

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

УДК 656.216.2-048.35

М. Б. КУРГАН¹, А. М. КУРГАН², О. Ф. ЛУЖИЦЬКИЙ^{3*}, Р. В. ІВАНОВ⁴,
Н. П. ХМЕЛЕВСЬКА⁵

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

²Дніпропетровське науково-конструкторське технологічне бюро колійного господарства» філії «НДКТІ» АТ «Укрзалізниця», тел. +38 (056) 373 15 48, ел. пошта kudl82@ukr.net, ORCID 0009-0005-2527-7502

^{3*}Каф. «Транспортна інфраструктура», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 48, ел. пошта oleg.luzhickii@gmail.com, ORCID 0000-0001-6519-7447

⁴Каф. «Транспортна інфраструктура», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 48, ел. пошта ivanovrodion@ukr.net, ORCID 0009-0005-9125-9468

⁵Каф. «Транспортна інфраструктура», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 48, ел. пошта hmelevnela@gmail.com, ORCID 0000-0002-2360-8671

Модернізація наявних переїздів на напрямках будівництва в Україні залізничної колії європейського стандарту

Мета. У статті передбачено проаналізувати сучасні технологічні рішення для підвищення рівня безпеки на залізничних переїздах, запобігання аварійним ситуаціям та забезпечення безперебійного руху транспорту. **Методика.** Дослідження базується на застосуванні математичного моделювання та чисельних методів для аналізу впливу модернізації та нових проєктів на рівень безпеки залізничних переїздів. За допомогою комп'ютерного моделювання побудовано математичні моделі, які відображають різні сценарії функціонування переїздів. На основі отриманих даних проведено оцінку ефективності запропонованих заходів та розроблено рекомендації щодо подальшої оптимізації системи безпеки. Для оцінки ефективності запропонованих заходів розроблено систему показників, що дозволяють кількісно оцінити рівень безпеки залізничних переїздів до та після модернізації. Ці показники враховують в себе добову інтенсивність руху поїздів через переїзд, добову інтенсивність руху транспорту на автомобільній дорозі, устаткування переїзду, радіус кривої у плані та поздовжній ухил автомобільної дороги на підходах до переїзду. **Результати.** Запропоновано вдосконалення методу підсумкового коефіцієнта аварійності, який є одним із поширених інструментів для оцінки безпеки руху на залізничних переїздах. Застосування цього методу дозволило кількісно оцінити рівень ризику виникнення аварійних ситуацій та проаналізувати ефективність заходів, спрямованих на підвищення безпеки. Метод відносно простий у застосуванні та не вимагає складних математичних обчислень, дозволяє врахувати широкий спектр факторів, що впливають на безпеку руху на переїзді, таких як інтенсивність руху, конструктивні особливості переїзду, наявність сигналізації тощо. За допомогою підсумкового коефіцієнта проведено порівняння рівня безпеки різних переїздів та відстежено динаміку змін їхнього устаткування в часі. Це дозволило визначити переїзди, які потребують першочергової модернізації, а також прогнозувати зміни у вихідних і розрахункових даних та планувати заходи з впровадження інноваційних технологій, що підвищують безпеку руху на переїздах. **Наукова новизна.** Розроблено інтегровану модель оцінки безпеки залізничних переїздів, яка враховує не лише традиційні показники (частота аварій, інтенсивність руху), але й нові фактори, такі як надійність обладнання, людський фактор та вплив зовнішніх умов. Запропонована модель дозволяє визначити більш точний прогноз ризиків та обирати оптимальні рішення щодо модернізації переїздів з урахуванням конкретних умов експлуатації. **Практична значимість.** Сформульовані рекомендації можуть бути використані

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

для розробки ефективних програм модернізації залізничних переїздів в Україні. Упровадження запропонованих технологій дозволить підвищити рівень безпеки руху на 20 % та зменшити середній час очікування на переїзді на 15 %. Крім того, це сприятиме підвищенню пропускної спроможності залізниць та зниженню витрат на утримання інфраструктури.

Ключові слова: залізничний переїзд; інтероперабельність; модернізація; суміщена колія; безпека дорожнього руху

Вступ

Залізничні переїзди становлять ключову проблему для дослідників та практиків у галузі безпеки дорожнього руху та залізничного транспорту. Незважаючи на те, що проблема дорожньо-транспортних пригод на залізничних переїздах не є новою, у всьому світі тривають дослідження та аналіз статистики в цій галузі.

Забезпечення мобільного руху поїздів, перш за все з країн ЄС, є актуальним завданням для України. Європейська комісія та Європейський інвестиційний банк розробили стратегію з інтеграції залізничних мереж України, Молдови та Євросоюзу [1]. Передбачено, що нова магістральна мережа колії 1 435 мм працюватиме паралельно з наявних – 1 520 мм. Нову використовуватимуть для міжнародних пасажирських поїздів, Інтерсіті, перевезення вантажів у контейнерах чи на платформах. Надалі можливе розширення залізничної мережі 1 435 мм до таких великих українських міст, як Запоріжжя, Херсон, Миколаїв, Маріуполь, Донецьк, Луганськ та Севастополь (чотири останніх перебувають під тимчасовою окупацією).

У цій роботі розглянуто питання будівництва переїздів на ділянках як нової траси європейської колії 1 435 мм, так і реконструкції окремих напрямків під євростандарт з застосуванням суміщеної колії (1 435/1 520 мм).

У США та Канаді для оцінки ризиків на залізничних переїздах використовують декілька різних моделей. Найпоширеніші з них:

- ALCAM (As Low As Can Be As Reasonably Achievable);
- Haddon Matrix;
- Level Crossing Risk Assessment Model (LCRAM).

Для захисту залізничних переїздів спеціалізована компанія ALTPRO (Німеччина) широко впроваджує електронну систему RLC23. Цю систему використовують для підвищення безпеки

на залізничних переїздах шляхом автоматичного керування шлагбаумами, світлофорами та іншими попереджувальними сигналами.

Питання оцінки безпеки руху транспортних засобів на перетині автомобільних доріг і залізниць на одному рівні й підвищення ефективності роботи залізничних переїздів розглянуто в роботі авторів [3].

На засіданні Австралійської транспортної ради (ATC) у травні 2003 року був прийнятий інноваційний метод оцінки ризиків. Наразі у всіх австралійських штатах і в Новій Зеландії застосовують дорожню модель ALCAM (As Low As Can Be As Reasonably Achievable), яка складається з трьох окремих компонентів: моделі інфраструктури, моделі експозиції та моделі наслідків. У поєднанні ці три компоненти утворюють унікальний показник ризику для кожного переїзду [16].

Представляють інтерес напрацювання Групи експертів з підвищення безпеки на залізничних переїздах в країнах-членах ЄЕК ООН та інших обраних країнах [7], що пов'язано з відсутністю уніфікованих визначень і методів. Показано, що технічні рішення мають обмежене застосування через фінансову неможливість заміни всіх переїздів естакадними або підземними переходами чи встановлення сучасного обладнання з метою попередження або виявлення небезпеки, коли до переїзду наближається поїзд.

До аналогічного висновку дійшли автори в роботі [14]. За допомогою анкет та візуального огляду вони визначили ризики безпеки та небезпечні події на деяких залізничних переїздах транзитного маршруту, які були класифіковані на основі принципу ALARP (As Low As Reasonably Practicable) та загальної матриці рейтингу ризиків. Результати дослідження показали, що близько 22 % небезпек, визначених за категоріями, пов'язані з людськими факторами, тоді як 20 % викликані технічними.

ALCAM і ALARP – це два підходи до визначення та управління ризиками, які використовують

для зниження кількості аварій на залізничних переїздах та підвищення рівня безпеки. Основні відмінності між ними наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Ключові відмінності двох підходів до визначення й управління ризиками

Table 1

Key differences between two approaches to risk identification and management

Характеристика	ALCAM	ALARP
Рівень прийнятного ризику	Прагне до найнижчого можливого ризику, незалежно від витрат	Допускає вищий рівень ризику, якщо його неможливо знизити за розумною ціною
Зосередження під час оцінки та управління ризиками	Зосереджується на технічних заходах для зниження ризику	Враховує як технічні, так і економічні фактори під час прийняття рішень щодо ризику
Процес прийняття рішень	Ґрунтується на об'єктивних даних та аналізі	Використовує більш суб'єктивний підхід, який враховує думки та цінності зацікавлених сторін

На залізничних переїздах Нової Зеландії спочатку застосовували австралійську модель оцінки аварійних переїздів ALCAM. Але й вона має свої обмеження, якщо її використовувати окремо. ALCAM недостатньо детально враховує вплив на безпеку, яку створює навколишня транспортна мережа [17]. Із врахуванням цього в Новій Зеландії запроваджено нову систему оцінки ризику – модель LCSS [10], у якій для отримання об'єктивної інформації про залізничні переїзди розглянуто три додаткові показники, пов'язані з ризиком аварій: історичні дані про аварії та інциденти, спостереження з безпеки руху, а також оцінку впливу наявної схеми залізничного переїзду та її взаємодію з навколишньою транспортною мережею. Такий підхід допомагає визначити, чи потрібно оновлювати наявні залізничні переїзди.

У статті [9] розглянуто питання, пов'язані із дотриманням безпеки руху великовантажних транспортних засобів на залізничних переїздах Австралії. Результати показали, що такі фактори, як рівень обслуговування транспортного потоку, частка великовантажних транспортних засобів та відстань від залізничних переїздів до найближчого перехрестя пов'язані з підвищеним ризиком, коли великовантажний транспор-

тний засіб бере участь у зіткненнях на залізничних переїздах.

У роботі [7] розглянуто залізничні переїзди в Боснії та Герцеговині. Сформовано п'ятнадцять різних показників, які були поділені на три групи: критерії безпеки, характеристики експлуатації автомобільних доріг та характеристики експлуатації залізниць. Для визначення критеріїв значущості була сформована нова інтегрована нечітка модель FUCOM. Результати показали, що переїзди LC4 і LC8 є найбільш безпечними за всіма 15 критеріями. Автори запропонували заходи щодо забезпечення стійкої роботи залізничної системи.

Щоб зменшити частоту аварій та тяжкість травм, розглянуто моделі, які часто використовують для автомобільної та залізничної мережі [9]. Порівняння моделей виконано з урахуванням основних характеристик залізниці, які впливають на ймовірність ДТП на переїздах (швидкість поїзда, кількість залізничних колій і їхній стан, кількість поїздів за добу, геометричні дані залізниці, помітність поїзда тощо); дорожніх факторів (стан дорожнього полотна, геометричні параметри автодороги, тип транспортного засобу, інтенсивність дорожнього руху, кількість смуг, тип і ширина дорожнього покриття, освіт-

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

леність тощо); факторів навколишнього середовища (погодні умови, умови освітлення, час доби та пора року); людських чинників (стать, вік, рівень кваліфікації й реакції водія).

Зіткнення учасників дорожнього руху і поїздів на залізничних переїздах (RLX) залишаються нерозв'язною проблемою. Автори [13] на основі досліджень, опублікованих із 1989 по 2019 рік, запропонували класифікацію за такими факторами: частота і тяжкість аварій (1); небезпечна та невідповідна поведінка учасників дорожнього руху (2); сприйняття ризику, ставлення та переконання учасників дорожнього руху (3). Установлено, що більшість факторів, виявлених під час досліджень, стосуються фізичних характеристик самого переїзду, його функціонування, а також поведінки та характеристик учасників дорожнього руху. Було виявлено, що взаємодіям між факторами приділено недостатньо уваги. На додаток до людських і соціальних витрат ці події тягнуть за собою істотні економічні збитки.

Переїзди стали пріоритетною темою для Управління залізниць і доріг (ORR) Великобританії. У роботі [12] зазначено, що на більш ніж 7 000 залізничних переїздів у Великобританії не існує універсального підходу до безпеки, кожен залізничний переїзд є унікальним, а тому слід упроваджувати інновації, що підвищують безпеку залізничних переїздів. Принципи ORR з управління безпекою залізничних переїздів покликані допомогти знизити ризики шляхом розгляду альтернатив залізничним переїздам, а там, де це практично неможливо – шляхом проєктування реконструкції залізничних переїздів.

У документі [15] подано базу даних «країн ERA», яка містить інформацію про залізничні переїзди за десять років. Показано, що технічні рішення мають обмежене застосування і рекомендовано для поліпшення інформування про наближення поїздів водіїв автотранспортних засобів використовувати технологію GPS.

В Україні в рамках системи АІС «Переїзд» використовують комбінований підхід до визначення та управління ризиками на залізничних переїздах, який поєднує елементи ALCAM та ALARP.

Короткий огляд наукових праць мав на меті визначити основні фактори і їхній вплив на ризики, що мають місце в багатьох країнах під час

вирішення проблем безпеки на залізничних переїздах, також розглянути заходи з модернізації наявних переїздів на напрямках будівництва в Україні залізничної колії європейського стандарту.

Мета

У роботі передбачено провести аналіз сучасних технологічних рішень для підвищення рівня безпеки на залізничних переїздах, запобігання аварійним ситуаціям та забезпечення безперервного руху транспорту.

Методика

Постає питання щодо збігу категорій переїздів на залізницях європейських країн та України. Категорії переїздів LC1–LC5 були введені в 1976 році в рамках Директиви Ради Європейських співтовариств 76/581/ЄЕС про встановлення єдиних технічних вимог до будівництва та експлуатаційних вимог до переїздів на залізницях.

Директива 76/581/ЄЕС була замінена Директивою Ради Європейських співтовариств 2008/57/ЄС, яка відома також як «Директива про інтероперабельність систем залізничного транспорту в Спільноті». Ця директива встановлює правила та стандарти для забезпечення інтероперабельності на залізничному транспорті в Європейському Союзі, включаючи стандарти безпеки для залізничних переїздів.

Європейська класифікація переїздів містить кілька класів, які вказують на різні рівні безпеки та технічної складності. До основних класів належать:

LC1 – цей клас вказує на переїзди з найнижчим рівнем безпеки. Вони можуть бути простими без будь-яких додаткових безпекових заходів, таких як бар'єри чи світлофори. Такі переїзди потребують особливої обережності з боку водіїв та пасажирів;

LC2 – цей клас вказує на переїзди з певними додатковими безпековими заходами, такими як світлофори, додаткові сигнальні пристрої або бар'єри. Вони забезпечують вищий рівень безпеки, аніж LC1, але все ще можуть вимагати обережності з боку водіїв;

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

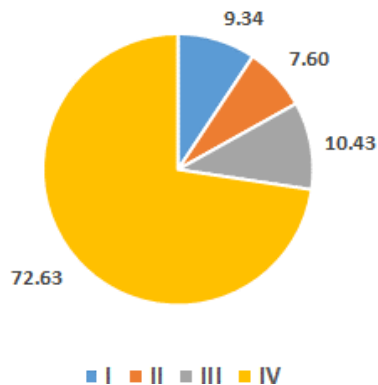


Рис. 1. Категорійність переїздів на залізницях України (%)

Fig. 1. Categorization of railway crossings in Ukraine (%)

LC3–LC8 – ці класи вказують на переїзди з більш високим рівнем безпеки. Вони зазвичай мають кілька ступенів безпекових заходів, включаючи бар'єри, світлофори, звукові та візуальні сигнали, а також системи автоматичного зупинення поїздів. Ці переїзди є найбільш безпечними та надійними для перетину залізничних колій.

В Україні категорії переїздів та їх характеристики визначають «Правила технічної експлуатації залізничного транспорту України», а також «Інструкція з улаштування та експлуатації залізничних переїздів» (ЦП-0174) [5].

Залізничні переїзди на мережі залізниць України поділяють на чотири різні категорії, кожна з яких є унікальною в разі оцінки ризику перетину (рис. 1). Фактори, які взято до уваги, включають частоту руху поїздів, частоту руху і типи користувачів, а також середовище, у якому розташовані переходи.

Інструкція з безпеки руху по залізницях визначає технічні вимоги та стандарти щодо обладнання переїздів, за різними категоріями та характеристиками. Ці документи розроблені для забезпечення безпеки руху по залізницях та визначення стандартів для всіх елементів інфраструктури, зокрема і переїздів.

Категорії переїздів визначають за характером та інтенсивністю руху поїздів, транспортних засобів у місці перетину із залізницею та умовами видимості (табл. 2).

Таблиця 2

Категорії залізничних переїздів загального користування

Table 2

Categories of public railway crossings

Інтенсивність руху поїздів по головній колії сумарно в 2-х напрямках, поїздів/добу	Інтенсивність руху транспортних засобів, авт./добу				
	До 200 включно	201 – 1 000	1 001 – 3 000	3 001 – 7 000	Понад 7 000
До 16 включно, так само по всіх станційних і під'їзних коліях	IV	IV	IV	III	II
17 – 100	IV	IV	III	II	I
101 – 200	IV	III	II	I	I
Понад 200	III	II	II	I	I

До переїздів загального користування I категорії належать також переїзди, розташовані на перетинах залізничних колій, де поїзди рухаються зі швидкістю 140 км/год і більше незалежно від інтенсивності руху транспортних засобів на автомобільній дорозі.

Сьогодні в підпорядкуванні АТ «Укрзалізниця» перебуває 4 945 залізничних переїздів, із

яких 2 343 – з автобусним рухом; 1 290 – із черговим працівником; 1 262 – обладнані пристроями автоматики, у тому числі 383 переїзди обладнані чотирма шлагбаумами, які забезпечують разом з основними шлагбаумами повне перекриття проїжджої частини автодороги (рис. 2).

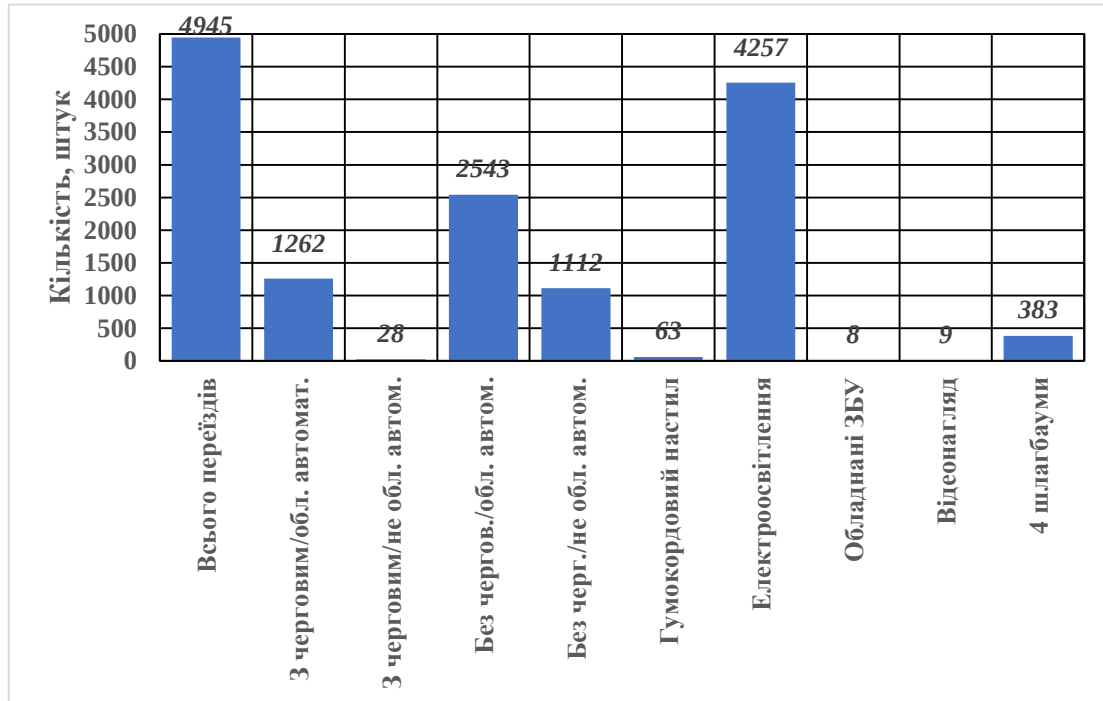


Рис. 2. Технічне оснащення переїздів на залізницях України

Fig. 2. Technical equipment of railway crossings in Ukraine

Майже половина всіх переїздів розташована на маршрутах основних пасажирських перевезень. Тому постає проблема утримання й обслуговування місць перетину залізниці й автодороги, а з урахуванням переходу на європейську або суміщену колію постає питання щодо будівництва нових чи реконструкції наявних залізничних переїздів.

Серед підходів, що усувають або суттєво зменшують аварії на залізничних переїздах, можна виділити такі: управління ризиками, технології та інновації, управління компетенціями, освіта та правозастосування. Для оцінки безпеки руху залізничного транспорту та автотранспортних засобів у зоні залізничних переїздів використовуємо метод підсумкового коефіцієнта аварійності, який дає змогу оцінити стан безпеки в результаті проведеної модернізації чи нових

проектних рішень [4]. Величину K_a для залізничного переїзду визначаємо шляхом перемноження семи коефіцієнтів аварійності

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

До цього часу в методі підсумкового коефіцієнта аварійності коефіцієнти $K_2 \dots K_7$ задають детерміновано для певного інтервалу, вони мають стрибкоподібний характер. Це впливає на остаточний результат і може призвести до різних заходів із підвищення безпеки руху на залізничних переїздах. Усунути вказані недоліки методу підсумкового коефіцієнта можна, використовуючи формули і графіки, запропоновані в роботі авторів [2], рис. 3.

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

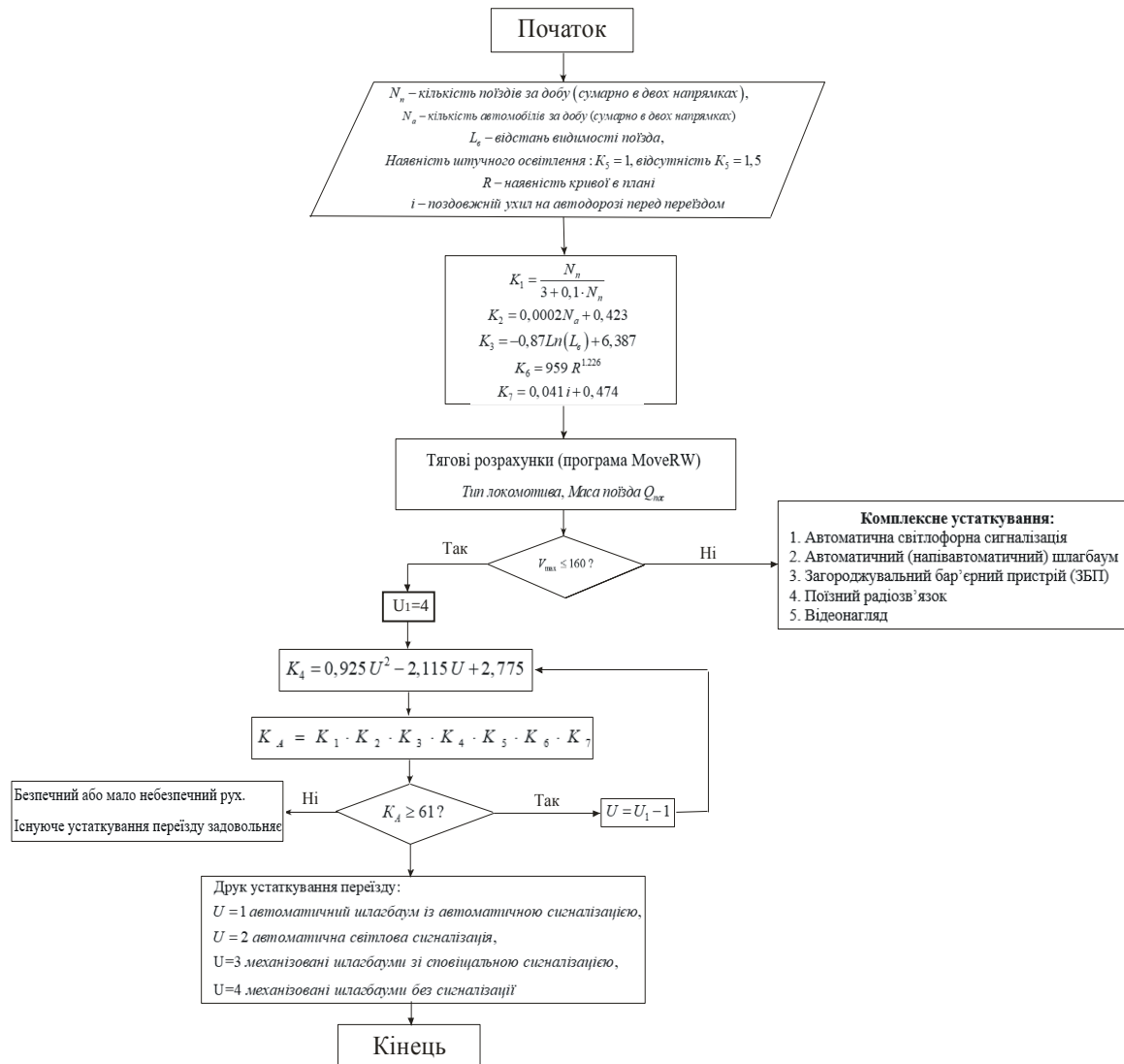


Рис. 3. Схема алгоритму визначення устаткування переїзду залежно від підсумкового коефіцієнта аварійності

Fig. 3. Diagram of the algorithm for determining the crossing equipment depending on the final accident rate

Передбачено, що перед впровадженням швидкісного руху поїздів на тому чи іншому напрямку буде проведено комплекс робіт, необхідний для реалізації максимальної швидкості руху $160 < V_{\max} \leq 200$. Нижче наведено опис алгоритму визначення устаткування переїзду залежно від підсумкового коефіцієнта аварійності:

1. З автоматизованої системи «Переїзд» вводять вихідні дані, необхідні для розрахунку коефіцієнтів $K_1, K_2, K_3, K_5, K_6, K_7$, а саме: N_n – кі-

лькість поїздів на добу; N_a кількість транспортних засобів на добу в обох напрямках; наявність штучного освітлення переїзду (наявне – 1, відсутнє – 1,5), радіус кривої у плані на підходах до переїзду R ; позовжний ухил автомобільної дороги на підходах до переїзду i .

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

3. Вводять вихідні дані для роботи програми MoveRW: позовжний профіль, план лінії, обмеження швидкості руху поїзда, дані про рухомий склад (тип локомотива, маса поїзда тощо).

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

4. За допомогою програми MoveRW виконують тягові розрахунки для встановлення рівня швидкості руху пасажирського поїзда в місці розташування переїзду.

5. Установлюють рівень швидкості на переїзді. Якщо рівень швидкості менше ніж 160 км/год, то задають устаткування на переїзді U_i ($i = 4 \dots 1$), і після кожного заданого значення U_i розраховують коефіцієнт аварійності K_A . Якщо $K_A \leq 40$ – безпечний або $40 < K_A \leq 60$ – малонебезпечний, то може бути прийняте рішення зупинити процес пошуку й прийняти устаткування переїзду.

6. Якщо $V_{\max} > 160$ – швидкісний рух, то беруть комплексне устаткування, що містить: ав-

томатичну світлофорну сигналізацію, автоматичний (напівавтоматичний) шлагбаум, загороджувальний бар'єрний пристрій (ЗБП), поїзний радіозв'язок і відеонагляд.

Дослідження за методом патентної і технічної статистики більше ніж 750 літературних джерел із забезпечення пропускної спроможності та безпеки руху транспорту на переїздах дозволили встановити міжнародний ранг значимості, його експертну оцінку та коефіцієнт динамічності розробок окремих елементів переїзної сигналізації [11].

Статистичний аналіз показав, що світлофори мають коефіцієнт динамічності +0,016; шлагбауми –0,155; пристрої загороджування –0,234 (табл. 3).

Таблиця 3

Напрямки вдосконалення пристроїв систем переїзної сигналізації

Table 3

Directions for improving railway crossing signaling system devices

Пристрої	Статистичний аналіз			Експертна оцінка рангу напрямку (якісний аналіз)		
	% від усіх джерел	Міжнародний ранг значимості	Коефіцієнт динамічності	Розвинуті країни	Пост-радянські країни	Україна
Устаткування переїзду:	Всього 20					
світлофори	9	0,10	+0,016	2	1	1
шлагбауми	7	0,08	–0,155	4	2	2
пристрої загороджування	4	0,10	–0,234	3	1	–

Устаткування на переїздах – світлофори, шлагбауми, загороджувальні бар'єрні пристрої (ЗБП) – характеризується міжнародним рангом значимості (КСР) і коефіцієнтом динамічності (МРС).

Міжнародний ранг значимості (International Importance Ranking) – МРС. Цей показник відображає важливість або значимість переїзду в міжнародному контексті. Його можна визначити на основі кількох факторів, таких як обсяг пасажирських або вантажних перевезень, важливість маршрутів, наявність зав'язків з іншими міжнародними транспортними коридорами тощо. Переїзди з вищим міжнародним рангом

значимості можуть вимагати більшої уваги щодо їх безпеки та обслуговування. Отже, МРС – це характеристика, яка визначає ефективність загороджувального пристрою в запобіганні зіткненням транспортних засобів із поїздами. Його визначають на основі таких факторів:

- безпека руху: ступінь захисту загороджувального пристрою від зіткнень транспортних засобів із поїздами;
- ефективність: ступінь впливу загороджувального пристрою на пропускну здатність переїзду;

– вартість: вартість будівництва, експлуатації та обслуговування загороджувального пристрою.

Міжнародний ранг значимості загороджувальних пристроїв визначають за шкалою від 1 до 5, де 1 – найнижчий ранг, а 5 – найвищий:

$$MPC = (\text{Безпека руху} \cdot 3 + \text{Ефективність} \cdot 2 + \text{Вартість}) / 6. \quad (2)$$

Для розрахунку міжнародного рангу значимості кожній характеристиці присвоюють певну вагову оцінку. Безпека руху має максимальну вагову оцінку 3, оскільки це найважливіша характеристика загороджувального пристрою. Ефективність має вагову оцінку 2, оскільки вона також є важливою характеристикою. Вартість має вагову оцінку 1, оскільки вона менш важлива, ніж безпека руху та ефективність.

Відповідно до формули (2),

$$MPC = (3 \cdot 3 + 2 \cdot 2 + 1 \cdot 1) / 6 = 2,33$$

Таким чином, світлофор з автоматичним закриттям має міжнародний ранг значимості 2,33, що означає, що його ранг значимості на 33 % нижчий за світлофор із найвищим рангом значимості.

Світлофор із найвищим рангом значимості – це світлофор, який має найвищий бал за міжнародною шкалою значимості світлофорів. Цю шкалу використовують для оцінки важливості світлофорів на основі таких факторів:

інтенсивність руху – кількість транспортних засобів і пішоходів, які проїжджають через перехрестя щодня;

швидкість руху – максимальна дозволена швидкість на цій ділянці дороги;

кількість аварій – історія аварій на перехресті;

наявність шкіл, лікарень та інших важливих об'єктів – світлофори, розташовані поблизу таких об'єктів, зазвичай мають вищий ранг значимості.

Міжнародна шкала значимості світлофорів є лише рекомендацією, і остаточне рішення про те, який світлофор має найвищий ранг, приймає місцева влада. Однак можна припустити, що світлофори з найвищим рангом значимості наявні в мегаполісах із високим рівнем інтенсивності руху, наприклад, у таких містах, як Токіо, Нью-Йорк, Лондон, а також на жвавих перехрестях із високою швидкістю руху (на автомагістралях);

у місцях із високим ризиком аварій (на перехрестях із поганою видимістю); поблизу шкіл, лікарень та інших важливих об'єктів. Важливо зазначити, що навіть світлофори з найвищим рангом значимості не гарантують повну безпеку на дорогах.

Коефіцієнт динамічності (Dynamic Factor) – КД. Цей показник вказує на ступінь динамічності переїзду, тобто його схильність до змін руху транспортних засобів, інтенсивності перевезень тощо. Він допомагає оцінити рівень важливості та ризику на конкретному переїзді, що дозволяє залізничним операторам, владі та іншим зацікавленим сторонам приділяти належну увагу певним переїздам у плануванні заходів безпеки та розвитку інфраструктури. Отже, КД – це характеристика, яка визначає, наскільки швидко загороджувальний пристрій може закрити переїзд. Його визначають на основі таких факторів:

час закриття – час, за який загороджувальний пристрій закриває переїзд;

час відкриття – час, за який загороджувальний пристрій відкриває переїзд.

Коефіцієнт динамічності загороджувальних пристроїв визначають за шкалою від 1 до 10, де 1 – найнижчий коефіцієнт, а 10 – найвищий.

Для розрахунку коефіцієнта динамічності час закриття і відкриття загороджувального пристрою вимірюють у секундах:

$$КД = (\text{Час закриття} + \text{Час відкриття}) / 60. \quad (3)$$

Результати

Для розрахунку Коефіцієнта динамічності світлофора з автоматичним закриттям можна використовувати такі дані: час закриття – 5 секунд, час відкриття – 5 секунд. Відповідно до формули (3), Коефіцієнт динамічності світлофора з автоматичним закриттям становитиме:

$$КД = (5 + 5) / 60 = 0,167.$$

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

Таким чином, світлофора з автоматичним закриттям становить коефіцієнт динамічності 0,167, що означає, що він має на 16,7 % більшу динамічність, ніж інші загороджувальні пристрої.

Якщо розглянути шлагбауми з автоматичним закриттям, то для розрахунку міжнародного рангу значимості можна використовувати такі дані: безпека руху – 2,5; ефективність – 2; вартість – 1. Відповідно до формули (2), міжнародний ранг значимості шлагбаума з автоматичним закриттям становитиме:

$$MPC = (2,5 \cdot 3 + 2 \cdot 2 + 1 \cdot 1) / 6 = 2,167.$$

Таким чином, шлагбаум з автоматичним закриттям має $MPC = 2,167$, що означає, що на 43,3 % нижче за світлофор із найвищим рангом значимості.

Для розрахунку міжнародного рангу значимості загороджувальних бар'єрних пристроїв (ЗБП), можна використовувати такі дані: безпека руху – 2; ефективність – 1,5; вартість – 1. Відповідно до формули (2), міжнародний ранг значимості ЗБП становитиме:

$$MPC = (2,0 \cdot 3 + 1,5 \cdot 2 + 1 \cdot 1) / 6 = 1,833.$$

Таким чином, ЗБП мають $MPC = 1,833$, що на 46,7 % нижче за світлофор із найвищим рангом значимості.

Для розрахунку коефіцієнта динамічності ЗБП можна використовувати такі дані: час закриття – 15 секунд, час відкриття – 15 секунд. Відповідно до формули (3), коефіцієнт динамічності ЗБП становитиме:

$$KD = (15 + 15) / 60 = 0,50.$$

Таким чином, ЗБП мають $KD = 0,5$, що вказує меншу на 50 % динамічність, ніж світлофора з автоматичним закриттям.

Розрахунок міжнародного рангу значимості і коефіцієнта динамічності для декількох десятків переїздів на ділянці залізниці можна виконати за допомогою електронних таблиць або спеціалізованого програмного забезпечення.

Відповідно до цих характеристик, загороджувальні пристрої на переїздах можна поділити на такі групи:

Група 1: пристрої з найвищим міжнародним рангом значимості і коефіцієнтом динамічності. До цієї групи належать світлофори зі звуковою сигналізацією і шлагбауми з автоматичним закриттям.

Група 2: пристрої з високим міжнародним рангом значимості і коефіцієнтом динамічності. До цієї групи належать світлофори зі звуковою сигналізацією і пристрої загороджування з автоматичним закриттям.

Група 3: пристрої з середнім міжнародним рангом значимості і коефіцієнтом динамічності. До цієї групи належать світлофори без звукової сигналізації і шлагбауми з ручним закриттям.

Група 4: пристрої з низьким міжнародним рангом значимості і коефіцієнтом динамічності. Сюди належать пристрої загороджування з ручним закриттям.

Важливо зазначити, що MPC та KD не завжди чітко відповідають групам, тобто пристрій може мати характеристики, що не відповідають його групі. Під час вибору загороджувального пристрою важливо враховувати всі фактори, а не лише групу. Наприклад, світлофор зі звуковою сигналізацією та без шлагбаума може мати MPC та KD , що відповідають Групі 2, а не Групі 1. Шлагбаум із ручним закриттям, який використовують на переїзді з високим ризиком аварій, може мати MPC та KD , що відповідають Групі 3. Рекомендовано перевіряти MPC та KD конкретного загороджувального пристрою перед його використанням.

У наведених даних «Статистичний аналіз» (табл. 3) вказано значення коефіцієнта рангу значимості (MPC) для шлагбаумів і пристроїв загороджування. Значення MPC для шлагбаумів і пристроїв загороджування є негативними, що означає, що вони мають нижчий ранг значимості, ніж світлофори. Зокрема, значення MPC для шлагбаумів дорівнює $-0,155$, що означає, що вони мають ранг значимості на 15,5 % нижче ніж світлофори. Значення MPC для пристроїв загороджування дорівнює $-0,234$, що означає, що вони мають ранг значимості на 23,4 % нижче ніж світлофори. Тобто світлофори є більш ефективними для запобігання зіткненням транспортних засобів із поїздами, ніж шлагбауми і пристрої загороджування.

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

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

Остаточний вибір типу пристрою безпеки для переїзду залежить від таких факторів, як рівень безпеки, якого необхідно досягнути, вартість пристрою, складність обслуговування пристрою.

Вище було зазначено, що в цій роботі розглянуто питання будівництва переїздів на ділянках як нової траси європейської колії 1 435 мм, так і реконструкції окремих напрямків під євростандарт із застосуванням суміщеної колії (1 435/1 520 мм). Зрозуміло, що конструкція переїздів у цих випадках буде різною. Наприклад, на напрямку Львів – Київ ділянка державний кордон – Ковель – Сарни – Коростень є одноколісною. Отже, можна розглядати два варіанти:

– варіант 1: залишають наявну колію шириною 1 520 мм та будують другу головну колію шириною 1 435 мм;

– варіант 2: залишають одноколісну ділянку з укладанням суміщеної колії 1 520\1 435 мм.

Дніпровське науково-конструкторське технологічне бюро колійного господарства» філії «НДКТІ» АТ «Укрзалізниця» розробляє стандарт і конструкцію переїздів з універсальним залізобетонним настилом через залізничні колії з рейками типу Р65 та UIC60. Стандарт застосо-

вують під час проектування переїзду з універсальним залізобетонним настилом через залізничні колії, його поточного утримання та ремонту.

Розглянемо особливості конструкції колії в зоні переїзду, які впливають на характеристики її напружено-деформованого стану. Настил сучасного залізничного переїзду, як правило, складається з трьох рядів залізобетонних плит. Для двоколісної ділянки кожен ряд має шість плит, які укладають до і після рейки, вони мають обпирання з жорстким кріпленням до залізобетонної шпали спеціальної конструкції. По довжині колії кожна плита прикріплена до п'яти шпал.

Для встановлення розрахункових варіантів проведено статистичний аналіз паспортів переїздів на окремих напрямках регіональних філій: Київ – Коростень (Південно-Західна залізниця), Здолбунів – Львів (Львівська залізниця), П'ятихатки – Дніпро – Чаплине (Придніпровська залізниця) та ін. Установлено, що кут перетину автодороги із залізницею складає в основному 90°, зустрічаються деякі перетини під кутом 60° і навіть менше. Ширина переїзду коливається в основному від 6,0 до 11,0 метрів.

Для переїздів із двома та більше коліями кількість плит помножують на кратне число колії.

У роботі розглянуто різні варіанти переїздів, що включають кут перетину залізниці автомобільною дорогою і ширину проїжджої частини. Для кожного з варіантів визначено обсяги робіт і розраховано укрупнені показники вартості влаштування залізничного переїзду під час капітального ремонту (K):

$$K = -0,0085\alpha^2b^2 + 0,1403\alpha^2b - 0,2946\alpha^2 + 0,624\alpha b^2 - 13,847\alpha b + 6,901\alpha + 15,68b^2 + 192b + 2581.$$

Наукова новизна та практична значимість

Розроблено інтегровану модель оцінки безпеки залізничних переїздів, яка враховує не лише традиційні показники (частота аварій, інтенсивність руху), але й нові фактори, такі як надійність обладнання, людський фактор та вплив

зовнішніх умов. Запропонована модель дозволяє визначати більш точний прогноз ризиків та обирати оптимальні рішення щодо модернізації переїздів з урахуванням конкретних умов експлуатації.

Сформульовані рекомендації можуть бути використані для розробки ефективних програм модернізації залізничних переїздів в Україні.

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

Упровадження запропонованих технологій дозволить підвищити рівень безпеки руху на 20 % та зменшити середній час очікування на переїзді на 15 %. Крім того, це сприятиме підвищенню пропускної спроможності залізниць та зниженню витрат на утримання інфраструктури.

Висновки

Для зниження ризику людських помилок і підвищення рівня безпеки важливо впроваджувати сучасні технології та новітні розробки щодо ефективних рішень у сфері безпеки руху на залізничних переїздах. Особливу увагу варто приділити поширенню наявних рішень та активному впровадженню інновацій, наприклад: обладнання переїздів системами бар'єрного загородження (всього 8 на ділянках Укрзалізниці), встановлення відеоспостереження (лише 9 переїздів) і чотирьох шлагбаумів (всього 383 переїзди).

Необхідно вдосконалювати методику оцінки ризиків для розробки обґрунтованої стратегії управління переїздами. Під час оцінювання слід враховувати такі ключові фактори, як розташування переїзду (план, профіль, видимість), інтенсивність руху (залізничного, автомобільного та пішохідного), а також аналіз даних про аварії.

За допомогою методів ієрархій, мозкового штурму та інших інструментів доцільно визначати надійні показники для комплексної оцінки безпеки. Це охоплює всі аспекти проектування, будівництва, обслуговування та експлуатації залізничної інфраструктури, спрямовані на гарантування безпеки пасажирів і транспортних засобів.

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

Реконструкція залізничних переїздів із застосуванням інноваційних технологій може суттєво поліпшити безпеку руху та створити умови для швидкісного руху поїздів. Серед таких технологій виділяють:

– системи автоматичного контролю та управління переїздами, які автоматично закривають

переїзд у разі наближення поїзда, запобігаючи зіткненням транспорту з рухомим складом залізниці;

– системи відеоспостереження, що дозволяють виявляти загрози, наприклад, перешкоди на переїзді або автомобілі, водії яких ігнорують заборонний сигнал;

– системи штучного інтелекту, здатні аналізувати дані з різних джерел (відеокамер, датчиків, метеостанцій) і приймати рішення щодо закриття переїзду в автоматичному режимі.

Упровадження таких технологій дає змогу скоротити час закриття переїздів, підвищити пропускну здатність залізниці, поліпшити видимість переїздів для водіїв, а також зменшити кількість аварій.

Окрім цього, важливим викликом є технічна несумісність української залізничної інфраструктури з європейськими стандартами. Рішенням може стати поступовий перехід на європейську колію, що забезпечить інтеграцію української залізниці до мережі ЄС. На маршрутах, де заплановано впровадження колії європейського стандарту, поточний стан переїздів часто не відповідає сучасним вимогам, тому необхідна їхня реконструкція.

Аналіз наукових досліджень і проведені розрахунки дозволили визначити ключові фактори, що впливають на ризики безпеки на переїздах, та окреслити інноваційні технології, які ефективно застосовуватимуть в мережі українських залізниць. Їх упровадження стане важливим кроком у гарантуванні безпеки руху, збереженні людських життів і сприятиме інтеграції в європейську транспортну систему.

Подяка

Дослідження, результати якого викладено в цій статті, проведено за підтримки гранту Національного фонду досліджень України в ході реалізації проекту «Наукове обґрунтування впровадження європейської колії на території України в повоєнний період» (реєстраційний номер проекту 2022.01/0021), отриманого в рамках конкурсу «Наука для відбудови України у воєнний та повоєнний періоди».

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Водяний А. ЄС розробив стратегію переходу України на євроколію 1435 мм. *LIGA.net*. 2023. URL: <https://biz.liga.net/ua/all/transport/novosti/evrosoyuz-razrabotal-strategiyu-perehoda-ukrainy-na-evroputi-karta>
2. Курган М. Б., Курган Д. М., Гусак М. А., Гаврилов М. О., Лужицький, О. Оцінка безпеки руху транспортних засобів на перетині автомобільної дороги й залізниці в одному рівні. *Наука та прогрес транспорту*. 2022. № 2 (98). С. 45–58. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2022/267978>
3. 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>
4. М 218-03450778-652:2008 Методика оцінки рівнів безпеки руху на автомобільних дорогах України. [Чинний від 2008-01-01]. Київ : Державна служба автомобільних доріг України (Укравтодор), 2008. 49 с.
5. ЦП-0174 Інструкція з улаштування та експлуатації залізничних переїздів. Київ : Мін-во Юстиції України, 2007. 167 с.
6. Assessment of safety at level crossings in UNECE member countries and other selected countries and strategic framework for improving safety at level crossings. *Working Party on Rail Transport*. 50 p. URL: <https://unece.org/DAM/trans/doc/2016/sc2/ECE-TRANS-SC2-2016-id05e.pdf>
7. Blagojević A, Kasalica S, Stević Ž, Tričković G, Pavelkić V. Evaluation of Safety Degree at Railway Crossings in Order to Achieve Sustainable Traffic Management: A Novel Integrated Fuzzy MCDM Model. *Sustainability*. 2021. Vol. 13. Iss. 2: P. 832–852. <https://doi.org/10.3390/su13020832>
8. Dezhkam B., Eslami S. M. A review of methods for highway-railway crossings safety management process. *International Electronic Journal of Mathematics Education*. 2017. Vol. 12. Iss. 3. P. 561–568. DOI: <https://doi.org/10.29333/iejme/632>
9. Ishak S. Z., Yue W. L., Somenahalli S. An assessment of heavy vehicle safety at level crossing using Petri nets: South Australia case studies. *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*. 2011. Vol. 9. P. 1823–1838. DOI: <https://doi.org/10.11175/easts.9.1823>
10. Level Crossing Risk Assessment Guidance. *KiwiRail*. URL: <https://www.kiwirail.co.nz/assets/Uploads/documents/Level-Crossing-Risk-Assessment-Guidance.pdf>
11. Otto A., Kellermann P., Thieken A. H., Mániz Costa M., Carmona M., Bubeck P. Risk reduction partnerships in railway transport infrastructure in an alpine environment. *International Journal of Disaster Risk Reduction*. 2019. Vol. 33. P. 385–397. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2018.10.025>
12. Principles for managing level crossing safety. *Office of Rail and Road*. URL: https://www.orr.gov.uk/sites/default/files/2021-06/principles-for-managing-level-crossing-safety-june-2021_0.pdf
13. Read G. J. M., Cox J. A., Hulme A., Naweed A., Salmon P. M. What factors influence risk at rail level crossings? A systematic review and synthesis of findings using systems thinking. 2021. *Safety Science*. Vol. 138. P. 1–13. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2021.105207>
14. Sekasi J., Solihu H. Safety and risk analysis at railway crossings of north-south Addis Ababa light rail. *Smart and Resilient Transportation*. 2021. Vol. 3. Iss. 3. P. 266–282. DOI: <https://doi.org/10.1108/srt-08-2021-0007>
15. Summary of the work of the Economic and Social Commission for Asia and the Pacific, 2018-2019. *UN. ESCAP*. URL: <https://digitallibrary.un.org/record/3807384?ln=en&v=pdf>
16. The Australian Level Crossing Assessment Model. *ALCAM in Detail. An Introduction to the new ALCAM models (2014)*. URL: <https://www.alcam.com.au/media/drtl4t1f/alcam-in-detail-update-2016.pdf>
17. Turner S., Cook E., Boshier S. Level Crossing Safety Impact Assessments for Vehicle and Pedestrian Crossings. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. 2021. Vol. 2675. Iss. 9. P. 1482–1492. DOI: <https://doi.org/10.1177/03611981211007857>

M. B. KURHAN¹, A. M. KURHAN², O. F. LUZHYTSKYI^{3*}, R. V. IVANOV⁴,
N. P. KHMELEVSKA⁵,

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

²Dnipropetrovsk Scientific and Design Technological Bureau of Track Facilities, a branch of «NDCTI» JSC «Ukrzaliznytsia», tel. +38 (056) 373 15 48, e-mail kudl82@ukr.net, ORCID 0009-0005-2527-7502

^{3*}Dep. «Transport Infrastructure», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 48, e-mail oleg.luzhickii@gmail.com, ORCID 0000-0001-6519-7447

⁴Dep. «Transport Infrastructure», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 48, e-mail ivanovrodion@ukr.net, ORCID 0009-0005-9125-9468

⁵Dep. «Transport Infrastructure», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 48, e-mail hmelevnela@gmail.com, ORCID 0000-0002-2360-8671

Modernization of Existing Level Crossings in the Areas of Construction of the European Standard Railway Track in Ukraine

Purpose. The article aims to analyze modern technological solutions to improve the level of safety at railway crossings, prevent emergencies and ensure uninterrupted traffic. **Methodology.** The study is based on the use of mathematical modeling and numerical methods to analyze the impact of modernization and new projects on the level of safety at railway crossings. Using computer modeling, mathematical models were built that reflect different scenarios of crossings. Based on the data obtained, the effectiveness of the proposed measures was assessed and recommendations for further optimization of the security system were developed. To evaluate the effectiveness of the proposed measures, a system of indicators has been developed to quantify the level of safety of railway crossings before and after modernization. These indicators take into account the daily intensity of train traffic through the crossing, the daily intensity of traffic on the road, the equipment of the crossing, the radius of the curve in the plan and the longitudinal slope of the road on the approaches to the crossing. **Findings.** An improvement of the method of the final accident rate, which is one of the most common tools for assessing traffic safety at railroad crossings, is proposed. The application of this method made it possible to quantify the level of risk of accidents and analyze the effectiveness of measures aimed at improving safety. The method is relatively easy to use and does not require complex mathematical calculations, and allows taking into account a wide range of factors affecting traffic safety at a level crossing, such as traffic volume, design features of the level crossing, availability of signaling, etc. The final coefficient was used to compare the safety level of different crossings and track the dynamics of changes in their equipment over time. This made it possible to identify crossings that require priority modernization, as well as to predict changes in the initial and calculated data and plan measures to introduce innovative technologies that improve traffic safety at crossings. **Originality.** An integrated model for assessing the safety of railroad crossings has been developed that takes into account not only traditional indicators (frequency of accidents, traffic intensity) but also new factors such as equipment reliability, human factor, and the impact of external conditions. The proposed model makes it possible to determine a more accurate risk forecast and choose optimal solutions for the modernization of level crossings, taking into account specific operating conditions. **Practical value.** The formulated recommendations can be used to develop effective programs for the modernization of railway crossings in Ukraine. The implementation of the proposed technologies will increase the level of traffic safety by 20% and reduce the average waiting time at a crossing by 15%. In addition, it will help to increase railroad capacity and reduce infrastructure maintenance costs.

Keywords: railway crossing; interoperability; modernization; combined track; road safety

REFERENCES

1. Vodiany, A. (2023). EU developed a strategy for Ukraine's transition to European gauge 1435 mm. *LIGA.net*. Retrieved from <https://biz.liga.net/ua/all/transport/novosti/evrosoyuz-razrabotal-strategiyu-perehoda-ukrainy-na-evroputi-karta> (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. Kurhan, M. B., Kurhan, D. M., Husak, M. A., Havrylov, M. O., & Luzhytskyi, O. F. (2022). Vehicle Traffic Safety Assessment at the Intersection of Highways and Railways at the Same Level. *Science and Transport Progress*, 2(98), 45-58. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2022/267978> (in Ukrainian)
4. *Metodyka otsinky rivniv bezpeky rukhu na avtomobilnykh dorohakh Ukrainy, M 218-03450778-652:2008* (2008). Kyiv: State Road Service of Ukraine (Ukravtodor). (in Ukrainian)
5. *Instruktsiia z ulashtuvannia ta ekspluatatsii zaliznychnykh pereizdiv, TsP-0174*. (2007). Kyiv: Ministry of Justice of Ukraine. (in Ukrainian)
6. Assessment of safety at level crossings in UNECE member countries and other selected countries and strategic framework for improving safety at level crossings. *Working Party on Rail Transport*. Retrieved from <https://unece.org/DAM/trans/doc/2016/sc2/ECE-TRANS-SC2-2016-id05e.pdf> (in English)
7. Blagojević, A., Kasalica, S., Stević, Ž., Tričković, G., & Pavelkić, V. (2021). Evaluation of Safety Degree at Railway Crossings in Order to Achieve Sustainable Traffic Management: A Novel Integrated Fuzzy MCDM Model. *Sustainability*, 13(2), 832-852. DOI: <https://doi.org/10.3390/su13020832> (in English)
8. Dezhkam, B., & Eslami, S. M. (2017). A review of methods for highway-railway crossings safety management process. *International Electronic Journal of Mathematics Education*, 12(3), 561-568. DOI: <https://doi.org/10.29333/iejme/632> (in English)
9. Ishak, S. Z., Yue, W. L., & Somenahalli, S. (2011). An assessment of heavy vehicle safety at level crossing using Petri nets: South Australia case studies. *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, 9, 1823-1838. DOI: <https://doi.org/10.11175/easts.9.1823> (in English)
10. Level Crossing Risk Assessment Guidance. *KiwiRail*. Retrieved from <https://www.kiwirail.co.nz/assets/Uploads/documents/Level-Crossing-Risk-Assessment-Guidance.pdf> (in English)
11. Otto, A., Kellermann, P., Thieken, A. H., Máñez Costa, M., Carmona, M., & Bubeck, P. (2019). Risk reduction partnerships in railway transport infrastructure in an alpine environment. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 33, 385-397. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2018.10.025> (in English)
12. Principles for managing level crossing safety. *Office of Rail and Road*. Retrieved from https://www.orr.gov.uk/sites/default/files/2021-06/principles-for-managing-level-crossing-safety-june-2021_0.pdf (in English)
13. Read, G. J. M., Cox, J. A., Hulme, A., Naweed, A., & Salmon, P. M. (2021). What factors influence risk at rail level crossings? A systematic review and synthesis of findings using systems thinking. *Safety Science*, 138, 1-13. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2021.105207> (in English)
14. Sekasi, J., & Solihu, H. (2021). Safety and risk analysis at railway crossings of north-south Addis Ababa light rail. *Smart and Resilient Transportation*, 3(3), 266-282. DOI: <https://doi.org/10.1108/srt-08-2021-0007>
15. Summary of the work of the Economic and Social Commission for Asia and the Pacific, 2018-2019. *UN. ESCAP*. Retrieved from <https://digitallibrary.un.org/record/3807384?ln=en&v=pdf> (in English)
16. The Australian Level Crossing Assessment Model. *ALCAM in Detail. An Introduction to the new ALCAM models (2014)*. Retrieved from <https://www.alcam.com.au/media/drtl4t1f/alcam-in-detail-update-2016.pdf> (in English)
17. Turner, S., Cook, E., & Bosher, S. (2021). Level Crossing Safety Impact Assessments for Vehicle and Pedestrian Crossings. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2675(9), 1482-1492. DOI: <https://doi.org/10.1177/03611981211007857> (in English)

Надійшла до редколегії: 02.08.2024

Прийнята до друку: 06.12.2024