сегментації, статистичного синтезу та лабораторного відтворення режимів руху. Отримані результати створюють міцну методичну та інформаційну основу для наступних

етапів досліджень із формування узагальненого міського їздового циклу та можуть бути використані для прикладних задач оцінювання експлуатаційних, паливно-енергетичних і екологічних показників автотранспортних засобів у реальних умовах міської експлуатації.

References

1. European Union. (2017). *Commission Regulation (EU) 2017/1151 supplementing Regulation (EC) No 715/2007, establishing WLTP procedures and related requirements (consolidated text)*. Retrieved from <https://www.legislation.gov.uk/eur/2017/1151/contents>
2. Amirjamshidi, G., & Roorda, M. J. (2015). Development of simulated driving cycles for light, medium, and heavy duty trucks: Case of the Toronto Waterfront Area. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 34, 255–266. doi:10.1016/j.trd.2014.11.010
3. Gebisa, A., Gebresenbet, G., Gopal, R., & Nallamotheu, R. B. (2021). Driving cycles for estimating vehicle emission levels and energy consumption. *Future Transportation*, 1(3), 615–638. doi:10.3390/futuretrans1030033
4. Chauhan, B. P., Joshi, G. J., & Parida, P. (2020). Development of candidate driving cycles for an urban arterial corridor of Vadodara city. *European Transport/Trasporti Europei*, 4, 1–16. Retrieved from https://www.researchgate.net/profile/BoskiChauhan2/publication/348252664_Development_of_Candidate_Driving_Cycles_for_an_Urban_Arterial_Corridor_of_Vadodara_City/links/5ff549d8a6fdccdc833ae7d/Development-of-Candidate-Driving-Cycles-for-an-Urban-Arterial-Corridor-of-Vadodara-City.pdf
5. Mateichyk, V., Kostian, N., Smieszek, M., Gritsuk, I., & Verbovskyi, V. (2023). Review of methods for evaluating the energy efficiency of vehicles with conventional and alternative power plants. *Energies*, 16, Article 6331. doi:10.3390/en16176331
6. Smieszek, M., Mateichyk, V., & Mościszewski, J. (2024). The influence of stops on the selected route of the city ITS on the energy efficiency of the public bus. *Energies*, 17, Article 4179. doi:10.3390/en17164179

7. U.S. Environmental Protection Agency. (2026). *Federal test procedure (FTP): Overview of light-duty vehicle emissions testing*. Retrieved from <https://www.epa.gov/vehicle-and-fuel-emissions-testing>
8. DieselNet. (2026). *Vehicle test cycles (overview)*. Retrieved from <https://dieselnet.com/standards/cycles/>
9. Lin, M., & Peng, H. (2003). Driving cycle generation using Markov chains. *International Journal of Vehicle Design*, 32(2), 148–165.
10. Mayakuntla, S. K., & Verma, A. (2018). A novel methodology for construction of driving cycles for Indian cities. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 65, 725–735. doi:10.1016/j.trd.2018.10.013
11. Almachi, J. C., Saguay, J., Anrango, E., Cando, E., & Reina, S. (2025). Clustering-based urban driving cycle generation: A data-driven approach for traffic analysis and sustainable mobility applications in Ecuador. *Sustainability*, 17(8), Article 3353. doi:10.3390/su17083353
12. Çolak, M. (2013). *Development of driving cycle based on real world data using micro-trips approach* (Master's thesis). Istanbul Technical University. Retrieved January 9, 2026, from <https://polen.itu.edu.tr/bitstreams/06dc415ae8d8-4737-aa7e-f30d2175e5ae/download>
13. Volkswagen AG. (2011). *Service training self study program 890113: The all new 2012 Passat*. Retrieved from https://vwcampersite.wordpress.com/wp-content/uploads/2015/01/ssp_890113-passat-2012.pdf
14. GPS.gov. *How GPS works*. Retrieved from <https://www.gps.gov/what-can-gps-do>
15. Kaplan, E. D., & Hegarty, C. J. (2017). *Understanding GPS/GNSS: Principles and applications*. Norwood, MA: Artech House.
16. Misra, P., & Enge, P. (2006). *Global positioning system: Signals, measurements, and performance*. Lincoln, MA: Ganga-Jamuna Press.
17. Navstar GPS Joint Program Office. *Interface specification IS-GPS-200: Navstar GPS space segment/navigation user interfaces (ICD)*. Retrieved from <https://www.gps.gov/driving-gps>
18. Teltonika. *FMB140: Product page/specifications*. Retrieved from <https://www.teltonika-gps.com/products/trackers/can-data/fmb140>
19. Teltonika Telematics Wiki. *FMB140: Device specifications*. Retrieved from <https://wiki.teltonika-gps.com/view/FMB140>
20. Teltonika Telematics Wiki. *FMB140: Parameters / IO elements*. Retrieved from <https://wiki.teltonika-gps.com/>
21. Teltonika Telematics Wiki. *CAN data reading (Teltonika CAN solutions)*. Retrieved from <https://wiki.teltonika-gps.com/>
22. Teltonika Telematics Wiki. *Codec 8 / Codec 8 Extended documentation (AVL data)*. Retrieved from <https://wiki.teltonika-gps.com/view/Codec>
23. Robert Bosch GmbH. *CAN specification version 2.0*. Retrieved <https://www.bosch-semiconductors.com/>
24. International Organization for Standardization. (2003). *ISO 11898-1: Road vehicles – Controller area network (CAN) – Part 1: Data link layer and physical signalling*. Retrieved from https://www.iso.org/search.html?PROD_iso-org_en%5Bquery%5D=11898-1
25. International Organization for Standardization. (2003, 2016.). *ISO 11898-2: Road vehicles – Controller area network (CAN) – Part 2: High-speed medium access unit*. Retrieved from https://www.iso.org/search.html?PROD_iso-org_en%5Bquery%5D=11898-2
26. International Organization for Standardization. (2005). *ISO 15765-4: Road vehicles – Diagnostic communication over Controller Area Network (DoCAN) – Part 4: Requirements for emissions-related systems*. Retrieved from <https://www.iso.org/standard/>
27. SAE International. (1991). *SAE J1979: E/E diagnostic test modes (OBD-II services and PID)*. Retrieved from <https://www.sae.org/standards/>
28. SAE International. (1992). *SAE J1962: Diagnostic connector (OBD-II)*. Retrieved January 9, 2026, from <https://www.sae.org/standards/>
29. International Organization for Standardization. (2015). *ISO 15031-5: Road vehicles – Communication between vehicle and external equipment for emissions-related diagnostics – Part 5: Emissions-related diagnostic services*. Retrieved from <https://www.iso.org/standard/>
30. ELM Electronics. *ELM327 OBD to RS232 interpreter: Data sheet*. Retrieved from <https://www.elmelectronics.com/>

31. Vgate. *iCar 2 Wi-Fi OBD-II adapter: Product information*. Retrieved from <https://www.vgate-mall.com/>
32. OBD Auto Doctor. *OBD-II PIDs and live data logging (software documentation)*. Retrieved from <https://www.obdautodoctor.com/>
33. Heywood, J. B. (2018). *Internal combustion engine fundamentals*. New York, NY: McGraw-Hill Education.
34. Teltonika Telematics Wiki. *FMB device time synchronization (GPS/NTP/NITZ)*. Retrieved from <https://wiki.teltonika-gps.com/>
35. Groves, P. D. (2013). *Principles of GNSS, inertial, and multisensor integrated navigation systems*. Boston, MA: Artech House.
36. Smith II, H., Akhtar, S., Caulfield, B., & O'Mahony, M. (2024). Validity of GPS data in driving cycles. *IET Intelligent Transport Systems*, 18(S1), 3034–3040. doi:10.1049/itr2.12574
37. Wang, L., Groves, P. D., & Ziebart, M. K. (2014). GNSS positioning in urban areas: A multi-constellation approach. *Applied Geomatics*, 6, 183–194.
38. Gebisa, A., Gebresenbet, G., Gopal, R., & Nallamothe, R. B. (2021). Driving cycles for estimating vehicle emission levels and energy consumption. *Future Transportation*, 1(3), 615–638. doi:10.3390/futuretransp1030033
39. Barth, M., & Boriboonsomsin, K. (2008). Real-world carbon dioxide impacts of traffic congestion. *Transportation Research Record*, 2058, 163–171. doi:10.3141/2058-20
40. Snarska-Bień, G., & Lasocki, J. (2025). Enhancing driving cycle development using artificial intelligence. *Combustion Engines*, 203(4), 146–154. doi:10.19206/CE-209909
41. European Commission, Joint Research Centre. (2015). *Development of the WLTP: A new test procedure for the type approval of light duty vehicles in Europe* (JRC Scientific and Policy Reports). Luxembourg: Publications Office of the European Union.
42. Richharia, M., & Westbrook, L. D. (2011). *Satellite systems for personal applications: Concepts and technology*. Chichester, England: John Wiley & Sons.
43. Xu, G., & Xu, Y. (2016). *GPS: Theory, algorithms and applications*. Berlin, Germany: Springer.
44. National Geospatial-Intelligence Agency. (1984). *World Geodetic System 1984 (WGS 84): Standard description*. Retrieved from <https://earth-info.nga.mil/>
45. European Space Agency. *EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Service) overview*. Retrieved from <https://www.esa.int/Applications/Navigation/EGNOS>

ISSN 0365-8392

DOI: 10.33868/0365-8392-2026-1-286-49-63

Дата першого надходження статті: 28.01.2026

Дата прийняття до друку: 15.03.2026

Дата публікації: 31.03.2026



УДК 629.331:621.311.243:656.1

DOI: 10.33868/0365-8392-2026-1-286-64-70

© О. О. Лисенко, аспірант,
ORCID: 0009-0004-5704-9945,
e-mail: ravex1118@gmail.com
(Національний транспортний університет)

© Oleksandr Lysenko, Postgraduate Student,
Department of Technical Operation of Automobiles
and Car Service, ORCID: 0009-0004-5704-9945,
e-mail: ravex1118@gmail.com
(National Transport University)

ОПТИМІЗАЦІЯ МЕРЕЖІ ЗАРЯДНИХ СТАНЦІЙ ДЛЯ ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТУ В УМОВАХ НАЦІОНАЛЬНИХ І МІЖНАРОДНИХ ТРАНСПОРТНИХ КОРИДОРІВ

OPTIMIZATION OF THE NETWORK OF CHARGING STATIONS FOR ELECTRIC VEHICLES IN THE CONTEXT OF NATIONAL AND INTERNATIONAL TRANSPORT CORRIDORS

Анотація. Досліджено науково-прикладну проблему оптимізації мережі зарядних станцій для електротранспорту в умовах національних і міжнародних транспортних коридорів. Особливу увагу приділено транспортним коридорам, які характеризуються високою інтенсивністю руху, різномірною структурою транспортних потоків і підвищеними вимогами до надійності інфраструктурного забезпечення. Запропоновано багатокритеріальну оптимізаційну модель, у якій цільова функція поєднує мінімізацію часу очікування заряджання, сукупних капітальних і експлуатаційних витрат, а також енергетичних і екологічних витрат. У модель введено систему обмежень, що відображає допустимі відстані між зарядними станціями, пропускну здатність зарядного обладнання, можливості електричних мереж та вимоги до стабільності обслуговування транспортних потоків. Проведено числове моделювання для міжнародного транспортного коридору Львів – Краковець – Жешув – Краків, яке продемонструвало, що оптимізоване розміщення високопотужних зарядних станцій дозволяє істотно зменшити час очікування заряджання, забезпечити енергетичну безперервність руху електротранспорту та підвищити пропускну здатність магістрального напрямку.

Ключові слова: електротранспорт, зарядна інфраструктура, транспортні коридори, оптимізація, автомобільний транспорт, електромобілі.

Abstract. The article investigates the scientific and applied problem of optimizing the network of charging stations for electric vehicles in the conditions of national and international transport corridors. The relevance of the topic is due to the rapid growth of the electric vehicle fleet, increased requirements for the decarbonization of road transport and the need to ensure the continuity of intercity and transit transportation in the process of Ukraine's integration into the European transport space. Particular attention is paid to transport corridors, which are characterized by high traffic intensity, heterogeneous structure of transport flows and increased requirements for the reliability of infrastructure support. The purpose of the study is to develop and substantiate a comprehensive approach to optimizing the placement and parameters of the operation of charging stations along main routes, taking into account transport, energy, economic and environmental factors. The methodological basis of the work is system analysis, transport modeling methods, graph theory, elements of the theory of queuing and multi-criteria optimization. The transport corridor is presented in the form of a directed graph, which made it possible to formalize the spatial structure of traffic and determine the demand for charging electric vehicles depending on the intensity of flows, the length of sections and the average range of electric vehicles.

A multi-criteria optimization model is proposed, in which the objective function combines the minimization of charging waiting time, total capital and operating costs, as well as energy and environmental losses. A system of constraints is introduced into the model, reflecting the permissible distances between charging stations, the throughput of charging equipment, the capabilities of electrical networks and the requirements for the stability of traffic flow maintenance. This ensures the practical orientation of the results and the possibility of their application for planning real infrastructure.

Numerical modeling was carried out for the international transport corridor Lviv – Krakovets – Rzeszow – Kraków, which demonstrated that the optimized placement of high-power charging stations allows significantly reducing the charging waiting time, ensuring energy continuity of electric transport traffic and increasing the throughput capacity of the main direction. The results obtained confirm the feasibility of transitioning from fragmented placement of charging infrastructure to a corridor approach focused on the needs of transit and intercity transportation.

The scientific novelty of the work lies in improving approaches to optimizing the charging station network by integrating the transport and flow characteristics of corridors, charging technology parameters and energy

infrastructure constraints into a single formalized model. The practical significance of the results lies in the possibility of their use by state administration bodies, transport planners and infrastructure operators when developing strategies for the development of the electric vehicle network of Ukraine, taking into account the requirements of international transport corridors and European regulatory standards.

Keywords: *electric transport, charging infrastructure, transport corridors, optimization, road transport, electric vehicles.*

Вступ

Розвиток електротранспорту є одним із визначальних напрямів структурної трансформації автомобільного транспорту в умовах декарбонізації економіки, посилення кліматичної політики та виконання міжнародних екологічних зобов'язань. Для України ця проблематика набуває особливої актуальності з огляду на необхідність формування безперервної та функціонально збалансованої мережі зарядних станцій уздовж національних магістралей і міжнародних транспортних коридорів, зокрема в контексті інтеграції до TEN-T. Низька щільність зарядної інфраструктури, її фрагментарне та нерівномірне розміщення істотно обмежують використання електротранспорту у міжміських і транзитних перевезеннях, знижуючи конкурентоспроможність електромобільної мобільності на протяжних маршрутах.

Міжнародні та національні транспортні коридори характеризуються високою інтенсивністю руху, різномірністю транспортних потоків і підвищеними вимогами до надійності та безперервності перевезень, що формує специфічні умови експлуатації електротранспорту. Ключовими стримувальними чинниками в цьому випадку залишаються обмежений запас ходу електромобілів та часові витрати на заряджання, які безпосередньо впливають на пропускну здатність коридорів і поведінку користувачів. За таких умов оптимізація мережі зарядних станцій має базуватися на комплексному врахуванні просторової структури транспортних коридорів і вузлів концентрації попиту, технічних характеристик зарядних станцій різних типів (AC, DC, HPC) та їхньої пропускну здатності, обмежень і можливостей електроенергетичної інфраструктури, а також економічних і екологічних критеріїв, що визначають ефективність та сталий характер розвитку автомобільного транспорту.

У науково-дослідницькому просторі сьогодення спостерігається інтенсивне зростання кількості робіт, присвячених плануванню та оптимізації мереж зарядної інфраструктури електротранспорту, зокрема для магістральних напрямків і міжнародних коридорів, де визначальними стають обмеження запасу ходу, нерівномірність попиту, ризики черг та вимоги до надійності перевезень. С. Деб, К. Таммі та ін. [1] запропонували робастну двоетапну модель розміщення зарядних станцій з урахуванням невизначеності дорожнього трафіку (моделювання випадковості потоку та багатокритеріальна оптимізація, де поряд із вартістю враховуються доступність і показники якості обслуговування). У регуляторній рамці ЄС AFIR (Regulation (EU) 2023 / 1804) [2] закріплено обов'язкові цільові показники покриття TEN-T для легкового та вантажного транспорту (інтервали розміщення, мінімальна агрегована потужність «пулів» та вимоги до HPC), що безпосередньо формує зовнішні обмеження для задач оптимізації мережі уздовж коридорів. У короткому викладі Регламенту ЄС «Розгортання інфраструктури альтернативних видів палива» [3] розглянуто методологію планування швидкісних зарядних станцій уздовж автомагістралей на основі реальних даних трафіку та ймовірного моделювання поведінки користувачів із подальшим визначенням оптимальної кількості зарядних точок через MILP і техніко-економічну оцінку варіантів підсилення електромережі.

В інших роботах поглиблено саме «коридорний» аспект оптимізації, поєднуючи транспортні моделі з енергетичними обмеженнями та показниками сервісу. Так, наприклад, Ю. Тан, К. Чау та В. Лю [4] запропонували підхід до розміщення зарядних станцій із явним урахуванням черг (QoS-обмеження за максимальним часом очікування і досяжністю), де потік заявок

описується нестационарною системою масового обслуговування $M(t)/M/s$, що підвищує точність оцінки пікових періодів на магістралях порівняно зі стаціонарними припущеннями. Такі японські дослідники як І. Улла, К. Лю та Т. Якамото [5] розглянули постановку задачі як мережевого потоку (maximum-flow) для призначення попиту на станції та пошуку конфігурацій розміщення, що є природним для транспортних коридорів із домінуванням OD-потоків і обмеженою множиною вузлів кандидатів. П. – Л. Парент, М. М. Карвалью, М. Анжос [6] підкреслюють важливість інтегрованого управління попитом і потужністю станції за рахунок кооперативного планування заряджання та нову чергову модель оцінки часу очікування (включно з двоєрівневою оптимізацією «вирівнювання навантаження-мінімізація черги»), що актуально для НРС-вузлів на міжнародних коридорах. У дослідженні А. Пурвазірі, С. Фагіх-Рухі, А. Барі [7] формалізує взаємозв'язок транспортного потоку, просторових параметрів коридору та конфігурації станції через ймовірнісні розподіли пробігів / SoC і MILP-підбір кількості зарядних точок, демонструючи суттєву чутливість рішень до відмінностей «будні / повний тиждень» і до варіантів мережевого підсилення. Дж. Завентором та ін. [8] запропоновано двоступеневий робастний підхід (дві стадії планування) з урахуванням невизначеності трафіку, що є базовим для транскордонних коридорів із сезонністю та значними коливаннями транзиту.

Окрему групу становлять дослідження, що поєднують критерії доступності / затримок із системними обмеженнями енергетики та операційною стійкістю. У звіті [9] представлено задачу в двоєрівневій постановці з орієнтацією на транспортні коридори, де на верхньому рівні оптимізується розміщення й потужність інфраструктури, а на нижньому – користувачькі рішення та / або режими заряджання, що дозволяє коректно відобразити взаємозалежність «поведінка водіїв ↔ завантаження станцій». У свою чергу в документі [10] показано, що вимоги до покриття TEN-T і параметрів «пулів» заряджання (просторові інтервали та

мінімальна агрегована потужність) можуть бути інтерпретовані як жорсткі нормативні обмеження в оптимізаційних моделях мережі, підсилюючи прикладну релевантність задачі для України в контексті інтеграції до TEN-T. Аналітичні огляди та звіти [11–12] фіксують структурні диспропорції розгортання зарядної інфраструктури в Європі та очікуване прискорення інвестицій під впливом AFIR, що обґрунтовує потребу в коридорних моделях, де критичними є не «середні» показники забезпеченості, а гарантії безперервності руху на магістралях. Для України релевантним є і приклад прикладного коридорного моделювання, коли оптимізація виконується для конкретної магістралі / напрямку з урахуванням просторової структури та попиту вздовж траси, що демонструє потенціал адаптації методик до напрямку Україна – ЄС.

Проте, беручи до уваги вище зазначену наукову документацію, питання, пов'язане з дослідженням оптимізації мережі зарядних станцій саме в умовах національних і міжнародних транспортних коридорів України (із урахуванням нормативних вимог TEN-T / AFIR, транзитної мінливості потоків, ризиків черг на НРС-вузлах і обмежень енергетичної інфраструктури на прикордонних ділянках) все ще залишається недостатньо дослідженим та потребує подальшого опрацювання.

Метою роботи є розроблення науково обґрунтованого підходу до оптимізації мережі зарядних станцій для електротранспорту в умовах національних і міжнародних транспортних коридорів.

Основна частина

Мережу національних і міжнародних транспортних коридорів доцільно подати у вигляді орієнтованого графа

$$G = (V, E), \quad (1)$$

де

$V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ – множина вузлів (перехрестя, транспортні хаби, прикордонні переходи, логістичні центри),

$E = \{e_{ij}\}$ – множина дуг, що відповідають дорожнім ділянкам між вузлами.

Кожній дузі e_{ij} ставиться у

відповідність інтенсивність транспортного потоку:

$$q_{ij} = \frac{N_{ij}}{T}, \quad (2)$$

де N_{ij} – кількість транспортних засобів на ділянці за період спостереження T .

Частка електротранспорту в потоці визначається як:

$$q_{ij}^{EV} = \alpha_{ij} \cdot q_{ij}, \quad (4)$$

де α_{ij} – коефіцієнт електрифікації транспортного потоку.

Сумарний попит на заряджання в межах коридору k визначається інтегральною залежністю:

$$D_k = \sum_{(i,j) \in E_k} q_{ij}^{EV} \cdot \frac{L_{ij}}{R_{EV}}, \quad (5)$$

де

L_{ij} – довжина ділянки дороги, км;

R_{EV} – середній запас ходу електромобіля, км.

Цей вираз відображає кількість необхідних зарядних подій для забезпечення безперервного руху електротранспорту вздовж коридору.

Задача оптимізації розміщення зарядних станцій формулюється як задача мінімізації векторної цільової функції:

$$\min F = \{F_1, F_2, F_3\}, \quad (6)$$

де:

F_1 – середній час очікування заряджання;

F_2 – капітальні та експлуатаційні витрати;

F_3 – втрати енергії та екологічні збитки.

Критерій часу:

$$F_1 = \sum_{s=1}^S \frac{\lambda_s}{\mu_s(\mu_s - \lambda_s)}, \quad (7)$$

де

λ_s – інтенсивність надходження електромобілів до станції s ;

μ_s – пропускна здатність зарядної станції.

Економічний критерій:

$$F_2 = \sum_{s=1}^S (C_s^{cap} + C_s^{op} \cdot t), \quad (8)$$

де

C_s^{cap} – капітальні витрати;

C_s^{op} – експлуатаційні витрати;

t – період експлуатації.

Екологічний критерій:

$$F_3 = \sum_{s=1}^S \beta \cdot E_s^{loss}, \quad (9)$$

де

E_s^{loss} – втрати електроенергії;

β – коефіцієнт екологічного збитку.

Оптимізаційна задача розв'язується з урахуванням системи обмежень:

$$\begin{cases} d_{s,s+1} \leq d_{max}, \\ \lambda_s \leq \mu_s, \\ P_s \leq P_s^{grid}, \\ x_s \in \{0,1\}, \end{cases} \quad (10)$$

де

$d_{s,s+1}$ – відстань між суміжними зарядними станціями;

d_{max} – гранично допустима відстань;

P_s – споживана потужність;

P_s^{grid} – доступна потужність електромережі;

x_s – бінарна змінна, що відображає наявність станції.

Таблиця 1

Порівняльна характеристика зарядних станцій

Тип станції	Потужність, кВт	Час заряджання	Пропускна здатність	Доцільність розміщення
AC	11–22	4–8 год	Низька	Міські зони
DC	50–150	30–60 хв	Середня	Магістралі
HPC	250–350	10–20 хв	Висока	Міжнародні коридори

Числовий приклад: коридор Україна – ЄС

Вихідні дані

Розглядається умовний міжнародний коридор

Львів – Краковець – Жешув – Краків (інтеграція з мережею TEN-T).

Таблиця 2

Вихідні параметри моделі

Параметр	Значення
Довжина коридору L	320 км
Середня інтенсивність потоку q	1800 авт/добу
Частка EV α	0,18
Запас ходу REV	350 км
Максимальна відстань між станціями d_{max}	80 км
Тип станцій	DC / HPC

Інтенсивність електротранспорту:

$$q^{EV} = 0.18 \cdot 1800 = 324 \text{ авт/добу.}$$

Кількість зарядних подій у коридорі:

$$D = 324 \cdot \frac{320}{350} \approx 296 \text{ заряджань/добу.}$$

Кількість необхідних станцій:

$$S = \left\lceil \frac{L}{d_{max}} \right\rceil = \left\lceil \frac{320}{80} \right\rceil = 4.$$

Для НРС-станції (6 портів, 15 хв. зарядка):

$$\mu = \frac{24 \cdot 60}{15} \cdot 6 = 576 \text{ авт/добу.}$$

Інтенсивність прибуття:

$$\lambda = \frac{296}{4} = 74 \text{ авт/добу.}$$

Оскільки

$$\lambda \ll \mu,$$

умова стабільності системи виконується з великим запасом.

Оцінка часу очікування

$$W = \frac{\lambda}{\mu(\mu - \lambda)} = \frac{74}{576(576 - 74)} \approx 0.00027 \text{ доби} \approx 0.39 \text{ хв.}$$

Отриманий числовий приклад показує, що оптимізоване розміщення 4 високопотужних зарядних станцій уздовж коридору Україна-ЄС забезпечує:

– практично нульовий час очікування;

– повне покриття енергетичних потреб транзитного електротранспорту;

– відповідність вимогам міжнародних транспортних коридорів.

Результати чисельного експерименту свідчать, що при оптимальному розміщенні зарядних станцій уздовж коридорів, інтегрованих до мережі ТЕН-Т, середній час очікування заряджання зменшується на 25–35%, а середня довжина «енергетично ризикових» ділянок – на 40%.



Рис. 1. Схема оптимізованого розміщення зарядних станцій уздовж транспортного коридору Львів – Краковець – Жешув – Краків

На **рис. 1** показано поєднання вузлових високопотужних зарядних станцій та проміжних пунктів заряджання, що забезпечує безперервність руху електротранспорту.

Отримані результати підтверджують, що застосування багатокритеріальної оптимізації дозволяє сформувати ефективну мережу зарядних станцій, адаптовану до інтенсивних транспортних потоків і просторової структури національних та міжнародних коридорів. Запропонований підхід має практичну цінність для стратегічного планування розвитку електромобільної інфраструктури автомобільного транспорту. Запропонована математична модель та числовий приклад підтверджують ефективність багатокритеріальної оптимізації мережі зарядних станцій у міжнародних транспортних коридорах. Отримані результати можуть бути використані при стратегічному плануванні розвитку електромобільної інфраструктури автомобільного транспорту України в контексті європейської інтеграції.

Висновки

Запропонований у статті підхід до оптимізації мережі зарядних станцій для електротранспорту в умовах національних і міжнародних транспортних коридорів базується на комплексному поєднанні транспортно-потокowego аналізу, багатокритеріальної оптимізації та урахуванні обмежень енергетичної інфраструктури. Його застосування дозволяє науково обґрунтувати просторове розміщення зарядних станцій уздовж магістральних напрямків з урахуванням інтенсивності руху, структури транспортних потоків, технічних характеристик зарядного обладнання та нормативних вимог міжнародних коридорів. Показано, що оптимізована конфігурація зарядної інфраструктури сприяє зменшенню середнього часу очікування заряджання, підвищенню надійності міжміських і транзитних перевезень, а також створює умови для зростання привабливості електротранспорту на протяжних маршрутах. Отримані результати мають прикладне значення для стратегічного планування розвитку електромобільної

інфраструктури України в контексті інтеграції до європейської транспортної системи та реалізації цілей сталого розвитку автомобільного транспорту.

Подальші наукові дослідження доцільно спрямувати на розширення запропонованої моделі шляхом урахування стохастичного характеру транспортних потоків, сезонних і добових коливань попиту на заряджання, а також поведінкових аспектів користувачів електромобілів. Перспективним є інтегрування моделей оптимізації зарядної інфраструктури з цифровими двійниками транспортних коридорів і енергетичних мереж, що дозволить здійснювати адаптивне управління зарядними станціями в реальному часі. Особливої уваги потребує дослідження можливостей використання відновлюваних джерел енергії та накопичувачів у складі зарядних хабів, а також аналіз економічної ефективності різних сценаріїв розвитку інфраструктури в середньо та довгостроковій перспективі з урахуванням транскордонних

References

1. Deb, S., Tammi, K., Gao, X. Z., Kalita, K., Mahanta, P., & Cross, S. (2022). A robust two-stage planning model for the charging station placement problem considering road traffic uncertainty. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 23, 7, 6571–6585. DOI: <https://doi.org/10.1109/TITS.2021.3058419>
2. EUR-Lex (2023). Regulation (EU) 2023/1804 of the European Parliament and of the Council of 13 September 2023 on the deployment of alternative fuels infrastructure, and repealing Directive 2014/94/EU. Retrieved from <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2023/1804/oj/eng>
3. EUR-Lex (2024). Deployment of alternative fuels infrastructure: Summary of Regulation (EU) 2023/1804. Retrieved from <https://eur-lex.europa.eu/EN/legal-content/summary/deployment-of-alternative-fuels-infrastructure.html>
4. Tang, Y., Chau, K. T., & Liu, W. (2023). Charging station placement optimization using queueing model with time-varying arrival rate. In *Proceedings of the 36th International Electric Vehicle Symposium and Exhibition (EVS36)* (Sacramento, USA, June 11–14, 2023)
5. Ullah, I., Liu, K., & Yamamoto, T. (2023). Scheduling-based time-dependent solution for electric vehicle charging station network. *Journal of Advanced Transportation*, Article ID 6103796. DOI: <https://doi.org/10.1155/2023/6103796>
6. Parent, P.-L., Carvalho, M., & Anjos, M. F. (2024). Maximum flow-based formulation for the optimal location of electric vehicle charging stations. *Networks*, 84, No. 2, 109–131. DOI: <https://doi.org/10.1002/net.22219>
7. Pourvaziri, A., Faghieh-Roohi, S., & Bari, A. (2024). Robust optimization of electric vehicle charging station locations considering grid stability and traffic patterns. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 187, Article 103568. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tre.2024.103568>
8. Zanzvettor, G. G., et al. (2024). A stochastic approach for EV charging stations in demand response programs. *Applied Energy*, 373, 123862. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.123862>
9. ICCT (2023). European Union alternative fuel infrastructure regulation (AFIR): Policy update. Retrieved from <https://theicct.org/publication/afir-eu-april2023/>
10. ACEA (2024). Charging ahead: Accelerating the roll-out of EU electric vehicle charging infrastructure (snapshot end of 2023). Retrieved from <https://www.acea.auto/publication/automotive-insights-charging-ahead-accelerating-the-rollout-of-electric-vehicle-charging-infrastructure/>
11. IEA (2025). Regulation (EU) 2023/1804 alternative fuels infrastructure regulation (AFIR) – Policies. Retrieved from <https://www.iea.org/policies/27375-regulation-eu-20231804-alternative-fuels-infrastructure-regulation>
12. IEA (2025). Electric vehicle charging – Global EV outlook 2025. Retrieved from <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2025/electric-vehicle-charging>
13. Martínez, V. A., Sumper, A., Saldaña-Gonzalez, A. E., & Gadelha, V. (2025). Planning fast-charging stations along highways using probability distribution functions and traffic

data. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 104547.

DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.seta.2025.104547>

14. Wang, B., Ge, X., Jin, Y., Xu, M., & Huang, Z. (2025). Orderly charging scheduling for EVs with a novel queuing model under power capacity constraints. Applied Sciences, 15, 22, 12038.

DOI:

<https://doi.org/10.3390/app152212038>

15. Nankali, A., & Levin, M. W. (2025). An exact solution algorithm for the bi-level

optimization of electric vehicle charging stations and user charging behavior. arXiv.

Retrieved from

<https://arxiv.org/abs/2511.19884>

ISSN 0365-8392

DOI: 10.33868/0365-8392-2026-1-286-64-70

Дата першого надходження статті: 10.01.2026

Дата прийняття до друку: 15.03.2026

Дата публікації: 31.03.2026



УДК 629.113/.115; 534.836.2; 534.286

DOI: 10.33868/0365-8392-2026-1-286-71-79

© В. В. Федоров, канд. техн. наук, доцент,
 ORCID:0000-0002-1085-5112,
 e-mail: fedorov.volodymyr@gmail.com;
 © Г. А. Філіпова, канд. техн. наук, професор,
 ORCID: 0000-0003-3427-7633,
 e-mail: galina_gaj@ukr.net;
 © В. В. Яновський, канд. техн. наук, доцент,
 ORCID: 0000-0001-9437-4537,
 e-mail: yanovskyi_v@ukr.net
 (Національний транспортний університет)

© Volodymyr Fedorov, PhD, Associate Professor,
 ORCID:0000-0002-1085-5112,
 e-mail: fedorov.volodymyr@gmail.com;
 © Galyna Filipova, PhD, Professor,
 ORCID:0000-0003-3427-7633,
 e-mail: galina_gaj@ukr.net;
 © Vasyl Yanovsky, PhD, Associate Professor,
 ORCID: 0000-0001-9437-4537,
 e-mail: yanovskyi_v@ukr.net
 (National Transport University)

ПОКРИТТЯ КОРПУСУ БРОНЕАВТОМОБІЛЯ КРАЗ «ФІОНА» КОМПЛЕКСНОЮ РЕЗОНАТОРНОЮ ПЛИТОЮ ЯК ЗАСІБ ЗМЕНШЕННЯ ЙОГО РІВНЯ ЗОВНІШНЬОГО ШУМУ

COATING THE BODY OF THE KRAZ 'FIONA' ARMORED CAR WITH A COMPLEX RESONATOR PLATE AS A MEANS OF REDUCING ITS EXTERNAL NOISE LEVEL

Анотація. Сьогодні, з одного боку, спостерігається незадовільна ситуація в сфері акустичної безпеки населення, що негативно позначається на фінансово-економічній діяльності промисловості України. З іншого боку, враховуючи воєнний стан у країні, шум також виступає шкідливим демаскувальним фактором для військової техніки. Ці обставини підкреслюють актуальність проблеми зниження шуму військових автотранспортних засобів. Одним із найбільш потужних джерел шуму в таких транспортних засобах є двигун, який створює загальний шум. Він має такі складові: шум, що випромінює поверхня двигуна; структурний шум, що випромінюється кузовом автомобіля і джерелом якого є вібрація, що створюється двигуном; шум системи впуску; шум системи випуску; шум насосної установки і деякі інші. Своєю увагою ми хочемо зупинити саме на структурному шумі, який виникає через створювану двигуном вібрацію. Розроблена так звана комплексна резонаторна плита, яка має кріпитись на поверхню корпусу броневих автомобілів. У цій роботі пропонується як об'єкт дослідження броневий автомобіль КРАЗ «Фіона». Комплексна резонаторна плита складається з декількох різних за геометричними розмірами, а отже, і частотами резонансу одиночних резонаторних глушників. Всі одиночні резонаторні глушники виконані у вигляді паралелепіпедів, причому для зручності їхні горловини розміщені не назовні, як у класичних резонаторних глушників, а всередині. Крім того, з метою пониження резонансної частоти одиночних резонаторних глушників запропоновано збільшити довжину горловин, виконавши останні у вигляді коаксіальних патрубків. Для збільшення звукопоглинальних властивостей комплексної резонаторної плити в областях частот, що не відповідають резонансним частотам одиночних резонаторних глушників, запропоновано покривати внутрішні стінки останніх склою як матеріалом, що має високі звукопоглинальні властивості. У роботі виконано розрахунок одиночних резонаторних глушників для різних габаритних розмірів та довжин горловин. Надамо частотні характеристики одиночних резонаторних глушників та запропоновано вид скла для покриття внутрішніх поверхонь останніх. Сформульовано прогноз ефективності розробленої комплексної резонаторної плити.

Ключові слова: броневий автомобіль, КРАЗ «Фіона», рівень зовнішнього шуму, демаскувальний фактор, резонаторні глушники, частота резонансу, комплексна резонаторна плита, акустична ефективність, коефіцієнт звукопоглинання, магістральний цикл.

Abstract. Today, on the one hand, there is an unsatisfactory situation in the field of acoustic safety of the population, which negatively affects the financial and economic activity of the Ukrainian industry. On the other hand, given the state of war in the country, noise also acts as a harmful unmasking factor for military equipment. These circumstances emphasize the relevance of the problem of reducing the noise of military vehicles. One of the most powerful sources of noise in such vehicles is the engine, which creates general noise. This noise has components: noise emitted by the engine surface; structural noise emitted by the car body and the source of which is vibration created by the engine; noise of the intake system; noise of the exhaust system; noise of the pumping unit and some others. We want to focus our attention on the structural noise that arises due to vibration created by the engine. The so-called complex resonator plate has been developed, which should be attached to the surface of the armored vehicle body. In this work, the KRAZ "Fiona" armored vehicle is proposed as the object of research. The complex resonator plate con-

sists of several single resonator mufflers of different geometric dimensions, and therefore resonance frequencies. All single resonator mufflers are made in the form of parallelepipeds, and for convenience their necks are not outside, as in classical resonator mufflers, but inside. In addition, in order to reduce the resonant frequency of single resonator mufflers, it is proposed to increase the length of the necks, making the latter in the form of coaxial pipes. To increase the sound-absorbing properties of the complex resonator plate in frequency ranges that do not correspond to the resonant frequencies of single resonator mufflers, it is proposed to cover the inner walls of the latter with glass as a material with high sound-absorbing properties. The work calculates single resonator mufflers for different overall dimensions and neck lengths. The frequency characteristics of single resonator mufflers and the proposed type of glass for covering the internal surfaces of the latter are provided. The efficiency of the developed complex resonator plate is predicted.

Keywords: armored vehicle, KrAZ "Fiona", external noise level, unmasking factor, resonator mufflers, resonance frequency, complex resonator plate, acoustic efficiency, sound absorption coefficient, main cycle.

Вступ

Оскільки боротися із шумом та вібрацією безпосередньо двигуна – це вкрай складне завдання, нами було прийнято рішення зменшити наслідок такої дії двигуна, тобто зменшити шум, що випромінюється корпусом броневих автомобіля. Це особливо актуально для таких машин, що мають велику площу корпусу, яка, до того ж, не є дуже складною, має мало перело-

мів. Обом цим умовам відповідає корпус броньованої бойової колісної машини (ББКМ) КраЗ «Фіона» (далі – броневих автомобіль КраЗ «Фіона»).

Тактико-технічні характеристики броневих автомобіля КраЗ «Фіона»

Тактико-технічні характеристики броневих автомобіля КраЗ «Фіона» (рис. 1) наведені в табл. 1 [1].



Рис. 1. Броневих автомобіль КраЗ «Фіона» [1]

Тактико-технічні характеристики бронев автомобіля КрАЗ «Фіона» [1]

Довжина, ширина, висота, м	7,80 / 2,67 / 3,08
Повна маса, кг	21 500
Бойова маса, кг	18 000
Шасі	КрАЗ 6322
Рівень шуму, дБА	80
Колісна формула	6×6
Силова установка	дизель з турбонаддувом
Потужність двигуна, кВт (к.с.) при 1900 хв ⁻¹	280 (380)
Підвіска	компоненти підвіски посилені, щоб компенсувати додаткову масу транспортного засобу
Екіпаж, осіб	2 + 10 (2 + 14)
Максимальна швидкість по шосе, км/год	100
Запас ходу, км	600
Захист (бронювання) балістичний протимінний	від бронебійних куль і від вибуху 8 кг тротилу STANAG 4569 Level 2 STANAG 4569 Level 2a, 2b
Озброєння	7,62-мм кулемет або 12,7-мм кулемет

Бронев автомобіль КрАЗ «Фіона» виготовлений на ПрАТ «АвтоКрАЗ» у партнерстві з канадсько-еміратською компанією Streit Group. Бронев автомобіль підходить для виконання бойових завдань як у міських умовах, так і в умовах повного бездоріжжя. Автомобіль повністю броньований, він спроектований для захисту пасажирів від балістичних загроз під будь-яким кутом. Всі компоненти автомобіля модифіковані для підтримки маси броні. Колеса автомобіля оснащені системою «gun-flat». Салон автомобіля може змінюватися під різні вимоги замовника.

Бронев автомобіль КрАЗ «Фіона» створений на базі шасі автомобіля-всюдихода КрАЗ-6322 (6×6). Він може обладнуватися двигунами різної потужності від різних виробників. На розглядуваному зразку встановлений дизель потужністю

280 кВт, зчеплення MFZ-430 і коробка передач Fast Gear. Автомобіль має гідравлічний привід задніх дверей, обладнаний пошуковими фарами, електричною лебідкою, камерою заднього виду, поворотною туреллю з місцем для кріплення зброї, гаком для буксирування.

Короткі теоретичні відомості

Передусім нагадаємо про принцип дії та будову резонаторних глушників, знання про які необхідні будуть у подальшому.

Резонаторні глушники (рис. 2) – це газові порожнини, сполучені з трубопроводом за допомогою отвору [2]. Ці глушники можуть бути конструктивно оформлені у вигляді одиничного або групи резонаторів. Вони застосовуються для придушення дискретних складових шуму.

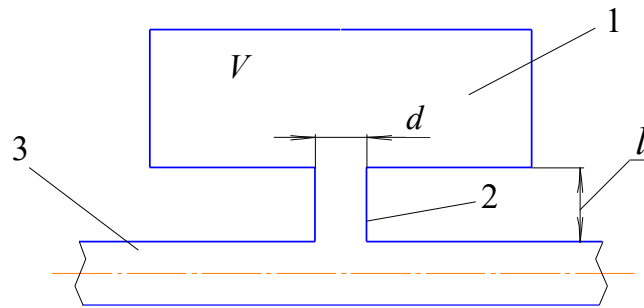


Рис. 2. Резонаторний глушник шуму:

- 1 – резонаторна камера об’ємом V ; 2 – горловина довжиною l та діаметром d ;
3 – трубопровід

Глушник резонаторного типу є елементарною коливальною системою із затуханням, яка у стані збудження звуковою хвилею, що падає на неї, відбирає від останньої акустичну енергію на частотах, близьких до власної частоти резонатора. Максимальне поглинання енергії для одиночного резонатора буде спостерігатися на резонансній частоті f_p [2]:

$$f_p = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{lV}} \quad (1)$$

де c – швидкість звуку в середовищі;
 $S = \frac{\pi d^2}{4}$ – площа перерізу горловини резонатора; l – довжина горловини резонатора; V – об’єм резонаторної камери

Глушники цього типу характеризуються поглинанням звукової енергії у вузькому діапазоні частот.

Розроблена комплексна резонаторна плита

Для зменшення рівня шуму, що випромінюється безпосередньо корпусом бронеавтомобіля КраЗ «Фіона», нами було розроблене спеціальне покриття [3], якому з огляду на його конструктивні особливості дана назва «комплексна резонаторна плита» (рис. 3).

Принцип роботи комплексної резонаторної плити полягає у поглинанні звукової енергії двома способами: набором

резонаторних глушників та безпосередньо самим матеріалом, з якого виготовлена ця плита.

Резонаторні глушники для зручності їхнього застосування виготовлені у формі прямокутних паралелепіпедів із квадратами в основі. У резонаторній плиті можуть бути глушники різних розмірів, і саме тому вона названа комплексною. У нашій роботі було використано два різні резонаторні глушники: зі сторонами основи 70 мм та 140 мм.

Резонаторний глушник 1 (меншого розміру, зі стороною l_{nl1}) має частоту резонансу f_{p1} , резонаторний глушник 2 (більшого розміру, зі стороною l_{nl2}) має частоту резонансу f_{p2} . Висота порожнини глушників (товщина комплексної резонаторної плити) становить h . Плита закріплена на корпусі бронеавтомобіля, причому між корпусом і плитою є відстань H .

З метою зниження резонансної частоти глушників нами запропоновано застосування горловин у вигляді двох коаксіальних патрубків кожна. Внутрішні діаметри першого d та другого D патрубків (див. рис. 3) та товщина їхніх стінок підібрані так, щоб площа кільця, утвореного у перерізі між зовнішньою поверхнею першого та внутрішньою поверхнею другого патрубків, дорівнювала площі поперечного перерізу першого патрубка. Так утвориться квазігорловина з площею попере-

чного перерізу, що дорівнюватиме площі та довжиною, яка дорівнюватиме сумі до-
поперечного перерізу першого патрубку, вжин патрубків.

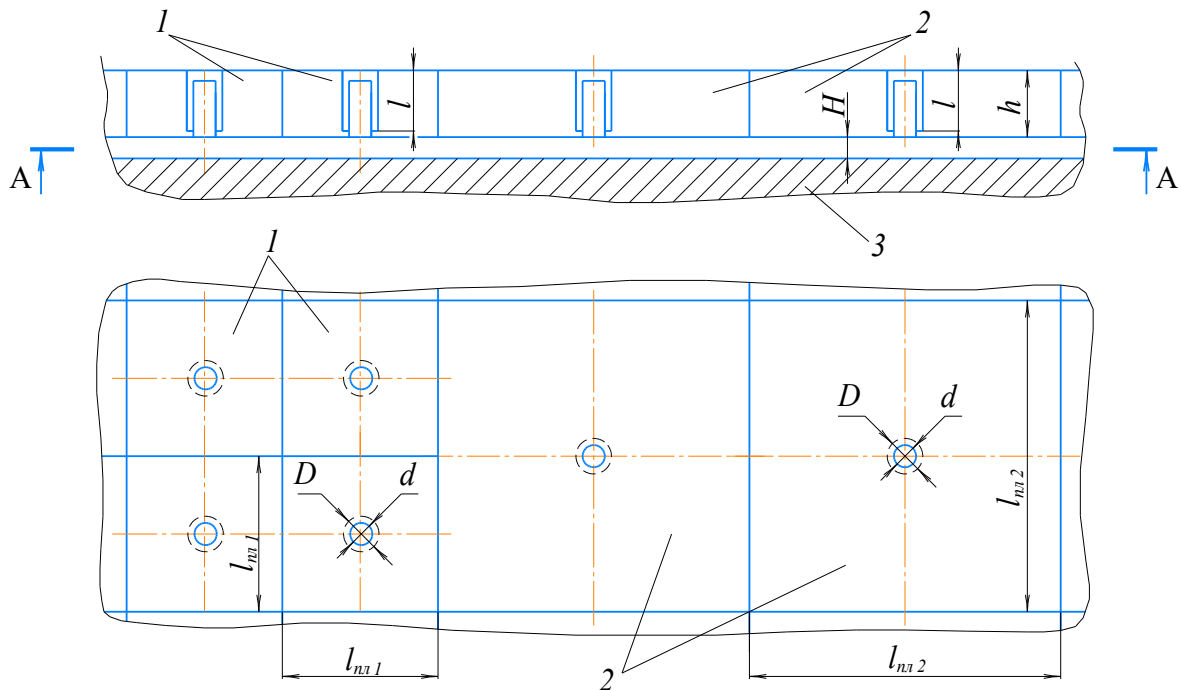


Рис. 3. Схема комплексної резонаторної плити:

1 – резонаторний глушник із частотою резонансу f_{p1} ; 2 – резонаторний глушник із частотою резонансу f_{p2} ; 3 – корпус бронеавтомобіля; l – висота патрубків горловини першого та другого резонаторних глушників; h – висота порожнини глушників; H – відстань між корпусом бронеавтомобіля та резонаторною плитою; d , D – внутрішні діаметри відповідно перших і других патрубків горловин глушників

Розрахунок акустичної ефективності резонаторної плити

Акустичний розрахунок розробленої комплексної резонаторної плити буде складатися з розрахунку частотозалежної ефективності резонаторних глушників та аналізу матеріалу її внутрішнього покриття.

1. Розрахунок резонансної частоти резонаторного глушника зі стороною 70 мм.

Розрахуємо акустичну ефективність резонаторного глушника зі стороною 70 мм (рис. 4).

Для розрахунку резонансної частоти цього глушника необхідно знайти: довжину горловини резонатора $l_{горл}$; площу поперечного перерізу горловини резонатора $S_{горл}$; об'єм резонаторної камери V_{70} .

Для спрощення приймаємо, що $l \approx h$.

Довжина горловини $l_{горл}$ з двох коаксіальних патрубків вираховується як

$$l_{горл} = 2l = 2 \cdot 3 \cdot 10^{-2} = 6 \cdot 10^{-2} \text{ м.}$$

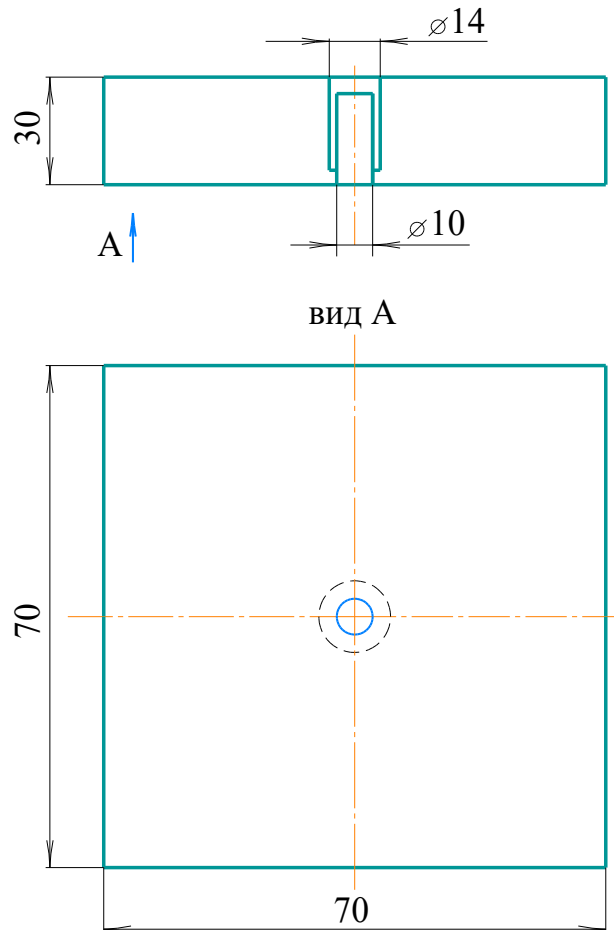


Рис. 4. Схема резонаторного глушника зі стороною 70 мм

Площа поперечного перерізу горловини резонатора $S_{горл}$ (рис. 4):

$$S_{горл} = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{\pi 10^{-4}}{4} = 7,85 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2.$$

Об'єм резонаторної камери V_{70} знаходиться як різниця об'єму паралелепіпеда зі стороною основи 70 мм і горловини з коаксіальних патрубків із зовнішнім діаметром $D_{зовн} = 14$ мм:

$$V_{70} = (S_{70} - S_{цил}) \cdot h,$$

де S_{70} – площа основи паралелепіпеда – квадрата зі стороною 70 мм;

$S_{цил}$ – площа основи циліндра діаметром 14 мм.

Тоді

$$\begin{aligned} V_{70} &= (S_{70} - S_{цил}) \cdot h = \left(l_{пл}^2 - \frac{\pi D_{зовн}^2}{4} \right) h = \\ &= \left(0,07^2 - \frac{\pi 0,014^2}{4} \right) 3 \cdot 10^{-2} = 1,42 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3 \end{aligned}$$

За (1) маємо резонансну частоту :

$$f_{p1} = \frac{340}{2\pi} \sqrt{\frac{S_{горл}}{l_{горл} \cdot V_{70}}} = \frac{340}{2\pi} \sqrt{\frac{7,85 \cdot 10^{-5}}{6 \cdot 10^{-2} \times 1,42 \cdot 10^{-4}}} = 164 \text{ Гц}$$

Аналогічно знаходимо резонансу частоту резонаторного глушника зі стороною 140 мм. Опускаючи розрахунки, маємо $f_{p2} = 81 \text{ Гц}$.

2. Вимоги до фізичних та акустичних властивостей матеріалу внутрішнього покриття резонаторної плити.

Очевидно, що матеріал внутрішнього покриття резонаторної плити має відповідати таким вимогам: бути жаростійким,

міцним та мати високі звукопоглинальні та звукоізоляційні властивості. Всім вищевказаним вимогам відповідає віконне скло спеціальне. Його звукопоглинальні властивості наведені у **табл. 2** [2].

Таблиця 2

Коефіцієнт звукопоглинання віконного скла спеціального

Поглинач	КЗП залежно від частоти, Гц						
	125	250	500	1000	2000	4000	6000
Віконне скло спеціальне	0,15	0,17	0,40	0,35	0,33	0,20	0,15

Враховуючи отримані дані щодо резонаторних глушників і звукопоглинальних властивостей скла віконного спеціального, маємо такі частотні залежності

(рис. 5): залежність коефіцієнта звукопоглинання [2] глушників №1 і №2 і скла спеціального від частоти.

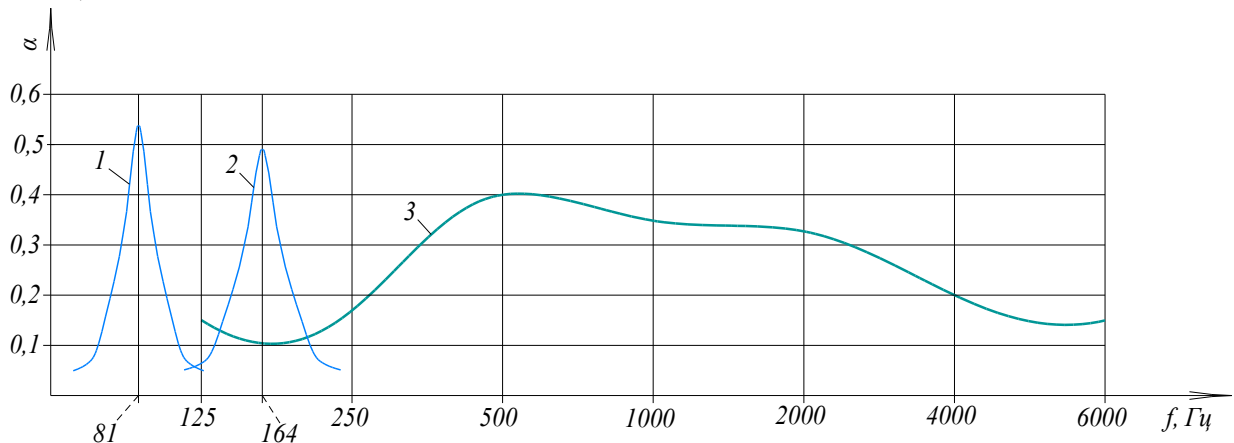


Рис. 5. Частотні характеристики складових комплексної резонансної плити:

- 1 – частотна характеристика резонаторного глушника № 1;
- 2 – частотна характеристика резонаторного глушника № 2;
- 3 – частотна характеристика скла спеціального

На **рис. 6** наведено частотозалежну ефективність розробленої резонаторної плити в цілому.

На **рис. 7** показана залежність рівня зовнішнього шуму бронеавтомобіля КраЗ «Фіона» від швидкості руху (у магістральному циклі на дорозі) з наявним корпусом та з корпусом, що покритий розробленою комплексною резонаторною плитою.

Висновки

Для зменшення рівня зовнішнього шуму бронеавтомобіля КраЗ «Фіона», що необхідно для поліпшення маскувальних властивостей останнього, було розроблено комплексну резонаторну плиту для покриття корпусу цього бронеавтомобіля.

Принцип дії розробленої комплексної резонаторної плити базується на використанні у її конструкції набору резонаторів із різними частотними характеристиками. Також для поліпшення ефекту звукопоглинання запропоновано внутрі-

шні стінки покривати склом із високими звукопоглинальними властивостями.

Завдяки застосуванню розробленої комплексної резонаторної плити прогнозується зменшення рівня зовнішнього

шуму броневих автомобіля КрАЗ «Фіона» на 3–6 дБА у діапазоні швидкостей руху 45–100 км/год.

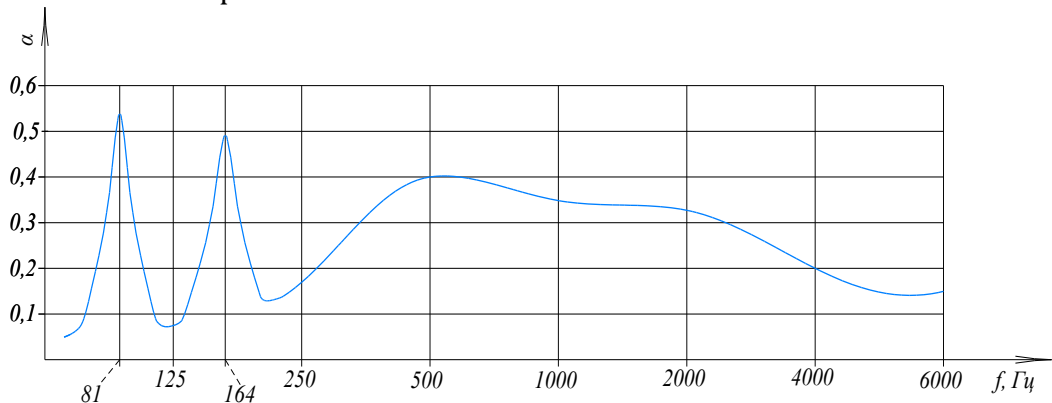


Рис. 6. Частотна характеристика комплексної резонаторної плити

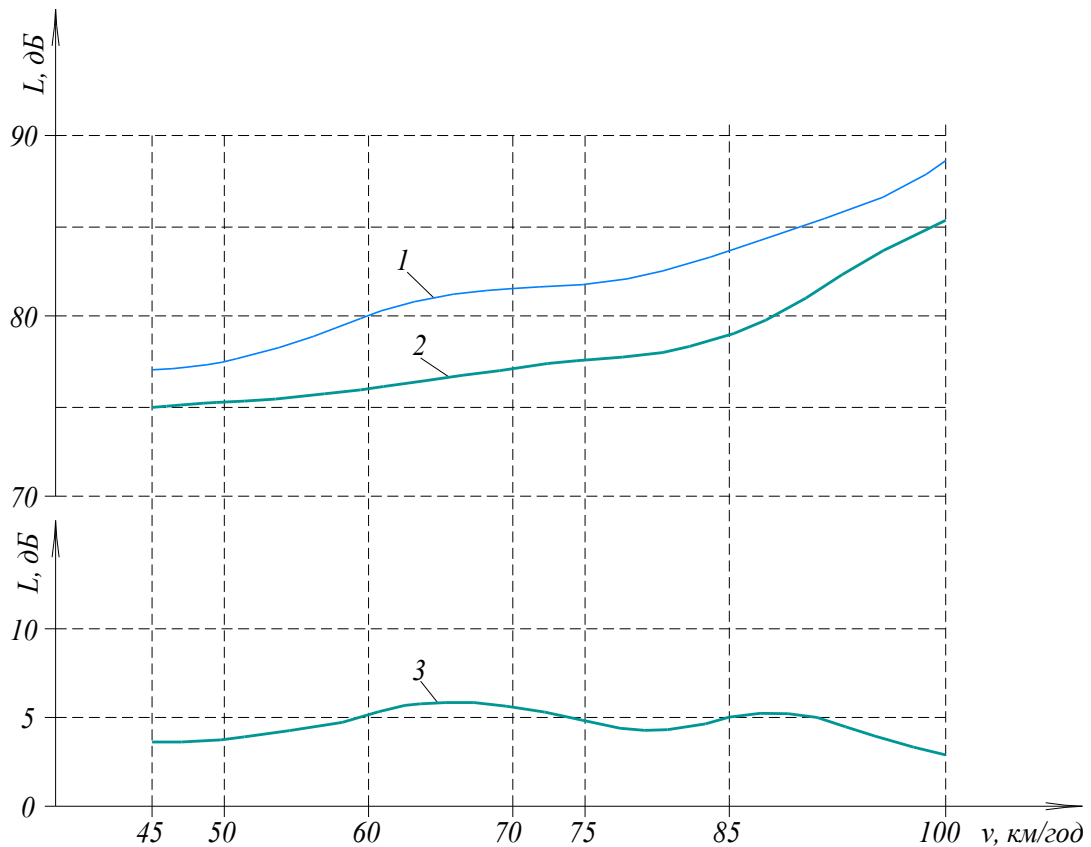


Рис. 7. Залежність рівня зовнішнього шуму броневих автомобіля «Фіона» від швидкості руху (в магістральному циклі на дорозі):

1 – з наявним корпусом; 2 – з корпусом, що покритий розробленою комплексною резонаторною плитою;

3 – ефективність розробленої комплексної резонаторної плити

References

1. Spetstechnoexport. (2026). KrAZ-Fiona. Tekhnichni kharakterystyky [KrAZ-Fiona. Technical specifications] Retrieved from <https://spetstechnoexport.com/uk/product/kraz-fiona>.

2. Fedorov V. V. (2008). Akustyka avtomobilya: Prynt [Car acoustics: Print]. Kyiv, 285. [in Ukrainian].

3. Fedorov, V. V., Filipova, G. A., Yanovsky, V. V. (2022). Rezonatorna plyta [Resonator plate]. Patent 151376, bulletin "Industrial Property", 28.

ISSN 0365-8392

DOI: 10.33868/0365-8392-2026-1-286-71-79

Дата першого надходження статті: 01.03.2026

Дата прийняття до друку: 15.03.2026

Дата публікації: 31.03.2026

