

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

УДК 656.216.2:[656.13:33.054.23]

М. Б. КУРГАН^{1*}, О. Ф. ЛУЖИЦЬКИЙ², Р. В. ІВАНОВ³, А. М. КУРГАН⁴

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

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

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

⁴ДП «Науково-конструкторське технологічне бюро колійного господарства Укрзалізниці», вул. Любарського, 181, Дніпро, Україна, 49034, тел. +38 (056) 373 15 48, ел. пошта kudl82@ukr.net, ORCID 0009-0005-2527-7502

Оцінка економічних втрат автотранспорту від непродуктивних простоїв на залізничних переїздах

Мета. Визначення економічних втрат від непродуктивних простоїв на залізничних переїздах вимагає комплексного підходу. Автори ставлять за мету розробити методику розрахунків економічних втрат автотранспорту від непродуктивних простоїв на залізничних переїздах з інтенсивним рухом транспортних засобів та запропонувати раціональні рішення щодо доцільності модернізації переїздів. **Методика.** У розрахунках економічних втрат автотранспорту від непродуктивних простоїв на залізничних переїздах беруть до уваги категорію переїзду, кількість поїздів і кількість транспортних засобів різних категорій, що перетинають переїзд упродовж доби, інші фактори, включені до автоматизованої системи «Переїзд». Методика враховує економічну вартість втрат часу пасажирів, що простоюють у легковому транспорті й автобусах перед закритим переїздом, а також економічну вартість простою вантажу залежно від типу вантажних автомобілів і роду перевезень. **Результати.** У ході дослідження автори встановили, на яких переїздах і за якої інтенсивності транспортних засобів спостерігаються найбільші економічні втрати від непродуктивних простоїв. Отримані результати враховують добову інтенсивність руху на переїзді: кількість поїздів і кількість транспортних засобів різних категорій, категорію переїздів та інші фактори. З'ясовано, як інтенсивність руху автотранспорту та залізничного транспорту, частота відкриття шлягбаумів, тривалість простою легкових автомобілів, автобусів, вантажних автомобілів впливають на витрати і вартість пального під час роботи двигунів на холостому ходу. Оцінено негативний вплив непродуктивних простоїв транспорту на довкілля. **Наукова новизна.** У роботі запропоновано методику оцінки економічних втрат автотранспорту від непродуктивних простоїв на залізничних переїздах із найбільш інтенсивним рухом. Оцінку економічних втрат автотранспорту проведено шляхом аналізу низки факторів, пов'язаних із транспортним потоком, тривалістю простоїв, витратами пального, втраченим часом, а також забрудненням довкілля. **Практична значимість.** Розроблена методика дає можливість оцінювати економічні втрати автотранспорту від непродуктивних простоїв на залізничних переїздах, що підтверджено прикладами з експлуатації переїздів на напрямках регіональної філії «Придніпровська залізниця».

Ключові слова: переїзд; транспортний потік; простій транспортного засобу; економічні втрати; інтенсивність руху; вплив транспорту на довкілля; автоматизована інформаційна система «Переїзд»

Вступ

Проблема непродуктивних простоїв автотранспорту на залізничних переїздах є актуальною для багатьох країн світу, зокрема і для України. Ці простої призводять до значних економічних

втрат, пов'язаних зі збільшенням витрат пального, зносом транспортних засобів, марнуванням часу водіїв та, як наслідок, зниженням їхньої продуктивності.

Для зведення цієї проблеми до мінімуму вживають певних заходів. Найкращі рішення –

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

перетин доріг через шляхопроводи та підземні переходи. Однак є велика кількість автомобільно-залізничних переїздів, які навряд чи будуть дворівневими, тому що їх реконструкція вимагає значних капіталовкладень.

Перетини залізниць і автодоріг в одному рівні (залізничні переїзди) слід сприймати як необхідність та вживати всіх доступних заходів, щоб зменшити негативні наслідки. Проблеми, пов'язані з наявністю залізничних переїздів, численні. На залізничних переїздах відбувається порушення безперервності руху автотранспорту, а в ряді випадків і залізничного транспорту, що призводить до підвищеного енергоспоживання, забруднення довкілля, втрат часу пасажирів та персоналу, збільшення часу залучення рухомого складу, зниження пропускної спроможності. До негативних наслідків також належать витрати на утримання залізничного переїзду та витрати, пов'язані з деякими інвестиційними проєктами [2].

Проблема розв'язки в одному рівні призводить до дорожньо-транспортних пригод із тяжкими наслідками, неефективного простою автомобілів у заторах та додаткових витрат залізниці. Для формування вартісної оцінки проєктних рішень враховують лише кошти на будівництво, а економічним втратам на державному рівні, як правило, не приділяють достатньо уваги.

Ця проблема потребує більш детального вивчення. Якщо фінансові і матеріально-технічні ресурси обмежені, то виникає питання, куди їх потрібно спрямувати, – на будівництво декількох шляхопроводів чи модернізацію декількох десятків переїздів, і які саме переїзди підлягають заміні.

Непродуктивні простої автотранспорту на залізничних переїздах призводять до значних економічних втрат, зниження ефективності транспортної системи та погіршення екологічної ситуації. Фактори, що впливають на величину втрат, такі:

- інтенсивність руху автотранспорту та залізничного транспорту: чим більший обсяг руху, тим частіше виникають ситуації, коли автомобілі змушені очікувати відкриття шлягбаума;
- частота відкриття шлягбаумів: тривалість очікування безпосередньо залежить від того, як часто відкривають шлягбаум для пропуску залізничного транспорту;

- тривалість простою одного автомобіля: середній час, який автомобіль витрачає на очікування, впливає на загальні втрати часу та пального;

- вартість пального та часу: ці показники визначають прямі економічні втрати від простою;

- непрямі витрати: додаткові витрати, пов'язані зі зносом транспортних засобів, підвищеним рівнем стресу водіїв та негативним впливом на довкілля.

Оцінку економічних втрат автотранспорту від непродуктивних простоїв на залізничних переїздах здійснюють шляхом аналізу низки факторів, пов'язаних із транспортним потоком, тривалістю простоїв, витратами пального, втраченим часом, а також забрудненням довкілля. Можливі такі шляхи зменшення економічних втрат:

- оптимізація роботи залізничних переїздів: установлення сучасних систем управління рухом, збільшення кількості переїздів, будівництво шляхопроводів або тунелів;

- розвиток альтернативних маршрутів: створення нових доріг та об'їзних шляхів для зменшення навантаження на залізничні переїзди;

- інформування водіїв: надання водіям актуальної інформації про стан дорожнього руху та можливі затори на залізничних переїздах;

- упровадження інтелектуальних транспортних систем: використання технологій, що дозволяють оптимізувати рух транспорту та мінімізувати простої.

Оцінка економічних втрат від непродуктивних простоїв на залізничних переїздах є складним завданням, яке вимагає комплексного підходу.

Сучасні дослідження у сфері вдосконалення залізничних переїздів демонструють багатовекторний підхід до дотримання їх безпечності та ефективності. Зокрема, значну увагу приділяють оптимізації часу роботи переїздів, автоматизації управління, використанню відновлюваних джерел енергії, інтелектуальних транспортних систем та оцінці ризиків. На прикладі Південної Африки запропоновано числовий підхід до регулювання графіків руху, що дозволяє зменшити затримки до 50 % за рахунок упровадження динамічного алгоритму управління переїздом [13]. Це має безпосередній вплив на економічні втрати автотранспорту, оскільки скорочення часу простою знижує витрати пального, втрати

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

часу водіїв та ризики запізнень у логістичних процесах.

У дотичному руслі перебуває модель оцінки ризику зіткнень на безлюдних переїздах із використанням штучного інтелекту [11]. Запропоноване поєднання статистичних методів дозволяє виявити конфігурації переїздів, що найбільше впливають на ризики, серед яких – обмежена оглядовість, кут перетину та стан покриття. Зниження частоти аварій опосередковано зменшує не лише втрати життя, а й тривалість перекриття переїзду, що важливо для оцінки непродуктивних втрат автотранспортних перевезень.

Актуальним є також підхід до моделювання добових затримок залежно від типу переїзду, інтенсивності руху та заходів безпеки. Дослідження з Флориди показало, що навіть після модернізації переїзди можуть залишатися «вузькими місцями» транспортної інфраструктури, особливо в умовах високого трафіку [10]. Така інформація є цінною для подальшого економічного моделювання втрат від простою, оскільки дозволяє проводити оцінку на основі локальних даних.

Ще одним підходом є використання мікросимуляцій у програмному середовищі VISSIM для оцінки впливу світлофорного регулювання поблизу переїздів. Було встановлено, що пріоритетне керування світлофорами значно зменшує утворення заторів у критичних точках дорожньої мережі [5]. Це дає підстави вважати, що технічні рішення, які навіть частково зменшують час затримки, мають відчутний економічний ефект – особливо в умовах міського середовища з високою щільністю руху.

Із технічної точки зору, надзвичайно перспективним є впровадження гібридного енергоживлення для систем автоматизації переїздів, як показано на прикладі Бангладеш [14]. Системи, що базуються на сонячній і вітровій енергії, забезпечують безперебійне живлення, що критично для уникнення збоїв, які спричиняють тривалі простої автотранспорту. Надійність роботи переїзду безпосередньо корелює з рівнем непродуктивних втрат – як у пальному, так і в часі.

Дослідження [8] присвячене оцінці втрат часу автотранспорту на залізничних переїздах у малозабезпечених районах Чикаго та аналізу ефективності нематеріальних заходів мінімізації цих простоїв. Із використанням транспортної

моделі INTEGRATION змодельовано п'ять сценаріїв, що відображають різний рівень доступу водіїв до оперативної інформації про закриття переїздів. Результати показали, що за відсутності інформування сукупні простої сягають 954 години за шість годин пікового навантаження, тоді як оновлення даних щохвилини дозволяє скоротити ці втрати на 750 годин. Водночас встановлено, що традиційні методи оцінки недооцінюють ці затримки на понад 70 %. Отримані дані свідчать про суттєві економічні втрати автотранспорту через непродуктивні простої та підтверджують доцільність впровадження цифрових інформаційних систем як ефективного заходу зменшення затримок без дорогих інфраструктурних рішень.

У ряді досліджень безпеку руху на залізничних переїздах визначено як один із ключових факторів, що впливає на загальну ефективність транспортної інфраструктури. Акцентовано увагу на тому, що порушення правил дорожнього руху, зниження технічної надійності засобів регулювання, а також недостатнє інженерне облаштування переїздів є основними причинами підвищеної аварійності. Запропоновано застосування різноманітних методів виявлення небезпечних ділянок, зокрема балів, коефіцієнтів аварійності, аналізу конфліктних ситуацій тощо. У контексті зростання інтенсивності руху підкреслено, що навіть без безпосереднього виникнення ДТП переїзди часто стають «вузькими місцями», які зумовлюють утворення заторів і вимушені зупинки автотранспорту. Такі прояви системної нестабільності створюють передумови до подальшого аналізу впливу простоїв на втрати часу й ресурсів, що особливо актуалізується в сучасних умовах зростання логістичних навантажень [3].

Стаття [7] присвячена формалізації економічної оцінки транспортних проєктів на основі аналізу витрат і вигод (СВА). Автори пропонують аналітичну модель, що враховує як грошові, так і часові складові узагальненої ціни транспорту, зосереджуючись на оцінці соціальних вигод від проєктів, зокрема економії часу. Розглянуто два підходи до СВА: на основі змін надлишків споживачів і виробників та через різницю між готовністю до сплати (WTP) і використаними ресурсами. Надано практичні рекомендації для

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

уникнення типових помилок: подвійного рахунку, некоректного застосування тіньових цін та ігнорування ринкових спотворень. Окрему увагу приділено ширшим економічним вигодам (WEBs), таким як агломераційні ефекти й податкові впливи, із застереженням щодо їх обмеженого використання. Стаття завершується емпіричним прикладом, що ілюструє еквівалентність різних методів оцінки за умови дотримання логічної послідовності.

У дослідженні [6] запропоновано метод динамічної просторово-часової сегментації дорожнього руху з використанням алгоритму geohash, що дозволяє з високою точністю виявляти нестабільні ділянки зниження швидкості, зокрема в зонах злиття/розгалуження та після ДТП. На основі даних тахографів вантажного транспорту проаналізовано понад 1 200 сегментів на автомагістралях Південної Кореї, із яких понад 900 виявлено як нестабільні. Методика враховує варіативність швидкості в кожному сегменті і дозволяє визначати зони ризику та впливу аварій у реальному часі. Попри орієнтацію на автомагістралі, підхід є релевантним і для виявлення зон непродуктивного простою на залізничних переїздах, де затримки автотранспорту можна кількісно оцінити для подальших економічних розрахунків.

У дослідженні [9] проаналізовано вплив залізничних переїздів на рівень викидів шкідливих речовин легковими автомобілями в умовах міського руху. Зокрема за допомогою портативної системи PEMS було оцінено різні сценарії проїзду через переїзд: без зупинки, із зупинкою з працюючим або вимкненим двигуном, а також за альтернативним маршрутом. Результати засвідчили, що навіть довший маршрут може забезпечити коротший час поїздки, якщо уникнути очікування на закритому переїзді, хоча екологічна ефективність залежить від режимів роботи двигуна, оскільки збільшення навантаження в разі об'їзду зумовлює вищі викиди CO, NO_x і HC. Зазначені висновки мають безпосередній зв'язок із темою оцінки економічних втрат автотранспорту від непродуктивних простоїв на залізничних переїздах, адже затримки не лише подовжують тривалість поїздки, але й спричиняють додаткові витрати пального та екологічне навантаження. Таким чином, дослідження підт-

верджує доцільність аналізу альтернативних маршрутів та впровадження систем інформування водіїв у режимі реального часу з метою зниження загальних втрат, пов'язаних із простоем автотранспорту на переїздах.

Узагальнюючи викладене, можемо стверджувати, що затримки на залізничних переїздах є джерелом значних економічних втрат. Їх мінімізація можлива завдяки впровадженню інноваційних рішень, гнучкому регулюванню руху та комплексному плануванню модернізації інфраструктури.

Мета

Автори дослідження мають на меті розрити методику оцінки економічних втрат автотранспорту від непродуктивних простоїв на залізничних переїздах з інтенсивним рухом транспортних засобів та запропонувати раціональні рішення щодо доцільності модернізації переїздів.

Методика

Оцінка втрат від простою на залізничних переїздах пасажирського й вантажного транспорту передбачає аналіз часу, витраченого на очікування, та його економічну вартість, що враховує середню кількість пасажирів у транспорті, середню тривалість простою, а також вартість часу пасажирів. На основі аналізу літературних даних [1, 12] наведено методику оцінки втрат від простою на залізничних переїздах транспортних засобів.

Основні етапи розрахунку передбачають збір вихідних даних та визначення інтенсивності руху автомобілів: кількість транспортних засобів, які проїжджають через переїзд протягом доби, поділена за категоріями (легкові, вантажні, автобуси).

Загальну кількість транспортних засобів $N_{\text{тз}}$ одиниць/добу наведено в паспорті переїзду автоматизованої інформаційної системи «Переїзд», із них автобуси $N_{\text{автоб}}$.

Оскільки в паспорті переїзду не зазначена кількість вантажних транспортних засобів, до в дослідженні взято:

$$N_{\text{вант}} = N_{\text{тз}} \cdot \delta,$$

де δ – відсоток вантажних автомобілів.

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

Кількість легкових автомобілів визначають як $N_{\text{легк}} = N_{\text{тз}} - N_{\text{автоб}} - N_{\text{вант}}$.

У паспорті також вказана середня кількість поїздів, що проходять через переїзд за добу, $N_{\text{поїздів}}$.

Пропонуємо таку послідовність розрахунків:

1. Кількість транспортних засобів, що простоюють на переїзді. Загальну кількість закриттів переїзду можна визначити за формулою:

$$N_{\text{закр}} = N_{\text{поїздів}} \cdot k_{\text{корег}} \quad (1)$$

У формулі (1) $k_{\text{корег}}$ – корегувальний коефіцієнт, що враховує характер руху поїздів. Якщо поїзди йдуть із фіксованим інтервалом, тоді кількість закриттів приблизно дорівнює кількості поїздів ($k_{\text{корег}} \approx 1$). Якщо кілька поїздів слідує групою, наприклад, 2–3 поїзди під час одного закриття, то коефіцієнт буде $k_{\text{корег}} < 1$.

Загальну тривалість закриття переїзду (год/добу) розраховують як:

$$T_{\text{закр}} = \frac{N_{\text{закр}} \cdot t_{\text{закр}}}{60}, \quad (2)$$

де $t_{\text{закр}}$ – середня тривалість закриття переїзду для проходження одного поїзда.

Відповідно до Інструкції з улаштування та експлуатації залізничних переїздів [4], шлагбаум автоматично піднімається після проходження поїзда та звільнення переїзду його хвостом. Це означає, що тривалість закриття безпосередньо пов'язана з часом, необхідним для повного проходження поїзда через переїзд. Середня тривалість закриття залізничного переїзду для проходження одного поїзда зазвичай становить від 3 до 5 хвилин. Цей час залежить від кількох факторів: швидкість і довжина поїзда, тип сигналізації та автоматизації, інтенсивність руху.

Кількість транспортних засобів, що простоюють на переїзді ($N_{\text{тз,пр}}$), визначають на основі інтенсивності руху транспорту через переїзд (один./добу) і загальної тривалості закриття переїзду (формула 2):

$$N_{\text{тз,пр}} = N_{\text{інтенс}} \cdot T_{\text{закр}} \cdot k_{\text{накопич}}, \quad (3)$$

де $N_{\text{інтенс}}$ – інтенсивність руху транспорту (один./год), $N_{\text{інтенс}} = \frac{N_{\text{тз}}}{24}$; $k_{\text{накопич}}$ – коефіцієнт накопичення транспорту (враховує нерівномірність підходу транспорту до переїзду, зазвичай $k_{\text{накопич}} = 1,2-1,5$).

Розподіл простою транспорту на переїзді, з формули (3) за типами транспортних засобів можна представити такими формулами:

– простий автобусів:

$$N_{\text{автоб,пр}} = \frac{N_{\text{тз,пр}} \cdot N_{\text{автоб}}}{N_{\text{тз}}};$$

– простий вантажних автомобілів:

$$N_{\text{вант,пр}} = \frac{N_{\text{тз,пр}} \cdot N_{\text{вант}}}{N_{\text{тз}}};$$

– простий легкового транспорту:

$$N_{\text{легк,пр}} = N_{\text{тз,пр}} - N_{\text{автоб,пр}} - N_{\text{вант,пр}}.$$

Простий транспорту на переїзді призводить до втрат, пов'язаних із простоєм пасажирів і вантажів, втратою пального під час роботи двигунів на холостому ходу і негативним впливом на навколишнє середовище.

2. Економічна оцінка втрат часу пасажирів. Кількість пасажирів, які простоюють, визначають як добуток кількості транспортних засобів та середньої кількості пасажирів у транспортному засобі:

$$N_{\text{прост}}^{\text{пас}} = N_{\text{легк,пр}} \cdot P_{\text{легк}} + N_{\text{автоб,пр}} \cdot P_{\text{автоб}},$$

де $N_{\text{легк}}^{\text{пас}}$, $N_{\text{автоб}}^{\text{пас}}$ – загальна кількість пасажирів, які простоюють відповідно в легковому транспорті та автобусах (осіб/добу); $P_{\text{легк}}$, $P_{\text{автоб}}$ – середня кількість пасажирів у транспортному засобі: для легкового автомобіля середнє завантаження – 1,5 пас./авто; для маршрутних транспортних засобів на базі «Ford Transit», «Mercedes Sprinter», «Рутаї» – 12–18 пасажирів, на базі «Богдан А092», «Еталон» – 20–30 пасажирів; для міських автобусів – 25–40 пас./автобус; для приміських автобусів – 30...50 пас./автобус.

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

Економічну вартість втрат пасажирів $B_{\text{пас}}$ (грн/рік), що простоюють у легковому транспорті й автобусах перед закритим переїздом, визначають за формулою:

$$B_{\text{пас}} = 365 \cdot N_{\text{прост}}^{\text{пас}} \cdot T_{\text{закр}} \cdot C_{\text{час}}, \quad (4)$$

де $C_{\text{час}}$ – вартість часу одного пасажирів (грн/год). За офіційними методиками Світового банку та Мінекономіки України, середня економічна вартість часу пасажирів може становити 50–60 грн.

3. *Середні витрати пального на холостому ходу.* Середні витрати палива на холостому ходу $C_{\text{пал}}$ (л/добу) можна розрахувати так:

$$C_{\text{пал}} = \left(\frac{N_{\text{легк,пр}} \cdot Q_{\text{легк}} + N_{\text{авт,пр}} \cdot Q_{\text{авт}}}{+ N_{\text{вант,пр}} \cdot Q_{\text{вант}}} \right) \cdot T_{\text{закр}},$$

де $Q_{\text{легк}}$, $Q_{\text{авт}}$ – витрати пального, що залежать від об'єму двигуна (для легкових автомобілів 0,8...1,5 л/год; для маршрутних 1,5...2,0 л/год; для автобусів 3...5 л/год); $Q_{\text{вант}}$ – середні витрати пального вантажного транспорту, що залежать від його типу, об'єму двигуна й типу пального (для малотоннажних вантажних засобів типу «Ford Transit», «Mercedes Sprinter», ГАЗель 1,5...2,5 л/год; для середньотоннажних (МАЗ, ЗІЛ, IVECO, DAF) середнього класу – 2,5...4,5 л/год; для великотоннажних вантажних автомобілів та фур (DAF XF, MAN TGX, «Scania», «Volvo FH») – 4,5...8,0 л/год).

Вартість витраченого пального від простою транспортних засобів (грн/рік) становить:

$$B_{\text{пал}} = 365 \cdot C_{\text{пал}} \cdot P_{\text{пал}}, \quad (5)$$

де $P_{\text{пал}}$ – ціна 1 літра пального. Станом на 1 лютого 2025 року середні ціни на пальне в Україні становлять: бензин А–95 – 56,86 грн/л, дизельне пальне – 55,13 грн/л, автомобільний газ (LPG) – 37,10 грн/л.

4. *Економічна вартість простою вантажу.* Цей параметр залежить від типу вантажу (швидкопсувний, промисловий тощо) і становить:

$$B_{\text{тов}} = 365 \cdot N_{\text{вант,пр}} \cdot q_{\text{сер}} \cdot T_{\text{закр}} \cdot P_{\text{тов}} \cdot \gamma_{\text{відс}}, \quad (6)$$

де $q_{\text{сер}}$ – середня маса вантажу, яку беруть залежно від типу вантажного транспорту і роду перевезень (середньотоннажний вантажний транспортр (від 3,5 до 12 т повної маси), типові моделі MAN TGL, «Iveco Eucargo», Богдан 5316, КрАЗ–5401Н2, корисне навантаження 2...6 т; важкий вантажний транспорт (від 12 до 40 т повної маси), типові моделі «Volvo FH», «Scania R-series», MAN TGX, DAF XF – корисне навантаження (18...24 т); $P_{\text{тов}}$ – орієнтовна вартість вантажів, грн/т (будматеріали (пісок, щебінь) – 400...1 000, аграрні вантажі – 5 000...8 000, нафтопродукти – 35 000...50 000, продукти харчування – 20 000...60 000); $\gamma_{\text{відс}}$ – економічні втрати від простою вантажного транспорту, залежать від типу вантажу, вартості вантажу за годину (будівельні матеріали – 0,1...0,5 %/год (для бетону 1...5 %/год); нафтопродукти – 0,2...1 %/год; аграрні вантажі – 0,5...2 %/год; харчові продукти – 2...5 %/год).

5. *Оцінка втрат від забруднення довкілля.* Вона базується на розрахунках викидів парникових газів (переважно CO_2) від автомобільного транспорту на холостому ходу, які спричиняють увімкнені двигуни під час очікування.

Середні викиди забруднювальних речовин від вантажних автомобілів на 1 літр дизельного пального залежать від класу екологічності двигуна. Оскільки на дорогах України більшість транспорту відповідає Euro 3 / Euro 4, наведемо середні викиди CO_2 , NO_x і $\text{PM}_{2.5}$ для цих класів, табл. 1.

Для порівняння, у багатьох європейських країнах ставки податку на викиди CO_2 значно вищі. Наприклад, у Швеції цей податок становить близько 137 доларів США за тону CO_2 , у Швейцарії – приблизно 99 доларів США за тону. Це відповідає діапазону від 1 500 до 3 500 грн за тону CO_2 (див. табл. 1). Такі високі ставки спрямовані на стимулювання зменшення викидів парникових газів та перехід до більш екологічно чистих технологій.

Таблиця 1

Середні викиди на 1 літр пального та екологічні податки на викиди

Table 1

Average emissions per liter of fuel and environmental taxes on emissions

Тип рухомого складу	CO ₂ (вуглекислий газ)	NO _x (оксиди азоту)	PM2.5 (тверді частки діаметром <2.5 мкм)
Легкові автомобілі ($k_{\text{легк}}$)	2,6...2,7 кг/л	2,0...5,0 г/л	0,02...0,05 г/л
Автобуси ($k_{\text{авт}}$)	2,6...2,7 кг/л	5,0...10,0 г/л	0,05...0,15 г/л
Вантажні автомобілі ($k_{\text{вант}}$)	2,6...2,7 кг/л	6,0...12,0 г/л	0,05...0,20 г/л
Світові екологічні тарифи (P)	1 500...3 500 грн/т	150...160 тис. грн/т	0,6...2,0 млн грн/т

Примітка:

CO₂ практично не змінюється між класами Еуро, оскільки прямо пропорційний витраті пального (~2,65 кг на 1 л).

NO_x суттєво знижується після Еуро 4 через упровадження систем EGR (рециркуляція вихлопних газів).

PM2.5 (тверді частки) у маршрутних та вантажних автомобілів значно вищі через відсутність DPF (сажових фільтрів) на більшості транспортних засобів класу Еуро 3 / Еуро 4.

Станом на 1 січня 2022 року в Україні ставка податку на викиди CO₂ дорівнювала 30 грн за тону CO₂, що еквівалентно приблизно 1 долару США. В Україні ставка залишається однією

з найнижчих у Європі. Поступове підвищення ставок в Україні може сприяти інтеграції до європейського ринку та наблизитися до міжнародних екологічних стандартів.

В Україні викиди оксидів азоту (NO_x) та дрібнодисперсних твердих частинок (PM2.5) є об'єктом моніторингу та регулювання, оскільки вони суттєво впливають на якість атмосферного повітря та здоров'я населення. На сьогодні не встановлено єдиної національної ставки податку або плати за викиди NO_x та PM2.5. Однак підприємства, що здійснюють викиди цих речовин, зобов'язані мати відповідні дозволи та дотримуватися встановлених нормативів гранично допустимих викидів.

Докладно зупинимося на розрахунку тільки викидів E_{CO_2} транспортними засобами, що простоюють на переїзді перед закритим шлягбаутом, і наведемо вартісну оцінку втрат від транспортних засобів за рік.

Розрахунок викидів E_{CO_2} :

$$E_{CO_2} = T_{\text{закр}} \cdot k_{CO_2} \left(N_{\text{легк,пр}} \cdot Q_{\text{легк}} + N_{\text{автоб,пр}} \cdot Q_{\text{автоб}} + N_{\text{вант,пр}} \cdot Q_{\text{вант}} \right)$$

Вартісна оцінка екологічних втрат від транспортних засобів:

$$B_{\text{екол}} = 365 \cdot E_{CO_2} \cdot P_{CO_2}, \quad (7)$$

де k_{CO_2} – середні викиди на 1 літр пального (табл. 1); P_{CO_2} – середня вартість компенсації за 1 тону викидів CO₂ (табл. 1).

Загальні втрати від простою транспортних засобів на залізничному переїзді визначають як суму всіх складових – формули (4–7):

$$B = B_{\text{пас}} + B_{\text{пал}} + B_{\text{тов}} + B_{\text{екол}}. \quad (8)$$

Результати

Наведемо приклади оцінки економічних втрат автотранспорту від непродуктивних простоя на декількох переїздах регіональної філії

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

«Придніпровська залізниця».

Приклад 1. Вихідні дані: кількість поїздів на добу $N_{\text{поїздів}} = 85$, кількість транспортних засобів $N_{\text{тз}} = 4\,234$, із них автобусів $N_{\text{автоб}} = 43$.

Кількість інших транспортних засобів наведена в табл. 2, а результати розрахунків представлено на рис. 2.

Таблиця 2

**Кількість транспортних засобів
для різних варіантів (приклад 1)**

Table 2

Number of vehicles for different options (example 1)

Тип транспорту	Відсоток вантажного транспорту, %		
	10	20	30
Вантажний ($N_{\text{вант}}$)	423	847	1 270

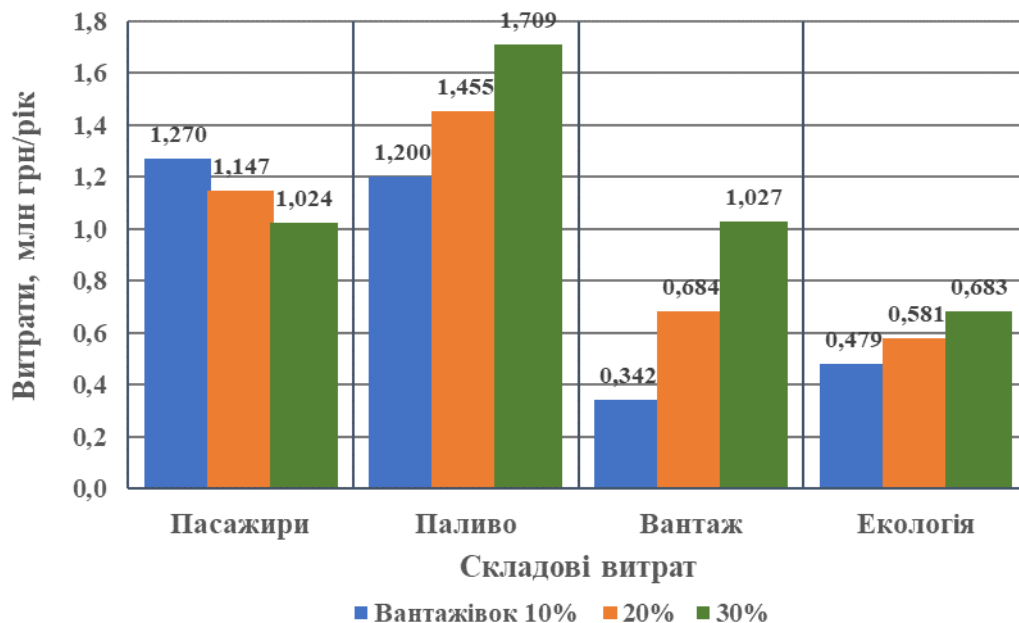


Рис. 1. Економічні втрати автотранспорту від непродуктивних простоїв на переїзді (П'ятихатки – Чаплине)

Fig. 1. Economic losses of motor transport due to unproductive downtime at the crossing (Pyatikhatky – Chaplyne)

Загальні втрати від простою транспортних засобів (формула 8) склали від 3,3 до 4,4 млн грн/рік залежно від кількості вантажних транспортних засобів. Найбільші втрати пов'язані з витратами пального (36,5–38,5 %). Витрати від простою пасажирів склали 38,6–23,2 %, простою вантажу 10,4–23,1 %, забрудненням навколишнього середовища 14,6–15,4 % від загальних втрат.

Приклад 2. Вихідні дані для переїзду з більш високою інтенсивністю руху: $N_{\text{поїздів}} = 134$, кількість транспортних засобів $N_{\text{тз}} = 10\,264$, із них автобусів $N_{\text{автоб}} = 937$. Кількість інших транспортних засобів наведена в табл. 3, а результати розрахунків представлено на рис. 2.

Таблиця 3

Кількість транспортних засобів для різних варіантів (приклад 2)

Table 3

Number of vehicles for different options (example 2)

Тип транспорту	Відсоток вантажного транспорту, %		
	10	20	30
Вантажний ($N_{\text{вант}}$)	1 026	2 053	3 079
Легковий ($N_{\text{легк}}$)	8 301	7 274	6 248

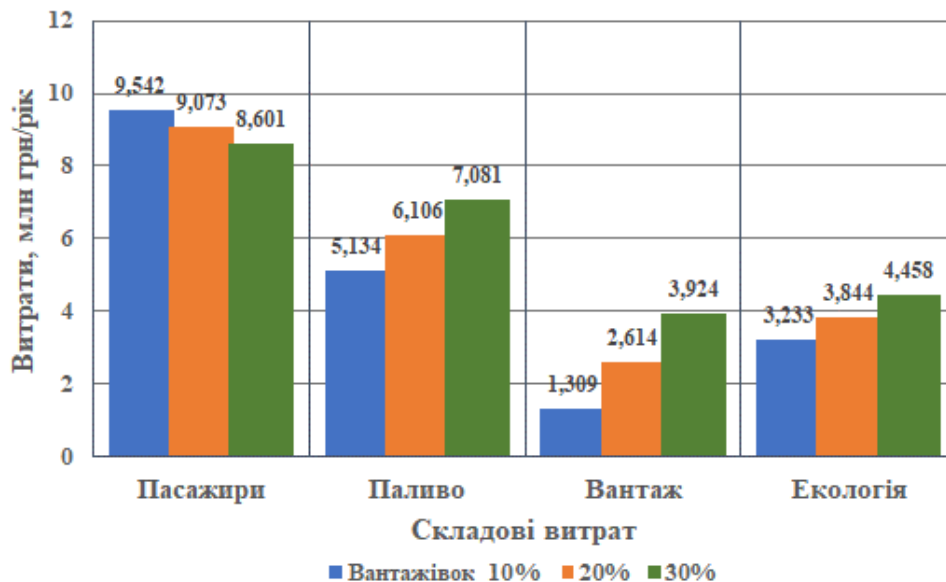


Рис. 2. Економічні втрати автотранспорту від непродуктивних простоїв на переїзді (Наумівка – Севастополь)

Fig. 2. Economic losses of motor transport due to unproductive downtime at the crossing (Naumivka – Sevastopol)

Для розглянутих прикладів загальні втрати від простою транспорту склали від 19,2 до 24,1 млн грн/рік залежно від кількості вантажних транспортних засобів. Найбільші втрати пов'язані з простоєм пасажирів (49,7...35,7 %) та витратами палива (26,7...29,4 %). Витрати від простою вантажу склали 6,8...16,3 %, від забруднення навколишнього середовища 16,8...18,5 % від загальних втрат.

Наукова новизна та практична значимість

Отримані результати базуються на застосуванні запропонованої методики оцінки економічних втрат автотранспорту від непродуктивних простоїв на залізничних переїздах. Алгоритм визначення економічних втрат автотранспорту передбачає урахування низки факторів, пов'яза-

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

них із транспортним потоком, тривалістю простоїв, витратами пального, втраченим пасажиром часом, а також забрудненням довкілля. Запропонована в роботі надає можливість оцінювати економічні втрати автотранспорту від непродуктивних простоїв на залізничних переїздах, що підтверджено прикладами з експлуатації переїздів на напрямках регіональної філії «Придніпровська залізниця».

На основі отриманих результатів можна мінімізувати втрати автотранспорту від непродуктивних простоїв завдяки впровадженню інноваційних рішень, гнучкому регулюванню руху транспортним потоком, комплексному плануванню й модернізації інфраструктури.

Висновки

Запропонована в роботі послідовність розрахунків дозволяє обґрунтовано оцінити втрати та прийняти раціональне рішення про доцільність модернізації переїзду.

На сьогодні в Україні не встановлено єдиної національної ставки податку або плати за викиди NO_x та PM_{2.5}, тому в наведених прикладах їх не враховано.

Економічні втрати від простоїв транспорту на залізничних переїздах (у прикладах від 3,3 до 24,1 млн грн/рік) можуть виступати вагомим аргументом для обґрунтування заміни таких переїздів шляхопроводами. Рішення про це має бути прийнято на основі комплексного аналізу всіх факторів: економічних, соціальних, екологічних та технічних.

Отримані результати демонструють значний потенціал для мінімізації втрат автотранспорту від непродуктивних простоїв. Упровадження запропонованих інноваційних рішень, гнучке регулювання транспортних потоків, комплексне планування та модернізація інфраструктури є ключовими факторами для досягнення цієї мети.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Берзіна С. В., Берзін В. М., Вакараш В. М., Ворфоломєєв А. В., Горопацький В. Г., Дюжилова Н. О., ... Ярьєвська І. І. *Системи екологічного управління: сучасні тенденції та міжнародні стандарти*. Київ : Інститут екологічного управління та збалансованого природокористування, 2017. 134 с.
2. Курган М. Б., Лужицький О. Ф., Іванов Р. В., Хмелевська Н. П., Хмелевський В. С. Упровадження інноваційних технологій під час модернізації наявних переїздів для організації швидкісного руху поїздів. *Наука та прогрес транспорту*. 2024. № 1 (105). С. 62–83. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2024/303191>
3. Трошин М. Ю., Шляхов К. В., Пишний М. С. Дослідження безпеки руху на залізничних переїздах. VI International Scientific and Practical Conference «RICERCHE SCIENTIFICHE E METODI DELLA LORO REALIZZAZIONE: ESPERIENZA MONDIALE E REALTÀ DOMESTICHE» (Bologna, 15 Nov. 2024). Bologna, 2024. SEZIONE 18. P. 194–199. DOI: <https://doi.org/10.36074/logos-15.11.2024.044>
4. ЦП-0174 Інструкція з улаштування та експлуатації залізничних переїздів. Київ : Верховна Рада України, 2007. 167 с. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0162-07#Text>
5. Anagnostopoulos A. Assessing Safety and Infrastructure Design at Railway Level Crossings Through Microsimulation Analysis. *Future Transportation*. 2025. Vol. 5. Iss. 1. P. 1–17. DOI: <https://doi.org/10.3390/futuretransp5010024>
6. Chong K. Spatiotemporal Influence Analysis Through Traffic Speed Pattern Analysis Using Spatial Classification. *Applied Sciences*. 2025. Vol. 15. P. 1–18. DOI: <https://doi.org/10.3390/app15010196>
7. de Rus G., Pilar Socorro M., Valido J., Campos J. Cost-benefit analysis of transport projects: Theoretical framework and practical rules. *Transport Policy*. 2022. Vol. 123. P. 25–39. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2022.04.008>
8. Kawamura K., Fazio J., Choobchian P. Reducing delays caused by at-grade rail crossings in disadvantaged communities through non-physical measures. *Transportation Research Procedia*. 2024. Vol. 79. P. 44–51. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2024.03.008>
9. Nowak M., Andrzejewski M., Tomaszewski S., Daszkiewicz P., Urbański P. Evaluation of Passenger Car Emission Indexes in Relation to Passing through the Rail-road Crossing. *Proceedings of the 7th International Conference on Vehicle Technology and Intelligent Transport Systems*. 2021. P. 579–583. DOI: <https://doi.org/10.5220/0010465305790583>

10. Pasha J., Dulebenets M. A., Singh P., Moses R., Sobanjo J., Ozguven E. E. Towards improving sustainability of rail transport by reducing traffic delays at level crossings: A case study for the State of Florida. *Cleaner Logistics and Supply Chain*. 2021. Vol. 1. P. 1–15. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.clscn.2021.100001>
11. Singhal V., Jain S. S., Anand D., Singh A., Verma S., Rodrigues J. J. P. C., J. ... Iwendi C. Artificial Intelligence Enabled Road Vehicle-Train Collision Risk Assessment Framework for Unmanned Railway Level Crossings. *IEEE Access*. Vol. 8. P. 113790–113806. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3002416>
12. Skabardonis A. *Highway Capacity Manual Methodologies for Corridors Involving Freeways and Surface Streets*. Washington, DC : The National Academies Press. 390 p. DOI: <https://doi.org/10.17226/25963>
13. Tshaai D.C., Mishra A.K., Pidanic J. Demonstration of Smart Railway Level Crossing Design and Validation Using Data from Metro Rail, South Africa. *Journal of Advanced Transportation*. 2022. Vol. 2022. P. 1–10. DOI: <https://doi.org/10.1155/2022/6614242>
14. Ul Islam Z., Hossain Lipu M. S., Karim T. F., Fuad A. M., Ali M. M. N., Shihavuddin A., Al Mansur A. Optimizing hybrid renewable energy based automated railway level crossing in Bangladesh: Techno-economic, emission and sensitivity analysis. *Energy Conversion and Management: X*. Vol. 24. P. 1–21. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2024.100744>

M. B. KURHAN^{1*}, O. F. LUZHYTSKYI², R. V. IVANOV³, A. M. KURHAN⁴

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

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

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

⁴SE «Scientific and Design Technological Bureau of Track Facilities Ukrzaliznytsia», Lyubarskogo St, 181, Dnipro, Ukraine, 49034, tel. +38 (056) 373 15 48, e-mail kudl82@ukr.net, ORCID 0009-0005-2527-7502

Assessment of Economic Losses of Road Transport Due to Unproductive Downtime at Railway Crossings

Purpose. Determining economic losses from unproductive downtime at railroad crossings requires a comprehensive approach. The authors aim to develop a methodology for calculating the economic losses of motor vehicles from unproductive downtime at railroad crossings with heavy traffic and to propose rational solutions regarding the feasibility of modernizing crossings. **Methodology.** The calculations of economic losses incurred by motor vehicles due to unproductive downtime at railroad crossings take into account the category of the crossing, the number of trains and the number of vehicles of different categories crossing the crossing during the day, as well as other factors included in the automated system «Pereizd» («Crossing»). The methodology takes into account the economic cost of time lost by passengers waiting in cars and buses in front of a closed crossing, as well as the economic cost of cargo downtime depending on the type of trucks and the type of transportation. **Findings.** During the study, the authors determined at which crossings and at what intensity of traffic the greatest economic losses from unproductive downtime are observed. The results obtained take into account the daily traffic intensity at the crossing: the number of trains and the number of vehicles of various categories, the category of crossings, and other factors. It was found out how the intensity of motor vehicle and rail transport, the frequency of opening barriers, and the duration of downtime for cars, buses, and trucks affect the costs and fuel consumption when engines are idling. The negative impact of unproductive downtime on the environment was assessed. **Originality.** The paper proposes a methodology for assessing the economic losses of motor vehicles from unproductive downtime at the busiest railroad crossings. The economic losses of motor vehicles are assessed by analyzing a number of factors related to traffic flow, downtime, fuel consumption, lost time, and environmental pollution. **Practical value.** The developed method makes it possible to estimate the economic losses of motor vehicles from unproductive downtime at railroad crossings, which is confirmed by examples from the operation of crossings on the routes of the regional branch «Prydniprovskaya Railway».

Keywords: crossing; traffic flow; vehicle downtime; economic losses; traffic intensity; impact of transport on the environment; automated information system «Pereizd»

REFERENCES

1. Berzina, S. V., Berzin, V. M., Vakarash, V. M., Vorfolomeyev, A. V., Goropaczkyj, V. G., Dyuzhylova, N. O., ... & Yareskovska, I. I. (2017). *Systemy ekologichnogo upravlinnya: suchasni tendenciyi ta mizhnarodni standarty*. Kyiv: Instytut ekologichnogo upravlinnya ta zbalansovanogo pryrodokorystuvannya. (in Ukrainian)
2. Kurhan, M. B., Luzhytskyi, O. F., Ivanov, R. V., & Khmelevskyi, V. S. (2024). Implementation of Innovative Technologies During the Modernization of Existing Level Crossings for High-Speed Train Traffic. *Science and Transport Progress*, 1(105), 62-83. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2024/303191> (in Ukrainian)
3. Troshyn, M. Yu., Shlyakhov, K. V., & Pyshnyy, M. S. (2024, Nov.). Doslidzhennya bezpeky rukhu na zaliznychnykh pereyizdakh. In *VI International Scientific and Practical Conference «RICERCHE SCIENTIFICHE E METODI DELLA LORO REALIZZAZIONE: ESPERIENZA MONDIALE E REALTÀ DOMESTICHE»* (SEZIONE 18, pp. 194-199). Bologna, Italy. DOI: <https://doi.org/10.36074/logos-15.11.2024.044> (in Ukrainian)
4. *CzP-0174 Instrukciya z ulashtuvannya ta ekspluataciyi zalizny`chny`x pereyizdiv*. Kyiv: Verkhovna Rada of Ukraine. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0162-07#Text> (in Ukrainian)
5. Anagnostopoulos, A. (2025). Assessing Safety and Infrastructure Design at Railway Level Crossings Through Microsimulation Analysis. *Future Transportation*, 5(1), 1-17. DOI: <https://doi.org/10.3390/futuretransp5010024> (in English)
6. Chong, K. (2025). Spatiotemporal Influence Analysis Through Traffic Speed Pattern Analysis Using Spatial Classification. *Applied Sciences*, 15, 1-18. DOI: <https://doi.org/10.3390/app15010196> (in English)
7. de Rus, G., Socorro, M. P., Valido, J., & Campos, J. (2022). Cost-benefit analysis of transport projects: Theoretical framework and practical rules. *Transport Policy*, 123, 25-39. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2022.04.008> (in English)
8. Kawamura, K., Fazio, J., & Choobchian, P. (2024). Reducing delays caused by at-grade rail crossings in disadvantaged communities through non-physical measures. *Transportation Research Procedia*, 79, 44-51. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2024.03.008> (in English)
9. Nowak, M., Andrzejewski, M., Tomaszewski, S., Daszkiewicz, P., & Urbański, P. (2021). Evaluation of Passenger Car Emission Indexes in Relation to Passing through the Rail-road Crossing. *Proceedings of the 7th International Conference on Vehicle Technology and Intelligent Transport Systems*, 579-583. DOI: <https://doi.org/10.5220/0010465305790583> (in English)
10. Pasha, J., Dulebenets, M. A., Singh, P., Moses, R., Sobanjo, J., & Ozguven, E. E. (2021). Towards improving sustainability of rail transport by reducing traffic delays at level crossings: A case study for the State of Florida. *Cleaner Logistics and Supply Chain*, 1, 1-15. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.clscn.2021.100001> (in English)
11. Singhal, V., Jain, S. S., Anand, D., Singh, A., Verma, S., Rodrigues, J. J. P. C., ... & Iwendi, C. (2020). Artificial Intelligence Enabled Road Vehicle-Train Collision Risk Assessment Framework for Unmanned Railway Level Crossings. *IEEE Access*, 8, 113790-113806. DOI: <https://doi.org/10.1109/access.2020.3002416> (in English)
12. Skabardonis, A. (2020). *Highway Capacity Manual Methodologies for Corridors Involving Freeways and Surface Streets*. Washington, DC: The National Academies Press. DOI: <https://doi.org/10.17226/25963> (in English)
13. Tshaai, D. C., Mishra, A. K., & Pidanic, Jan. (2022). Demonstration of Smart Railway Level Crossing Design and Validation Using Data from Metro Rail, South Africa. *Journal of Advanced Transportation*, 2022, 1-10. DOI: <https://doi.org/10.1155/2022/6614242> (in English)
14. Ul Islam, Z., Hossain Lipu, M. S., Karim, T. F., Fuad, A. M., Ali, M. M. N., Shihavuddin, A., & Al Mansur, A. (2024). Optimizing hybrid renewable energy based automated railway level crossing in Bangladesh: Techno-economic, emission and sensitivity analysis. *Energy Conversion and Management: X*, 24, 1-21. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2024.100744> (in English)

Надійшла до редколегії: 04.02.2025

Прийнята до друку: 11.06.2025