

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

УДК [656.216.2:656.13]-026.87

М. Б. КУРГАН^{1*}, Р. В. ІВАНОВ²

^{1*}Каф. «Транспортна інфраструктура», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДПТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 48, ел. пошта m.b.kurhan@ust.edu.ua, ORCID 0000-0002-8182-7709

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

Комплексна оцінка небезпеки перетинів в одному рівні залізниці й автомобільної дороги з урахуванням когнітивного фактору

Мета. Створення діагностичної системи оцінки небезпеки залізничних переїздів, яка базується на багатофакторному аналізі ризику в межах структурованої системи критеріїв. Для досягнення поставленої мети проведено аналіз вітчизняних і міжнародних нормативних документів, що регламентують проєктування та експлуатацію переїздів в одному рівні залізниці й автомобільної дороги, а також оцінено їхні експлуатаційні та економічні характеристики. **Методика.** Запропонована методика спрямована на підвищення деталізації та інформативності оцінки небезпеки на етапі практичного застосування. Діагностична цінність методики полягає в створенні підґрунтя для планування адресних, цільових заходів безпеки, спрямованих на усунення конкретних факторів небезпеки. Показано, що включення когнітивного фактору забезпечує більш точне ранжування переїздів і створює підґрунтя для обґрунтування адресних заходів підвищення безпеки руху. **Результати.** Перевірка методики показала, що врахування когнітивного фактору помітно впливає на загальну оцінку небезпеки та змінює порядок розташування переїздів за рівнем ризику. Встановлено, що підвищений ризик пов'язаний не лише з інтенсивністю руху, а й із надмірною кількістю інформації та суперечливими сигналами. Отримані результати підтверджують доцільність цільових заходів із вдосконалення роботи сигналізації та зменшення візуальних перешкод без значних фінансових витрат. **Наукова новизна.** Вперше розроблено багатофакторну методику оцінки когнітивної небезпеки на залізничних переїздах, що ґрунтується на інтеграції психофізіологічних факторів водія (когнітивне навантаження, когнітивний дисонанс, втома) у систему розрахунку загального ризику. На відміну від існуючих нормативних підходів, запропонована методика дозволяє діагностувати конкретні причини когнітивного ризику та визначати пріоритетність цільових заходів, спрямованих на зниження ймовірності помилки водія. **Практичне значення.** В умовах, коли фізичні параметри залізничного переїзду (кількість колій, просторове розташування, тип покриття, наявність та тип сигналізації) є технічно або економічно складними для зміни, методика пропонує інструмент оптимізації інформаційного середовища в межах існуючої інфраструктури. Це дозволяє вирішувати аспекти безпеки руху, які не охоплюються чинними нормативними документами.

Ключові слова: залізничний переїзд; безпека руху; діагностування; когнітивна небезпека; когнітивний дисонанс; психофізіологічні фактори

Вступ

Залізничні переїзди залишаються одними з найбільш небезпечних елементів транспортної інфраструктури, оскільки поєднують у межах одного простору рух залізничного та автомобі-

льного транспорту [5, 6]. Чинні нормативні підходи до класифікації та оцінювання небезпеки переїздів базуються переважно на показниках інтенсивності руху поїздів і транспортних засобів [6, 7] та не враховують у повному обсязі вплив поведінкових і когнітивних особливостей водія [9]. Практика експлуатації свідчить, що

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

значна частина дорожньо-транспортних пригод на залізничних переїздах зумовлена не лише інтенсивністю руху, а й особливостями сприйняття інформації, когнітивним навантаженням, наявністю суперечливих сигналів та втомою водіїв [10, 15].

У зв'язку з цим актуальним є розвиток існуючих методик у напрямку багатофакторних моделей, які дозволяють не лише визначати рівень ризику, але й діагностувати причини їх формування [11]. Особливої актуальності такі підходи набувають для об'єктів інфраструктури з високим класом наслідків (СС3), де навіть одинична помилка водія може призвести до значних матеріальних та соціальних втрат [3].

Методи оцінки економічної ефективності інвестицій широко застосовуються для вирішення завдань, що виникають під час формування перспективних планів розвитку залізничного транспорту, обґрунтування інвестиційних проєктів на передпроектному етапі, підготовки проєктно-кошторисної документації, а також при оцінюванні ефективності впровадження інновацій у галузі та залученні інвестиційних ресурсів.

Ефективність проєктних рішень традиційно визначається за допомогою показників загальної та порівняльної ефективності інвестиційних витрат. Водночас зазначені підходи орієнтовані переважно на економічні критерії та не враховують у повному обсязі фактори безпеки руху, зокрема пов'язані з поведінкою та когнітивним навантаженням учасників дорожнього руху на залізничних переїздах. У зв'язку з цим виникає необхідність розвитку класичних методів економічної оцінки в напрямку багатокритеріальних моделей, які дозволяють одночасно враховувати інвестиційні витрати, експлуатаційні показники та безпекові чинники.

Для досягнення поставленої мети проведено аналіз вітчизняних і міжнародних нормативних документів щодо проєктування та експлуатації переїздів в одному рівні, а також оцінено їх експлуатаційні й економічні характеристики [14].

Мета

Мета роботи полягає у створенні діагностичної системи оцінки небезпеки залізничних переїздів, що базується на багатофакторній оцінці ризику в межах структурованої системи критеріїв, та розроблення комплексної методики оцінювання небезпеки залізничних переїздів з урахуванням когнітивних факторів водія. Для досягнення мети у роботі поставлено такі завдання:

- проаналізувати обмеження існуючих підходів до оцінювання небезпеки переїздів;
- розробити інтегральну багатофакторну модель оцінювання ризику;
- сформувати систему критеріїв когнітивної небезпеки;
- запропонувати класифікацію рівнів когнітивного ризику.

Методика

Більшість існуючих методик оцінювання небезпеки залізничних переїздів базуються на двох основних групах показників: МСЗ – соціально-економічна значущість переїзду і КД – динамічний ризик, зумовлений інтенсивністю руху.

У даній роботі пропонується розширити інтегральний індекс небезпеки шляхом введення третього зваженого компонента – коефіцієнта когнітивної небезпеки.

Запропонована методика спрямована на підвищення комплексності та деталізації оцінки небезпеки на етапі практичного застосування. Діагностична цінність методики полягає в можливості не лише визначати рівень ризику, а й ідентифікувати його першопричини, що дозволяє обґрунтовувати цільові та ефективні заходи з підвищення безпеки руху.

Під когнітивно-дистанційною моделлю у роботі розглядається модель оцінювання ризику, що враховує зміну когнітивного навантаження водія залежно від просторових параметрів переїзду та інтенсивності інформаційних стимулів.

Інтегральна значимість залізничного переїзду в транспортній мережі визначається на основі сукупності соціально-економічних і транспортних факторів, наведених у табл. 1.

Фактори, що впливають на значимість переїзду

Table 1

Factors influencing the significance of relocation

Номер	Показник	Приклад оцінювання
1	Інтенсивність автомобільного руху (авт/добу)	>5000 авто – 5 балів; <500 – 1 бал
2	Інтенсивність залізничного руху (поїзди/добу)	>80 – 5 балів; <10 – 1 бал
3	Категорія дороги (державна, місцева)	державна – 5; місцева – 2
4	Наявність об'їзду	немає – 5; є – 1
5	Соціально-економічна значущість (зв'язок з містами, портами, промзонами)	висока – 5; низька – 1

1. *МСЗ* – нормована соціально-економічна значущість переїзду. Соціально-економічна значущість переїзду визначається як зважена сума бальних оцінок окремих критеріїв (інтенсивність руху, категорія дороги, наявність об'їзду, соціальна роль тощо) з подальшим нормуванням до інтервалу [0; 1]

Нехай *МСЗ* – нормована соціально-економічна значущість, S_i – бальна оцінка *i*-го критерію значущості (табл. факторів), а w_i – його вага, $\sum w_i = 1$. Тоді:

$$MSZ_{(1-5)} = \sum_{i=1}^m w_i S_i, \quad (1)$$

де m – кількість критеріїв (наприклад, інтенсивність авто/залізничного руху, категорія дороги, наявність об'їзду, соціально-економічна роль тощо).

Провівши нормування до інтервалу [0, 1], отримаємо:

$$MSZ = \frac{\sum_{i=1}^m w_i S_i - 1}{4}, \quad (1, a)$$

За результатами оцінювання визначається міра ступеня значимості переїзду *MSZ*, (формула 1, *a*):

- 1 – 2 – малозначимі переїзди місцевого значення;
- 3 – 4 – переїзди середньої важливості;
- 5 – стратегічно важливі або вузлові переїзди.

2. *КД* – нормований коефіцієнт динамічності руху. Коефіцієнт динамічності руху характеризує інтенсивність взаємодії автомобільного та залізничного потоків і визначається на основі добової інтенсивності руху з подальшим нормуванням. Базовий коефіцієнт динамічності KD^* характеризує інтенсивність взаємодії автомобільного та залізничного потоків і визначається через добову інтенсивність руху з подальшим нормуванням за формулою:

$$KD^* = \frac{N_{авт} \cdot N_{поїз}}{10^4}, \quad (2)$$

де $N_{авт}$ – кількість транспортних засобів за добу; $N_{поїз}$ – кількість поїздів за добу.

3. Отримане значення нормується до шкали 1–10 відповідно до табл. 2.

Відповідно до шкали, використаної в табл. 2:

$$KD = \frac{K_{D}^* - K_{D,\min}^*}{K_{D,\max}^* - K_{D,\min}^*} \quad (2, a)$$

де $K_{D,\min}^*$, $K_{D,\max}^*$ беруться з вибірки досліджуваних переїздів або з нормативно заданих меж.

Зростання коефіцієнта динамічності призводить до підвищення когнітивного навантаження водія, збільшення часу прийняття рішень та ймовірності помилок, що є критичним для переїздів з високим класом наслідків (ССЗ).

Рівні динамічності залізничного переїзду

Table 2

Levels of dynamism of a railroad crossing

Рівень	Характеристика	Опис
1–2	Дуже низький	Малий рух, незначна взаємодія
3–4	Низький	Поодинокі конфліктні ситуації
5–6	Середній	Періодичне блокування руху
7–8	Високий	Часте накладання транспортних потоків
9–10	Дуже високий	Постійна напруженість руху, критичний рівень ризику

Клас наслідків є характеристикою рівня можливої небезпеки для життя і здоров'я людей, а також обсягів матеріальних або соціальних втрат у разі порушення чи припинення експлуатації об'єкта. В Україні встановлено три класи наслідків: СС1 – незначні, СС2 – середні, СС3 – значні. Для об'єктів швидкісного залізничного транспорту характерним є найвищий клас наслідків – СС3, що зумовлює підвищені вимоги до безпеки та надійності інфраструктури.

3. $I_{\text{когн}}$ – нормований коефіцієнт когнітивної небезпеки. Сумарний коефіцієнт когнітивної небезпеки визначається на основі багатофакторної оцінки психофізіологічних умов сприйняття водієм інформації на переїзді:

$$KD_{\text{COG}} = \sum_{j=1}^n w_j k_j, \quad (3)$$

де k_j – бальна оцінка j -го когнітивного критерію (1–5); w_j – ваговий коефіцієнт критерію; $\sum w_j = 1$; n – кількість когнітивних критеріїв.

Нормування [0; 1]:

$$I_{\text{когн}} = \frac{K_{\text{COG}(1-5)} - 1}{4}. \quad (4)$$

Поглиблений аналіз показав, що використання одного узагальненого коефіцієнта когнітивної небезпеки k_j не забезпечує достатньої діагностичної точності. Тому у роботі застосовано багатофакторну оцінку, яка дозволяє перейти від формальної оцінки до ідентифікації

першопричин ризику. Формування критеріїв когнітивної небезпеки здійснюється за схемою, наведеною в табл. 3

У прикладі оцінювання (табл. 3) застосовується розширена система з п'яти критеріїв (включаючи $k_{cd}, k_{ck} \dots$), кожен з яких має свою вагу (w_i) та отриману оцінку (від 1 до 5).

Для знаходження сумарного балу (загального коефіцієнта KD_{COG}) виконується підсумування зважених балів:

$$K = (5 \cdot 0,25 + (4 \cdot 0,25) + (3 \cdot 0,20) + (4 \cdot 0,15) + (2 \cdot 0,15))$$

$$K = 1,25 + 1,00 + 0,60 + 0,60 + 0,30$$

$$K = 3,75$$

Отриманий загальний бал 3,75 відповідає 4 рівню небезпеки – «високий». Це свідчить про те, що даний об'єкт має значний когнітивний ризик, спричинений високою оцінкою Когнітивного дисонансу (5) та Когнітивного навантаження (4). На основі цього робиться рекомендація щодо необхідності підвищення інформаційної підтримки або модернізації сигналізації.

4. I_{Σ}^{COG} – інтегральний індекс небезпеки з урахуванням когнітивного фактору. Підсумковий індекс небезпеки, значення якого наведені в таблиці, визначається як лінійна згортка нормованих компонентів:

$$I_{\Sigma}^{\text{COG}} = w_{\text{MSZ}} \cdot \text{MSZ} + w_{\text{KD}} \cdot \text{KD} + w_{\text{COG}} \cdot I_{\text{когн}}, \quad (5)$$

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

де I_{Σ}^{COG} – підсумковий індекс небезпеки у когнітивно-дистанційній моделі; I_{cog} – коефіцієнт когнітивної небезпеки, нормований до шкали [0;

1]; w_{MSZ}, w_{KD}, w_{COG} – вагові коефіцієнти факторів; за умови $w_{MSZ}, w_{KD}, w_{COG} \geq 0$ і $w_{MSZ} + w_{KD} + w_{COG} = 1$.

У розрахунках, наведених у таблиці результатів, використовувалося співвідношення ваг: $w_{MSZ} = 0,30$, $w_{KD} = 0,40$, $w_{COG} = 0,30$.

Таблиця 3

Формування критеріїв когнітивної небезпеки залізничного переїзду

Table 3

Formulation of criteria for cognitive danger at railroad crossings

№	Критерій оцінювання	Опис показника	Оцінка	Вага, w_i	Зважений бал
1	Когнітивний дисонанс k_{cd}	Суперечливі або неоднозначні сигнали	5	0,25	1,25
2	Когнітивне навантаження k_{ck}	Інтенсивність інформаційних стимулів	4	0,25	1,00
3	Когнітивна наочність k_{cn}	Видимість і зрозумілість сигналів	3	0,20	0,60
4	Когнітивна втома k_{cf}	Тривалість очікування	4	0,15	0,60
5	Інформаційна підтримка k_{ci}	Додаткові засоби інформування	2	0,15	0,30
	Підсумок:			1,00	3,75

Клас ризику залізничного переїзду встановлюється відповідно до інтервалів значень інтегрального індексу I_{Σ}^{COG} (див. табл. 4).

Класифікація рівнів когнітивної небезпеки залізничних переїздів за сумарним зваженим балом ґрунтується на логічному поділі шкали, типовому для експертних систем багатофакторного оцінювання ризику. Оскільки окремі критерії оцінюють за шкалою 1–5, сумарний зважений бал KD_{COG} в інтервалі 1,00 (мінімальний ризик) – 5,00 (максимальний ризик). Загальний діапазон значень поділено на п'ять інтервалів

(табл. 4). Межі інтервалів сформовано на основі рівномірного поділу шкали з експертним коригуванням, що враховує нелінійне зростання ризику у зоні високих значень.

Запропонована класифікація дозволяє ідентифікувати домінуючі чинники ризику та обґрунтовувати пріоритетність заходів безпеки. За наведеним прикладом $K = 3,75$ відповідає IV рівню (високий), що вказує на необхідність першочергових заходів зі зниження когнітивного ризику.

Класифікація рівнів когнітивної небезпеки за сумарним балом

Table 4

Classification of cognitive risk levels based on total score

Рівень	Назва рівня	Діапазон KD_{COG}	Характеристика
I	Низький	1,00 – < 2,00	Прийнятний рівень когнітивного навантаження
II	Помірний	2,00 – < 3,00	Збалансований ризик, можливі локальні корективи
III	Підвищений	3,00 – < 3,50	Ризик помітний, потрібне планування заходів
IV	Високий	3,50 – < 4,50	Значний ризик, потрібне першочергове втручання
V	Критичний	4,50 – 5,00	Неприйнятний рівень безпеки

Діагностика ключових факторів когнітивного ризику. Перевагою багатофакторної моделі є можливість визначити домінуючі причини високого значення. Для розглянутого прикладу найбільший внесок у сумарний бал формують два критерії:

1. *Когнітивний дисонанс* (k_{cd}), зважений внесок 1,25 (оцінка 5). Це означає наявність критичних суперечливих або неоднозначних стимулів (наприклад, активна сигналізація за відсутності візуального підтвердження наближення поїзда, суперечливі знаки, «візуальний шум»). Дисонанс підвищує ймовірність помилки через сумніви у достовірності сигналів та затримку реакції.

2. *Когнітивне навантаження* (k_{ck}), зважений внесок 1,00 (оцінка 4). Висока інтенсивність стимулів (шум, вібрації, надлишкова кількість об'єктів/сигналів) ускладнює оброблення інформації, збільшує ймовірність пропуску важливого сигналу та прискорює настання втоми. Окремо виділяється критерій, оптимізація якого дає оперативне зниження ризику та належить до першочергових заходів швидкого впровадження.

3. *Інформаційна підтримка* (k_{ci}), зважений внесок 0,30 (оцінка 2). Низький рівень додаткових засобів інформування (табло, голосові повідомлення, динамічна інформація) не компен-

сує високий дисонанс і навантаження. Підвищення інформаційної підтримки може забезпечити відносно швидке зниження інтегрального когнітивного ризику без капітальних змін інфраструктури.

Узагальнення. Високе значення K у даному прикладі є результатом поєднання критичного дисонансу та високого навантаження, які не компенсуються достатньою інформаційною підтримкою

Результати

Застосування запропонованої методики виконано для низки залізничних переїздів регіональної філії «Придніпровська залізниця». Результати розрахунків показали, що включення когнітивного фактора суттєво впливає на інтегральну оцінку безпеки та дозволяє виявляти об'єкти з підвищеним ризиком навіть за помірних значень динамічності руху.

Нормовані показники соціально-економічної значущості МСЗ, динамічності руху КД та когнітивної безпеки I_{cog} визначалися в інтервалі [0; 1]. Інтегральний індекс безпеки з урахуванням когнітивного фактора обчислювався за формулою (5). Клас ризику встановлювали відповідно до прийнятих інтервалів значень: $w_{MSZ}=0,30$ (значущість), $w_{KD}=0,40$ (динамічний ризик), $w_{COG}=0,30$ (когнітивний фактор). Тоді для переїзду Дніпро–Чаплине:

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

$$I_{\Sigma}^{COG} = 0,30 \cdot 0,80 + 0,40 \cdot 0,85 + \\ + 0,30 \cdot 0,72 = 0,796$$

Результати комплексної оцінки небезпеки залізничних переїздів, що розташовані на різних напрямках регіональної філії «Придніпровська залізниця» наведені в табл. 5.

Таблиця 5

Результати комплексної оцінки небезпеки залізничних переїздів

Table 5

Results of a comprehensive assessment of the dangers of railroad crossings

№	Назва переїзду	МСЗ	КД	$I_{\text{когн}}$	I_{Σ}^{COG}	Клас ризику
1	Дніпро – Чаплине	0,80	0,85	0,72	0,80	Високий
2	Наумівка – Севастополь	0,90	0,95	0,60	0,83	Високий
3	П'ятихатки – Дніпро	0,75	0,70	0,55	0,67	Підвищений
4	Лозова – Синельникове	0,65	0,40	0,35	0,46	Помірний

Відповідно до табл. 5 переїзди на напрямках Дніпро – Чаплине та Наумівка – Севастополь за результатами оцінювання віднесено до високого класу ризику, що зумовлено поєднанням високого когнітивного дисонансу та значного когнітивного навантаження водіїв. Отримані результати свідчать про доцільність першочер-

гового впровадження адресних заходів, спрямованих на оптимізацію інформаційного середовища та зниження ймовірності помилкових рішень.

Для наочності на рис. 1 наведена інтегральна оцінка небезпеки залізничних переїздів з урахуванням когнітивного фактору.

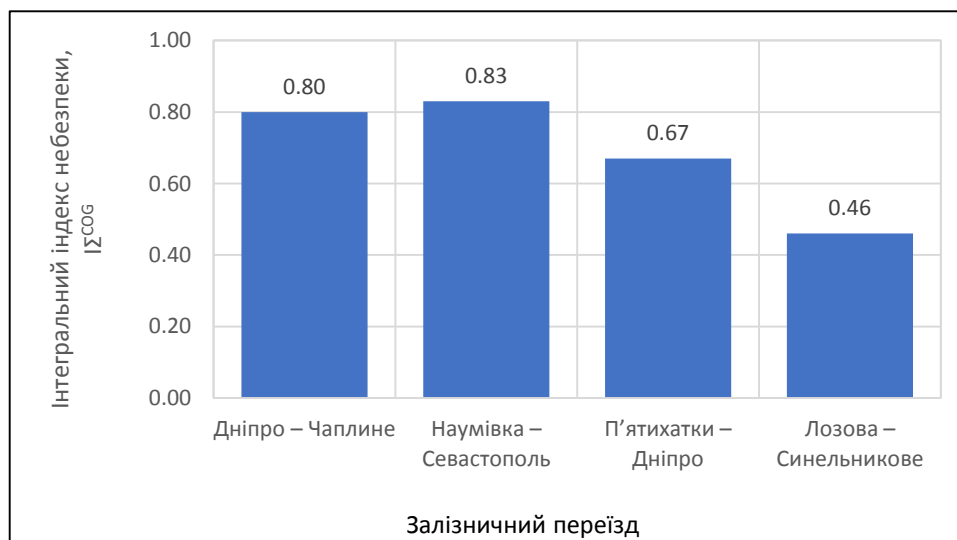


Рис. 1. Інтегральна оцінка небезпеки залізничних переїздів з урахуванням когнітивного фактору

Fig. 1. Integrated assessment of the danger of railroad crossings, taking into account the cognitive factor

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

Запропонована багатофакторна модель оцінювання небезпеки розширює традиційні нормативні підходи та дозволяє враховувати когнітивний фактор як один із ключових елементів системи безпеки руху на залізничних переїздах. На відміну від існуючих методик, що оперують обмеженою кількістю формальних показників, розроблений підхід забезпечує перехід від формального ранжування об'єктів до діагностики конкретних причин ризику.

Результати дослідження підтверджують, що значна частина небезпечних ситуацій формується внаслідок перевантаження інформаційного середовища та наявності суперечливих сигналів, а не виключно через інтенсивність руху. Це створює передумови для реалізації ефективних заходів безпеки без суттєвих капітальних витрат шляхом удосконалення логіки сигналізації, підвищення наочності та зменшення візуального шуму.

Застосування багатофакторної класифікації дозволяє перейти від формального ранжування переїздів до діагностики конкретних причин ризику, що є принципово важливим для обґрунтування адресних заходів безпеки. При цьому значна частина таких заходів може реалізовуватися без суттєвих капітальних витрат, шляхом оптимізації інформаційного середовища, уніфікації сигналів та усунення візуального шуму.

Запропонований підхід узгоджується з чинними національними та європейськими принципами безпеки транспортної інфраструктури [13, 16] та не суперечить вимогам до технічних систем керування рухом, доповнюючи їх у частині взаємодії з учасниками дорожнього руху [8, 10].

Подальші дослідження доцільно спрямувати на валідацію запропонованої моделі на основі статистичних даних про дорожньо-транспортні пригоди на залізничних переїздах, уточнення вагових коефіцієнтів когнітивних критеріїв із застосуванням методів експертного оцінювання та аналізу ієрархій [4].

Наукова новизна й практична значимість

Наукова новизна роботи полягає в тому, що вперше запропонована багатофакторна методика оцінювання когнітивної небезпеки на залі-

зничних переїздах, яка ґрунтується на інтеграції психофізіологічних факторів водія у систему розрахунку загального ризику. Розроблений підхід дозволяє діагностувати першопричини формування небезпечних ситуацій та обґрунтовувати пріоритетність цільових заходів з підвищення безпеки руху.

Практична значимість отриманих результатів полягає у можливості застосування запропонованої методики для оптимізації інформаційного середовища залізничних переїздів в межах існуючої інфраструктури, що є особливо актуальним за умов обмежених фінансових ресурсів та високого класу наслідків об'єктів.

Висновки

1. Проаналізовано обмеження існуючих нормативних підходів до оцінювання небезпеки залізничних переїздів, які базуються переважно на показниках інтенсивності руху та не враховують поведінкові й когнітивні чинники водія.

2. Запропоновано багатокритеріальну модель оцінювання небезпеки переїздів, що є розвитком класичної концепції приведених витрат і адаптована до об'єктів інфраструктури з високим класом наслідків (ССЗ).

3. Розроблено систему критеріїв когнітивної небезпеки та класифікацію рівнів когнітивного ризику, що дозволяє ідентифікувати домінуючі чинники формування небезпечних ситуацій.

4. Показано, що включення когнітивного фактора до інтегрального індексу небезпеки забезпечує більш точне ранжування залізничних переїздів та підвищує обґрунтованість планування адресних заходів з підвищення безпеки руху.

5. Запропонована класифікація рівнів когнітивної небезпеки дозволяє не лише визначати клас ризику, але й ідентифікувати домінуючі фактори, що формують небезпечний стан конкретного переїзду.

6. Отримані результати підтверджують доцільність використання когнітивних критеріїв у системах управління безпекою залізничних переїздів та можуть бути використані при розробленні національних нормативних документів і стандартів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ДСТУ 4100:2021. Безпека дорожнього руху. Знаки дорожні. Загальні технічні умови. Правила застосування. [Чинний від 2021-11-01]. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2021. 144 с.
2. ДСТУ 2587:2021. Безпека дорожнього руху. Розмітка дорожня. Загальні технічні умови. [Чинний від 2021-08-01]. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2021. 102 с.
3. ДСТУ 8855:2019. Будівлі та споруди. Визначення класу наслідків (відповідальності). [Чинний від 2019-12-01]. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2019. 17 с.
4. 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>
5. Про затвердження Інструкції з улаштування та експлуатації залізничних переїздів : Наказ М-ва трансп. та зв'язку України від 26.01.2007 № 54 : станом на 15 квіт. 2011 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0162-07#Text>
6. Про затвердження Правил технічної експлуатації залізниць України : Наказ М-ва трансп. України від 20.12.1996 № 411 : станом на 14 листоп. 2025 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0050-97#Text>
7. Про затвердження Технічного регламенту безпеки інфраструктури залізничного транспорту : Постанова Каб. Міністрів України від 11.07.2013 № 494 : станом на 3 трав. 2025 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/494-2013-п#Text>
8. Commission Implementing Regulation (EU) 2023/1695 of 10 August 2023. TSI CCS – Control, Command and Signalling. *Official Journal of the European Union*. 2023. URL: https://eur-lex.europa.eu/eli/reg_impl/2023/1695/oj
9. Fischer S., Kurhan M., Kurhan D. Innovative Technologies and Cognitive Factors for Enhancing Safety of Train and Car Movement at Level Crossings. *Proceedings of the 3rd Cognitive Mobility Conference (COGMOB 2024)*. 2024. P. 1–13. Springer, Cham. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-81799-1_1
10. Human factors in railway safety. ERA Report. *European Union Agency for Railways*. Valenciennes, 2018.
11. ISO 31000:2018. Risk management. Guidelines. Geneva: International Organization for Standardization, 2018.
12. ISO 9241-210:2019. Ergonomics of human-system interaction. Part 210: Human-centred design for interactive systems. Geneva: International Organization for Standardization, 2019. 13 p.
13. Kyriakidis M., Pak K. T., Majumdar A. Railway Accidents Caused by Human Error: Historic Analysis of UK Railways, 1945 to 2012. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. 2015. Vol. 2476, Iss. 1. P. 98–107. DOI: <https://doi.org/10.3141/2476-17>
14. Road Safety Annual Report 2024. *International Transport Forum*. 2024. 82 p. URL: <https://www.itf-oecd.org/sites/default/files/docs/irtad-road-safety-annual-report-2024.pdf>
15. Stanton N. A., Salmon P. M., Rafferty L. A., Walker G. H., Baber C., Jenkins D. P. *Human Factors Methods: A Practical Guide for Engineering and Design*. 2nd ed. Boca Raton : CRC Press, 2017. 656 p. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781315587394>
16. UIC Safety Level Crossing Index. *International Union of Railways (UIC)*. Paris : UIC, 2016.

M. B. KURHAN^{1*}, R. V. IVANOV²

^{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 m.b.kurhan@ust.edu.ua, 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 ivanovrodion@ukr.net, ORCID 0009-0005-9125-9468

Comprehensive Hazard Assessment of Railway–Road Level Crossings Considering the Cognitive Factor

Purpose. The purpose of the study is to develop a diagnostic system for assessing the hazard level of railway level crossings based on a multifactor risk analysis within a structured set of criteria. To achieve this purpose, domestic and international regulatory documents governing the design and operation of at-grade railway–road crossings were reviewed, and their operational and economic characteristics were assessed. **Methodology.** The proposed methodology

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

is aimed at increasing the level of detail and the informativeness of hazard assessment at the stage of practical application. Its diagnostic value lies in providing a basis for planning targeted, site-specific safety measures intended to eliminate particular hazard factors. It is shown that incorporating the cognitive factor enables more accurate ranking of level crossings and forms a rationale for substantiating targeted measures to improve traffic safety. **Finding.** The proposed comprehensive hazard assessment methodology, which incorporates the cognitive factor, was tested on a sample of railway level crossings. Based on aggregated tabular results, two crossings were classified as high-risk, one as elevated-risk, and one as moderate-risk, according to the assessment indicator structure (MSZ, KD, cognitive hazard coefficient, and integrated hazard index). Comparative analysis confirmed that inclusion of the cognitive factor significantly affects the integrated hazard index and enables identification of facilities with increased risk under moderate traffic dynamics, taking into account the influence of drivers' cognitive dissonance and cognitive load. The high-risk class is associated with information-environment overload and contradictory signals as factors that contribute to hazardous situations. The results justify prioritizing measures such as improving signalling logic, unifying signal indications, increasing conspicuity, and reducing visual noise, and indicate that these measures can be implemented without substantial capital expenditure. **Originality.** For the first time, a multifactor methodology for assessing cognitive hazard at railway level crossings has been developed, based on integrating driver psychophysiological factors (cognitive load, cognitive dissonance, fatigue) into the overall risk calculation system. Unlike existing regulatory approaches, the proposed methodology makes it possible to diagnose specific causes of cognitive risk and to determine the priority of targeted measures aimed at reducing the probability of driver error. **Practical value.** In situations where the physical parameters of a railway level crossing (number of tracks, spatial layout, pavement type, presence and type of signalling) are technically or economically difficult to change, the methodology provides a tool for optimizing the information environment within the existing infrastructure. This makes it possible to address traffic-safety aspects that are not covered by current regulatory documents.

Keywords: railway level crossing; traffic safety; diagnostics; cognitive hazard; cognitive dissonance; psychophysiological factors

REFERENCES

1. *Bezpeka dorozhnogo rukhu. Znaky dorozhni. Zahalni tekhnichni umovy. Pravyla zastosuvannia, 144 DSTU 4100:2021.* (2021). (in Ukrainian)
2. *Bezpeka dorozhnogo rukhu. Rozmitka dorozhnia. Zahalni tekhnichni umovy, 102 DSTU 2587:2021.* (2021). (in Ukrainian)
3. *Budivli ta sporudy. Vyznachennia klasu naslidkiv (vidpovidalnosti), 17 DSTU 8855:2019.* (2019). (in Ukrainian)
4. Kurhan, M. B., Luzhytskyi, O. F., Ivanov, R. V., Khmelevska, N. P., & Khmelevskiy, 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)
5. Ministerstvo transportu ta zviazku Ukrainy. (2007). *Pro zatverdzhennia Instruksii z ulashtuvannia ta ekspluatatsii zaliznychnykh pereizdiv.* Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0162-07#Text> (in Ukrainian)
6. Ministerstvo transportu Ukrainy. (2013). *Pro zatverdzhennia Pravyl tekhnichnoi ekspluatatsii zaliznyts Ukrainy.* Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0050-97#Text> (in Ukrainian)
7. Kabinet Ministriv Ukrainy. (2013). *Pro zatverdzhennia Tekhnichnogo rehlamentu bezpeky infrastruktury zaliznychnoho transportu.* Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/494-2013-п#Text> (in Ukrainian)
8. Commission Implementing Regulation (EU) 2023/1695 of 10 August 2023. TSI CCS – Control, Command and Signalling. (2023). *Official Journal of the European Union.* Retrieved from https://eur-lex.europa.eu/eli/reg_impl/2023/1695/oj (accessed: 15.02.2026). (in English)
9. *European Union Agency for Railways.* (2018). Human factors in railway safety. ERA Report. Valenciennes, France.
10. Fischer, S., Kurhan, M., & Kurhan, D. (2024). Innovative Technologies and Cognitive Factors for Enhancing Safety of Train and Car Movement at Level Crossings. *Proceedings of the 3rd Cognitive Mobility Conference (COGMOB 2024)*, 1-13. Springer, Cham. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-81799-1_1 (in English)
11. *Risk management. Guidelines, ISO 31000:2018.* (2018). (in English)
12. *Ergonomics of human-system interaction. Part 210: Human-centred design for interactive systems, ISO 9241-210:2019.* (2019). (in English)

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

13. Kyriakidis, M., Pak, K. T., & Majumdar, A. (2015). Railway Accidents Caused by Human Error: Historic Analysis of UK Railways, 1945 to 2012. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2476(1), 98-107. DOI: <https://doi.org/10.3141/2476-17> (in English)
14. *International Transport Forum*. (2024). Road Safety Annual Report 2024. Retrieved from <https://www.itf-oecd.org/sites/default/files/docs/irtad-road-safety-annual-report-2024.pdf> (in English)
15. Stanton, N. A., Salmon, P. M., Rafferty, L. A., Walker, G. H., Baber, C., & Jenkins, D. P. (2017). *Human Factors Methods: A Practical Guide for Engineering and Design*. Boca Raton: CRC Press. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781315587394> (in English)
16. *International Union of Railways*. (2016). UIC Safety Level Crossing Index. Paris, France: UIC.

Надійшла до редколегії: 04.12.2025

Дата рецензування: 26.12.2025

Дата публікації: 27.03.2026