

УДК 656.259.2:159.9.072

ІНЖЕНЕРНО-ПСИХОЛОГІЧНИЙ АНАЛІЗ КОГНІТИВНИХ ПРОЦЕСІВ ВОДІЯ НА ЗАЛІЗНИЧНИХ ПЕРЕЇЗДАХ

Д-р техн. наук М. Б. Курган, асп. Р. В. Іванов

ENGINEERING AND PSYCHOLOGICAL ANALYSIS OF DRIVER COGNITIVE PROCESSES AT RAILWAY LEVEL CROSSINGS

Dr. Sc. (Tech.) M. Kurhan, postgraduate student R. Ivanov

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.216.2026.362512>



Анотація. У статті виконано інженерно-психологічний аналіз когнітивного навантаження водія на залізничних переїздах з урахуванням просторового розміщення сигналів і технічних засобів організації руху. Запропоновано просторово-когнітивну модель, що описує зміну навантаження залежно від відстані до небезпечної зони та послідовності сприйняття знаків, світлофорів і шлагбаума. Виділено критичні ділянки підвищеного когнітивного стресу та обґрунтовано прояв тунельного ефекту уваги як психологічного механізму звуження поля сприйняття і концентрації на домінуючих стимулах у зоні максимальної небезпеки, що підвищує чутливість до основних сигналів, але водночас може зменшувати контроль другорядних факторів (транспорт поруч, стан покриття тощо). Порівняно варіанти переїздів із різною кількістю і структурою колій і сформовано рекомендації з оптимізації розміщення сигналів із метою зниження ризику помилкових рішень водія. Практичне значення отриманих результатів полягає в можливості науково обґрунтованого розміщення попереджувальних знаків і технічних засобів на переїздах для зниження пікових значень когнітивного навантаження, зменшення імовірності помилкових рішень у критичних зонах і, як наслідок, підвищення безпеки дорожнього руху.

Ключові слова: залізничний переїзд, когнітивне навантаження, інженерна психологія, розміщення сигналів, тунельний ефект уваги, поведінка водія, багатоколіїність, безпека руху.

Abstract. This paper presents an engineering psychology analysis of driver cognitive load at railway level crossings with a focus on how the spatial placement of warning cues affects perception,

ISSN (p) 1994-7852

ISSN (online) 2413-3795

© Курган М. Б., Іванов Р. В., 2026.

attention, and decision-making. A level crossing is treated as an information environment in which the driver sequentially receives stimuli (advance warning signs, light signals, stop line cues, barrier position and related visual elements) while approaching a hazardous zone under time constraints. The aim of the study is to establish relationships between the spatial arrangement of these devices and the dynamics of cognitive load, and to identify the approach segments where the probability of decision errors is most likely to increase.

The methodology combines a systems approach and cognitive analysis with mathematical modelling and numerical computation. A spatial–cognitive model is developed to describe cognitive load as a function of distance to the crossing and the sequence and density of signals within the driver’s perceptual field. Based on the model and cognitive mapping, characteristic stages of the approach are distinguished. The results indicate that cognitive load remains low to moderate at long approach distances (initial hazard detection and expectation formation), increases as the driver refines situation awareness and prepares for a possible stop, and reaches a peak in the immediate pre-crossing zone where the stop/go decision must be made under limited time. The peak segment is associated with the attention tunneling effect, i.e., a narrowing of attentional focus toward dominant cues (signals and barrier-related stimuli), which can improve responsiveness to primary warnings while reducing monitoring of secondary but safety-relevant factors (adjacent traffic, pedestrians, pavement condition).

A comparative assessment of crossings with different numbers and structures of tracks shows a nonlinear growth of cognitive complexity as track count increases. In particular, a multi-track configuration split into two blocks (2+2) creates two successive stress peaks and is cognitively more demanding than a single-block multi-track configuration. The obtained findings support evidence-based recommendations for optimizing signal placement and warning timing: reducing information overload in the critical segment, establishing a clear visual hierarchy of cues, and shifting part of information provision to longer approach distances. The proposed model can serve as a basis for modernization of level crossings and for further validation through field observations, reaction-time experiments, and simulation studies.

Keywords: railway level crossing, driver cognitive load, engineering psychology, signal placement, attention tunneling, driver decision-making, multi-track crossings, road safety, warning timing.

Вступ. Залізничні переїзди є критичними елементами транспортної інфраструктури, оскільки поєднують у межах одного об’єкта дві різні за динамікою та правилами безпеки підсистеми — залізничну і автомобільну. Наслідки аварій на переїздах часто мають підвищену тяжкість через значну масу та гальмівний шлях поїзда, обмеження оглядовості та часового ресурсу водія для ухвалення рішення. За даними європейської статистики, у 2024 році понад чверть смертельних випадків унаслідок залізничних аварій у ЄС сталося саме на переїздах (25,5 %).

Європейський досвід також показує, що, незважаючи на загальний високий рівень безпеки залізниць, динаміка

показників з аварійності на переїздах не демонструє стабільного покращення. Після певного зниження аварійності у 2010–2016 роках надалі спостерігали, але рідше, стагнацію тренду (2017–2022), а результати на сьогодні суттєво розрізняються між країнами залежно від стратегії управління переїздами та рівня їх захисту. У США, за даними FRA (узагальнено Operation Lifesaver), у 2025 році зафіксовано 1 870 зіткнень на переїздах, що призвело до 247 загиблих і 632 травмованих. Це підкреслює глобальний характер проблеми та необхідність комплексних рішень.

В Україні актуальність підвищення транспортної безпеки додатково посилена курсом на відновлення та модернізацію

інфраструктури за принципом «build back better» і гармонізацію зі стандартами ЄС. Зокрема, Постанова КМУ № 1550 від 27.12.2024 року, за якою схвалено Національну транспортну стратегію до 2030 року та операційний план її реалізації у 2025–2027 роки, прямо орієнтує галузь на модернізацію інфраструктури з урахуванням стандартів безпеки та євроінтеграційних вимог.

Попри розвиток технічних засобів організації руху та систем переїзної сигналізації, більшість небезпечних подій на залізничних переїздах пов'язана з людським фактором. Аналіз статистичних даних свідчить, що понад 85 % дорожньо-транспортних пригод стаються через помилкові дії водіїв: збої у сприйнятті інформації, зниження концентрації уваги, хибне оцінювання ризиків та ухвалення рішень в умовах дефіциту часу. Часто це обумовлено невідповідністю інформаційного навантаження психофізіологічним можливостям людини.

Відтак, для ефективного зниження аварійності недостатньо розглядати переїзд лише як технічний об'єкт. Його необхідно аналізувати як складне інформаційне середовище, у якому водій формує ситуаційну обізнаність і вибирає модель поведінки.

В умовах повоєнного відновлення України та інтеграції в європейську транспортну мережу (TEN-T) залізничні переїзди стають об'єктами критичної інфраструктури класу наслідків **СС3**. Цифровізація діагностики та перехід до «Smart-інфраструктури» на основі IoT-датчиків і алгоритмів штучного інтелекту потребують нових підходів. За цих умов технічний стан колії та настилу розглядають у нерозривному зв'язку з психофізіологічними можливостями водія, де система адаптивно змінює режими інформування відповідно до рівня поточного когнітивного навантаження людини.

Метою статті є інженерно-психологічний аналіз когнітивних процесів водія на залізничних переїздах і

обґрунтування того, як просторове розташування сигналів і засобів організації руху впливає на динаміку когнітивного навантаження під час наближення до небезпечної зони.

Об'єктом дослідження є взаємодія водія з інформаційним середовищем переїзду.

Предмет дослідження – залежність когнітивного навантаження від просторової конфігурації елементів переїзду та параметрів під'їзду до нього.

Практичне значення отриманих результатів полягає у формуванні підходів щодо проєктування і модернізації переїздів з урахуванням психофізіологічних можливостей водія, що допомагає зменшити ймовірність ухвалення помилкових рішень у критичних зонах.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У сучасних дослідженнях безпеки на залізничних переїздах сформовано кілька взаємодоповнюючих напрямів.

1. Стратегічно-нормативний і статистичний підхід. Оглядові матеріали та статистика на рівні ЄС свідчать, що аварійність на залізницях суттєво пов'язана з інцидентами на переїздах і користувачами переїздів як окремою категорією ризику, що потребує цільових заходів із боку інфраструктури та регуляторів [1]. Для США відкриті статистичні зведення (FRA grade crossing statistics у поданні Operation Lifesaver) також підтверджують сталу актуальність проблеми зіткнень на переїздах [2]. Документ СЕК ООН [3], підготовлений групою експертів із безпеки на переїздах, пропонує рамкове оцінювання стану безпеки та підходи щодо формування стратегії її покращення. Для України актуальність комплексного підходу закріплена Національною транспортною стратегією до 2030 року та операційним планом реалізації (2025–2027), що задає орієнтири модернізації інфраструктури з пріоритетом безпеки [4].

2. Кількісне оцінювання ризику та інструменти підтримки рішень. Суттєвий пласт робіт присвячено ризик-

орієнтованому управлінню безпекою на залізничному транспорті, зокрема в межах процедур технічного аудиту і пріоритизації втручань. Наприклад, у роботі [5] запропоновано операційну модель управління ризиками під час технічного аудиту безпеки руху. У статті [6] розглянуто інструмент кількісного (risk-based) обґрунтування рішень щодо вибору заходів управління ризиками на переїздах, що важливо для порівняння альтернатив модернізації за обмежених ресурсів.

3. Технологічні рішення (моніторинг, контроль працездатності попереджувальних засобів). Паралельно з ризик-орієнтованими моделями розвиваються технологічні підходи щодо підвищення надійності роботи переїзних систем і їх обслуговування. Зокрема, у роботі [7] продемонстровано застосування методів глибинного навчання для інтелектуального контролю роботи попереджувальних звукових сигналів (дзвінків) на переїздах як елемента «smarter maintenance». На рівні програм підтримки та практичних заходів у США увагу приділено фінансуванню і технічній допомозі для проєктів підвищення безпеки на переходах/переїздах, включно з інфраструктурними рішеннями (бар'єрні системи тощо) [8].

4. Людський фактор та інженерна психологія (сприйняття, увага, ухвалення рішення). Окремий напрям досліджень пов'язаний з аналізом когнітивних факторів і поведінкових механізмів користувачів транспортної системи, які можуть зумовлювати помилкові дії навіть за наявності технічних засобів попередження. У прикладному аспекті досліджено вподобання водіїв щодо інтелектуальних аудіовізуальних попереджень у транспортному засобі для сценаріїв highway-rail grade crossing, що відкриває можливості цільового інформаційного впливу в небезпечних ситуаціях [9, 10]. Огляд [11] узагальнює проблематику когнітивних наслідків застосування систем попередження та технологій керування

рухом (передусім у контексті операторів/керування поїздами) і є корисним для обґрунтування підходів «людина–техніка–середовище». Для ширшого контексту безпеки дорожнього руху важливими є результати, що пов'язують індивідуальні когнітивні характеристики і стиль керування з ризиком ДТП [12].

5. Нерозв'язана частина проблеми та місце цієї роботи. Незважаючи на прогрес у ризик-менеджменті й технологічному оснащенні, у літературі недостатньо формалізовано просторово-когнітивний аспект: як саме конфігурація та рознесення в просторі знаків, світлофорів, шлагбаума і меж небезпечної зони змінює когнітивне навантаження водія на різних етапах під'їзду (особливо для переїздів зі складнішою топологією/кількома коліями). Відповідно, бракує інженерно-психологічних рекомендацій, які б безпосередньо пов'язували схему розташування технічних засобів із профілем навантаження та ризиком помилкових дій. Саме на заповнення цієї прогалини спрямоване подане дослідження.

6. Перспективою розвитку запропонованих моделей є їхня інтеграція в інтелектуальні транспортні системи (ITS) на основі алгоритмів штучного інтелекту [7]. Зокрема, використання згорткових і рекурентних нейронних мереж (CNN, LSTM) для обробки відеоданих у реальному часі допоможе автоматично верифікувати розраховані рівні когнітивного навантаження, виявляючи патерни небезпечної поведінки водіїв (запізніле гальмування, хаотична траєкторія або дистракція уваги) у зонах критичного стресу. Застосування запропонованого комплексу методів у структурі Smart-інфраструктури дасть змогу ідентифікувати залізничні переїзди категорії C5 (екстремальна когнітивна небезпека) із критичним рівнем інформаційного навантаження на водія і адаптивно керувати засобами попередження для мінімізації ризиків ДТП.

В Україні модернізація переїздів та інтеграція транспортної системи з європейськими стандартами потребують комплексних рішень і технологічної модернізації інфраструктури [13, 14].

Проблема ДТП на переїздах є актуальною і за межами України: відкриті статистичні ресурси для США і ЄС підтверджують суттєві масштаби інцидентів і наслідків на переїздах [1, 2] (рис. 1).

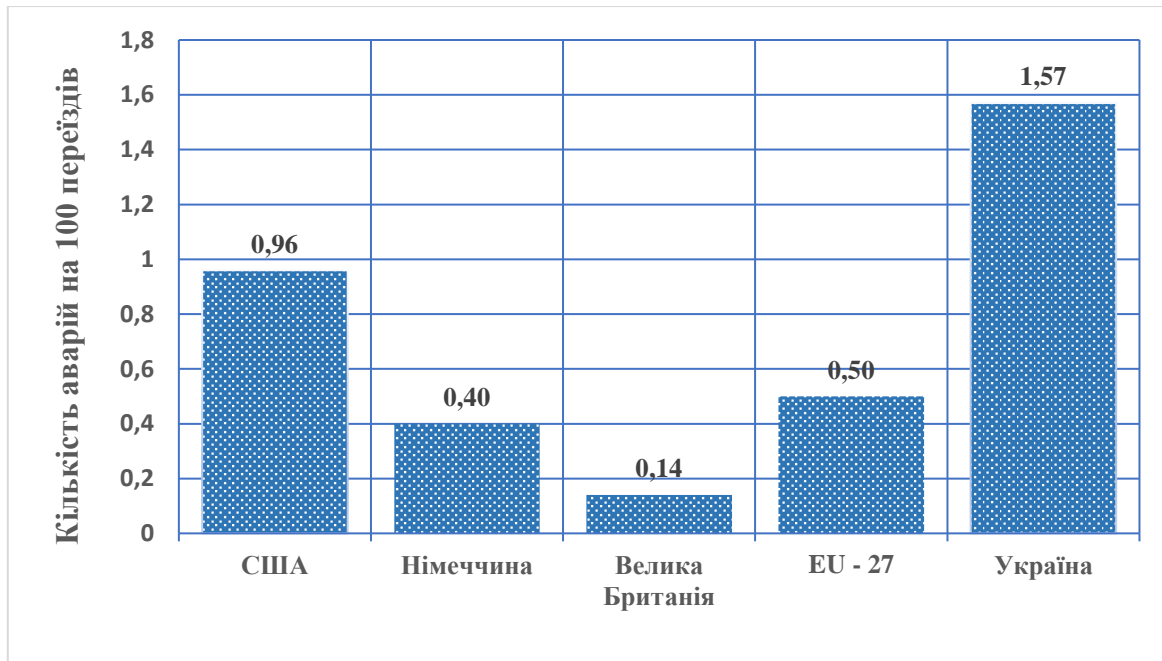


Рис. 1. Аварійність на залізничних переїздах (2023-2024 роки)

Короткий огляд наукових праць мав на меті визначити основні фактори і їхній вплив на ризики, що мають місце в багатьох країнах із розв'язанням проблем безпеки на залізничних переїздах, і встановити сучасні інноваційні технології, застосування яких буде ефективним на мережі залізниць України.

Незважаючи на значний прогрес у ризик-менеджменті та технологічному оснащенні, у літературі недостатньо формалізовано саме просторово-когнітивний аспект: як конфігурація та рознесення в просторі знаків, світлофорів, шлагбаумів і меж небезпечної зони змінює когнітивне навантаження водія на різних етапах проїзду переїздів (особливо для переїздів зі складнішою топологією, кількома коліями). Розрахунок динаміки когнітивного ресурсу є важливим етапом інженерно-психологічного аналізу, оскільки він допомагає встановити межі психофі-

зіологічної відповідності інформаційного середовища переїзду можливостям людини. У той же час бракує інженерно-психологічних рекомендацій, які б безпосередньо пов'язували схему розташування технічних засобів із профілем навантаження/ризиком помилкових дій. Саме на заповнення цієї прогалини спрямоване це дослідження.

Визначення мети та Завдання дослідження. Метою роботи є інженерно-психологічний аналіз когнітивних процесів водія під час наближення до залізничного переїзду та його проїзду з урахуванням інформаційного середовища переїзду. Дослідження спрямоване на встановлення кількісного зв'язку між просторовим розташуванням технічних засобів організації руху (попереджувальних знаків, переїзної світлофорної сигналізації, шлагбаумів) і динамікою когнітивного навантаження водія на різних відстанях до

небезпечної зони. Кінцевою метою є розроблення науково обґрунтованих рекомендацій з оптимізації просторової конфігурації цих елементів для зниження ризику помилкових рішень і, як наслідок, зменшення імовірності ДТП на переїздах.

Для досягнення поставленої мети в роботі вирішено такі завдання:

1. Когнітивний аналіз наявних схем розміщення попереджувальних знаків, переїзної сигналізації та шлагбаума на підході до залізничного переїзду як системи інформаційних стимулів для водія.

2. Розроблено просторово-когнітивну модель, що описує залежність рівня когнітивного навантаження водія від відстані до небезпечної зони переїзду та послідовності появи сигналів у полі сприйняття.

3. Визначено критичні ділянки підвищеного когнітивного навантаження (когнітивного стресу) та обґрунтовано їхній зв'язок із процесами ухвалення рішення водієм за дефіциті часу.

4. Змодельовано та порівняно вплив різних варіантів просторового розташування технічних засобів (а також кількості/структури колій) на динаміку когнітивного навантаження водія.

5. Сформовано науково обґрунтовані рекомендації з оптимізації просторового розміщення технічних засобів організації руху на переїзді з метою зниження імовірності помилкових дій водія та підвищення безпеки руху.

6. Обґрунтовано можливість інтеграції розробленої просторово-когнітивної моделі в інтелектуальні транспортні системи (ITS) із використанням алгоритмів комп'ютерного зору і штучного інтелекту для автоматизованої верифікації моделей і корегування сигналізації в реальному часі.

Основна частина дослідження.

Дослідження базовано на системному та інженерно-психологічному аналізі поведінки водія в умовах залізничного переїзду. Для оцінювання впливу просторового розташування сигналів на когнітивне навантаження застосовано математичне моделювання та

чисельні методи розрахунку з використанням програмного забезпечення. Реалізація методики забезпечила розв'язання наведених завдань через формування когнітивних карт, побудову просторово-когнітивної моделі, виявлення критичних зон, порівняння варіантів і розроблення практичних рекомендацій.

Застосований підхід дає змогу кількісно оцінити вплив візуальної та інформаційної організації простору переїзду на ухвалення рішення водієм, а також інтерпретувати прояв тунельного ефекту уваги в зоні максимальної небезпеки. Використано такі підходи та моделі.

1. Просторово-когнітивна модель. План-схема переїзду з прив'язкою відстаней до дорожніх знаків, світлофорів, шлагбаума і меж небезпечної зони інтерпретовано як когнітивне середовище, що задає часову послідовність стимулів. Головною є відстань, на якій водій уперше сприймає інформаційні об'єкти (попереджувальні знаки, стоп-лінію, сигнал світлофора, положення шлагбаума), оскільки це допомагає оцінити час на реакцію та зміну когнітивного навантаження залежно від «щільності» сигналів.

2. Когнітивні карти і сценарії сприйняття. Схема «попередження → підтвердження безпеки → бар'єр» (знаки → світлофор → шлагбаум) використана для формування когнітивної карти маршруту, де кожен об'єкт є тригером активації уваги. Оцінено ризик інформаційного перевантаження у випадку концентрації великої кількості стимулів на короткій ділянці та ризик «пропускання» критичного сигналу за конкуренції стимулів.

3. Когнітивна ергономіка (таймінг попереджень). Виділені інтервали (зокрема 286, 182 і 89 м) трактують як відрізки, що забезпечують проходження стадій «сприйняття → розуміння → дія». Окремо розглянуто варіативність реакцій залежно від досвіду водія, його функціонального стану та умов руху (стрес, нічний час, інтенсивний трафік тощо).

Для апробації запропонованого підходу як приклад розглянуто групу залізничних переїздів на електрифікованому напрямку Козятин–Жмеринка регіональної філії «Південно-Західна залізниця», де переїзди розташовані з інтервалом 7–12 км і мають різну топологію і кількість колій (перетини через одну, дві, три і чотири колії). Для кожного об'єкта використано план-схему із фіксацією положення знаків, світлофорів, шлагбаумів та елементів

під'їзду, що дало змогу сформувати порівняльний набір із п'яти варіантів і побудувати когнітивні карти навантаження. Розглянуто п'ять варіантів. У першому варіанті переїзд розташований на одноколіїному перегоні Вінниця-Вороновиці (рис. 2), у другому варіанті - на двоколіїному одноколіїному перегоні Вінниця-Вороновиці (рис. 3). Когнітивна карта навантаження на переїзді через одну і дві колії наведена на рис. 4.

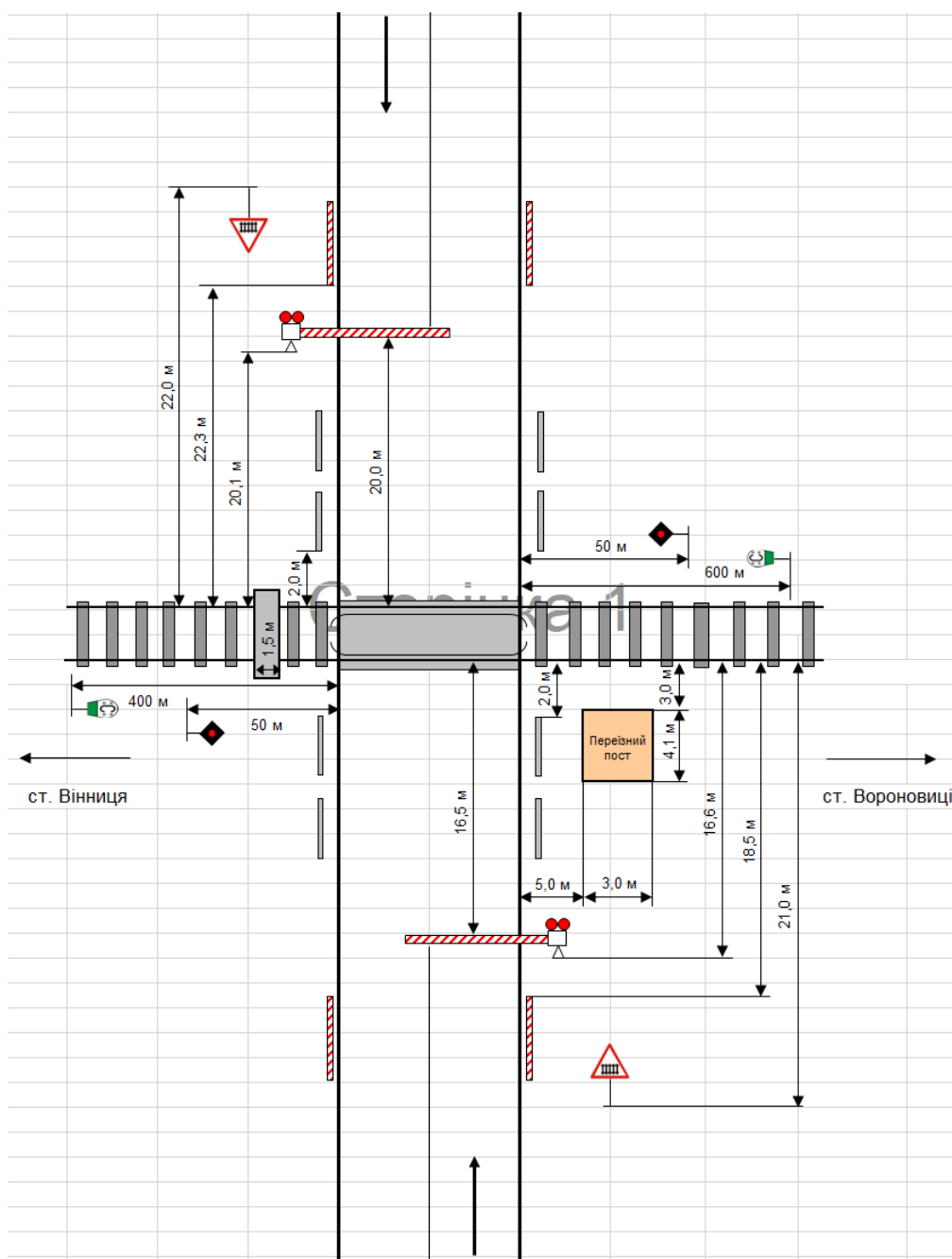


Рис. 2. План-схема залізничного переїзду (перегін Вінниця - Вороновиці)

поведінку водія. На когнітивній карті (2), що включає схему переїзду, на якій відображена послідовність сигналів і стимулів, сформовано маршрут водія, де кожний знак є тригером активації уваги. На схемі (рис. 4) наведено результати

когнітивного аналізу розташування попереджувальних знаків, світлофорів і шлагбаума на під'їзді до залізничного переїзду, рівні навантаження позначено від низького (зелений колір) до критичного (червоний колір).

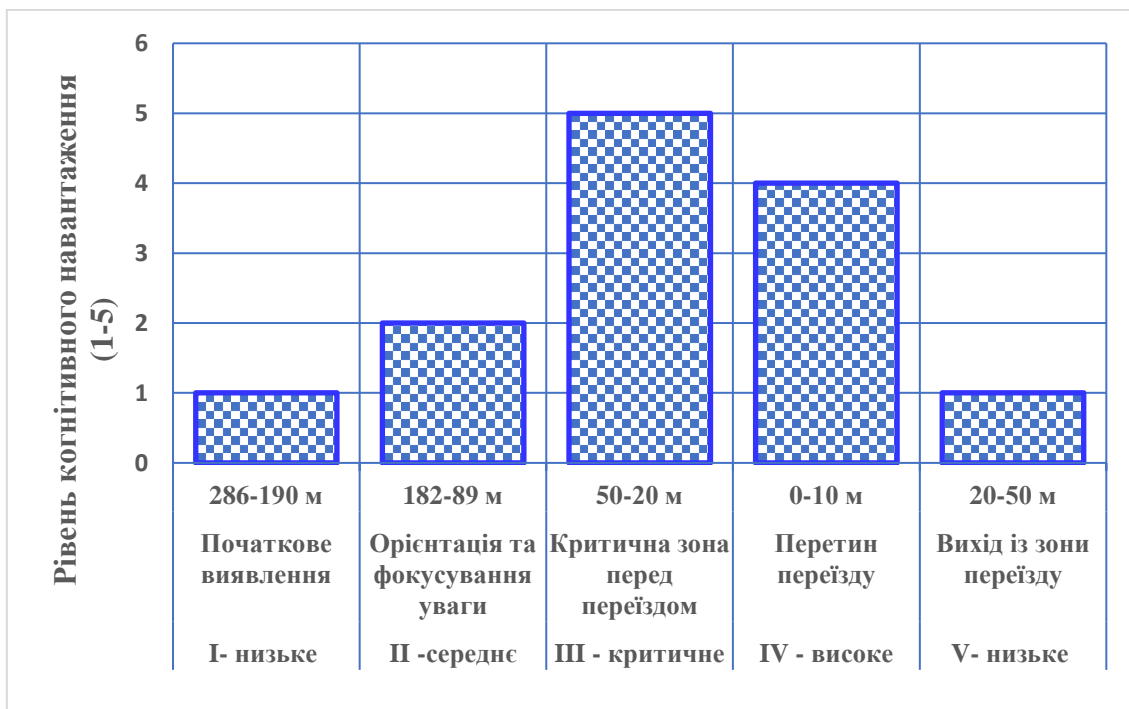


Рис. 4. Когнітивна карта з рівнями когнітивного навантаження

Когнітивна карта демонструє зміну навантаження водія залежно від щільності та послідовності появи інформаційних стимулів у просторі. Для інтерпретації отриманих результатів використано підхід когнітивної ергономіки (3), який розглядає просторові інтервали як «таймінг попереджень», тобто такі відстані, що забезпечують проходження базових стадій: *сприйняття* → *розуміння* → *дія*. На підставі аналізу виділено п'ять функціональних етапів (інтервали подано орієнтовно):

286–182 м – початкове виявлення потенційної небезпеки (перші попереджувальні стимули);

182–89 м – орієнтація та фокусування уваги, уточнення ситуації, формування готовності до зупинки;

50–20 м – критична зона перед переїздом (інтенсивна обробка сигналів, ухвалення рішення «зупинитися/продовжити рух»);

0–10 м – безпосередній перетин переїзду (максимальна концентрація, обмежений часовий ресурс);

після 20–50 м – вихід із небезпечної зони та поступове відновлення базового рівня уваги.

На рис. 5 наведена лінійна діаграма, яка показує динаміку когнітивного навантаження водія на під'їзді до переїзду через одну, дві, три і чотири колії.

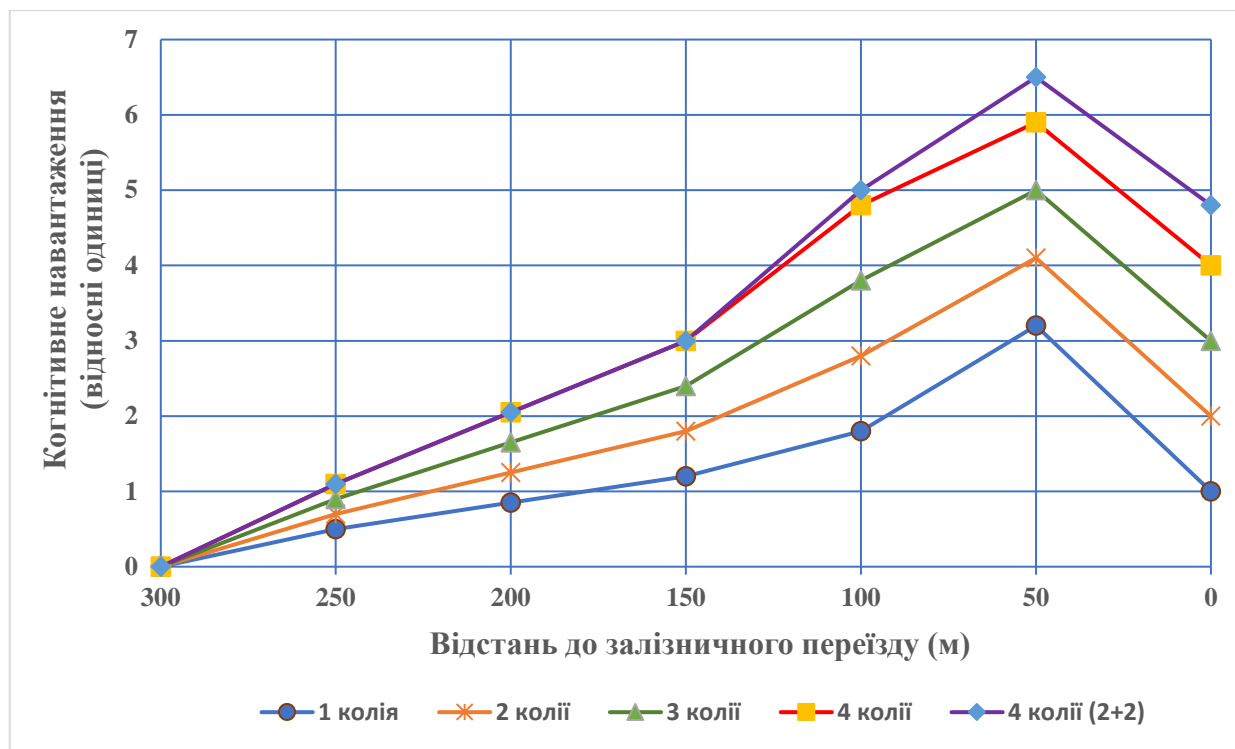


Рис. 5. Крива когнітивного навантаження водія під час під'їзду до переїзду

Із рис. 5 видно, що когнітивне навантаження зростає з наближенням до переїзду, досягає максимуму в зоні 50 м, а після перетину залізничної колії знижується. Узагальнення для одного та двоколісного переїздів показує, що на дальніх підходах (286–182 м) навантаження переважно низьке або середнє (фаза первинного очікування). У зоні 182–89 м відбувається перехід до середньо-високого рівня, що пов'язано з уточненням залишкової відстані та підготовкою до гальмування/зупинки.

Максимум навантаження формується в зоні 50–20 м, коли водій обробляє найбільший обсяг інформації та ухвалює важливе рішення в умовах дефіциту часу, що підвищує ймовірність помилкових дій. Під час безпосереднього перетину переїзду спостерігають високий рівень концентрації,

який може бути супроводжений проявами тунельного ефекту уваги.

У наступних варіантах розглянуто переїзди через три колії (ст. Голендри), чотири колії одним блоком (ст. Гулівці) і чотири колії у два блоки 2+2 (ст. Варшиця). Порівняльні результати оцінювання щодо когнітивної складності наведено в табл. 1.

Ділянки, які на когнітивних картах позначені як критичні (зона 50–20 м перед шлагбаумом і зона самого перетину), відповідають пікам когнітивного навантаження водія (рис. 5). У цей момент водій здійснює максимальну кількість когнітивних операцій: сприйняття сигналів, оцінювання ситуації, вибір стратегії та виконання дії.

На рис. 6 наведено узагальнену схему когнітивних процесів водія під час взаємодії з інформаційним середовищем переїзду.

Когнітивне навантаження на переїздах залежно від кількості колій та розташування

Варіант переїзду	Структура та кількість колій	Когнітивне навантаження	Особливості сприйняття та ухвалення рішень	Основні ризики	Загальна оцінка
Переїзд Вінниця-Вороновиця	Одна колія	Низьке	Контроль лише двох напрямків, чітка та проста когнітивна карта	Недооцінювання швидкості поїзда, легковажність через «спокійність» середовища	Найменш ризикований щодо когнітивного навантаження
Переїзд Кордишівка – Голендри	Дві паралельні колії, мінімум сигналів	Низьке/середнє	Контроль лише двох напрямків, зрозуміла структура; обробка сигналів не ускладнена	Недооцінювання швидкості поїзда, сприйняття ситуації як «безпечної»	Невисокий рівень ризику; базовий рівень когнітивного навантаження
Станція Голендри	Три паралельні колії, більше сигналів і світлофорів	Середнє/вище від середнього	Зростає кількість джерел інформації, збільшується тривалість перетину; потрібна складніша когнітивна карта	Інформаційний «шум», втрата концентрації, стрес за одночасного руху поїздів	Помірно складний, потребує дублювання сигналів і попереджувальних табло
Станція Гулівці	Чотири колії в один широкий масив (16,9 м)	Високе	Необхідність ухвалення одного критичного рішення перед довгим перетином; підвищений тунельний ефект	Інформаційне перевантаження, затримка реакції, помилки у визначенні безпечного інтервалу	Складний, але структурно передбачуваний; високий рівень когнітивного навантаження
Станція Варшиця (чотири колії, два блоки 2+2)	Чотири колії, розбиті на два блоки з проміжком	Надвисоке	Два пікових моменти когнітивного стресу: спершу перед першою парою колій, потім перед другою	Дезорієнтація («перша група вільна – друга зайнята»), подвійний стрес, довгий час перебування в небезпечній зоні	Найскладніший із розглянутих варіантів, когнітивно важчий за Гулівці



Рис. 6. Когнітивні процеси водія на залізничному переїзді

Пояснення до рис. 6. Водій отримує інформацію з оточення (сигнали світлофора, положення шлагбаума, звукові сигнали тощо), формує уявлення про ситуацію попереду та виділяє критичну зону. В умовах дефіциту часу можливе звуження поля уваги (тунельний ефект), коли фокус спрямований на домінуючий стимул, а другорядні фактори (пішоходи, бічний рух, стан покриття) оцінені гірше. На основі доступної інформації ухвалюють рішення (зупинка/продовження руху) і виконують дію (гальмування/прискорення), після чого увага поступово нормалізується.

Для математичної формалізації отриманих висновків вербальні оцінки когнітивного навантаження (дуже низьке, низьке, ..., критичне) зіставлено з умовною бальною шкалою 1–10 (табл. 2). На цій основі сформовано узагальнюючі показники:

K – умовний рівень когнітивного навантаження (у балах 1–10);

R – евристичний індикатор ризику ДТП/помилки (у балах 1–10), який відображає припущення, що за високих значень навантаження можливості компенсації з боку водія зменшуються. Зведені значення K та R для п'яти розглянутих варіантів наведено в табл. 3.

Таблиця 3

Когнітивне навантаження та рівень ризику (K , R)

Варіант переїзду	Кількість колій	Когнітивне навантаження K	Рівень ризику ДТП R	Короткі пояснення
1	2	3	4	5
Вінниця – Вороновиці	Одна колія	2	1	Одна колія – дуже просте середовище, невелике навантаження; ризик низький (водій легко контролює ситуацію)
Кордишівка – Голендри	Дві колії	4	3	Дві колії – помітне збільшення інформації; ризик зростає помірно через необхідність врахувати два напрямки

Продовження табл. 3

1	2	3	4	5
Станція Голендри	Три колії	7	6	Три колії – значне ускладнення когнітивної карти; збільшений час перебування у критичній зоні, вища ймовірність помилок
Станція Гулівці (1 блок)	Чотири колії (один широкий блок)	9	9	Чотири колії в єдиному блоці – дуже високе навантаження, тунельний ефект; ризик дуже високий
Станція Варшиця (2+2)	Чотири колії (два блоки 2+2)	10	10	Чотири колії, розбиті на два блоки – «подвоєний» піковий стрес; найвищий рівень навантаження і ризику

За даними табл. 3 отримано апроксимаційні залежності показників когнітивного навантаження K та евристичного індикатора ризику ДТП R від кількості колій x (рис. 7, 8). Залежності

апроксимовано квадратичними поліномами, що відображають нелінійне (прискорене) зростання навантаження і ризику зі збільшенням кількості колій:

Когнітивне навантаження

$$K(x) = -0.213x^2 + 3.387x - 1.400; R^2 = 0.990.$$

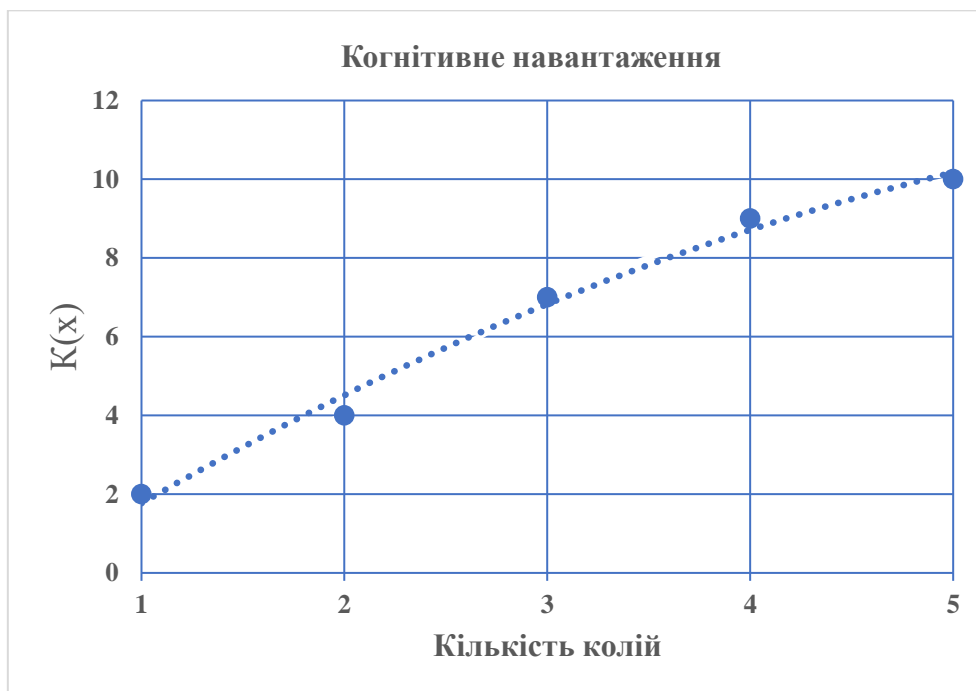


Рис. 7. Математична залежність когнітивного навантаження від кількості колій

Рівень ризику ДТП

$$R(x) = -0.140 x^2 + 3.260 x - 2.400; R^2 = 0.984.$$

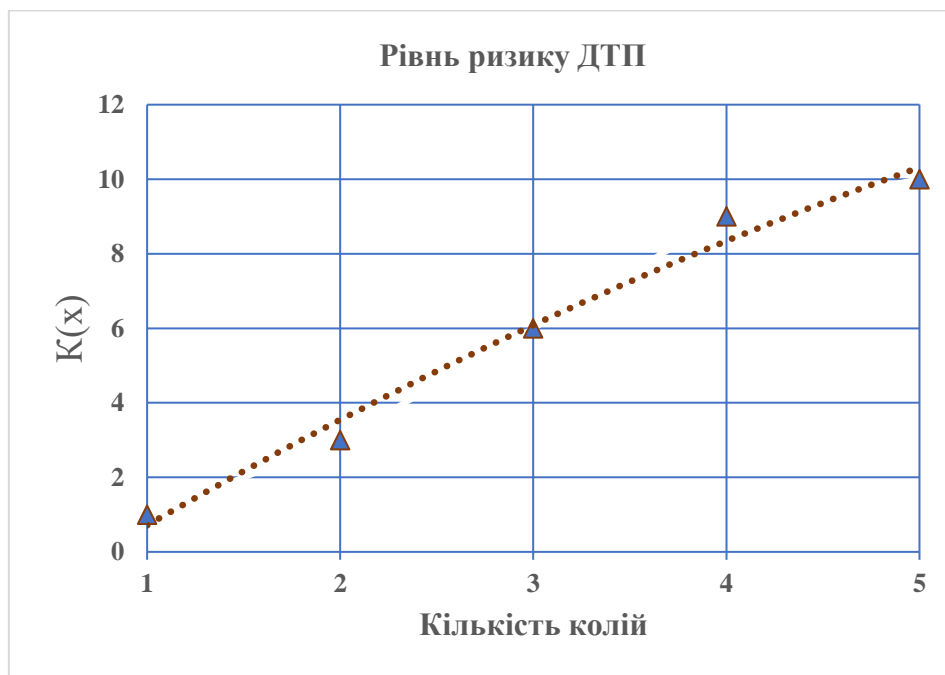


Рис. 8. Математична залежність ризику ДТП від кількості колій

Високі значення коефіцієнта детермінації свідчать, що вибрана квадратична модель добре описує наявні дані в межах розглянутого діапазону ($x = 1 \dots 5$), а також підтверджує нелінійний характер збільшення когнітивного навантаження та ризику з переходом від малоколійних переїздів до багатоколійних. Разом із тим значення K і R є умовними (евристичними) оцінками, тому запропоновані залежності доцільно розглядати як інструмент узагальнення тенденції та основу для подальшої валідації за результатами польових спостережень, експериментів або симуляцій.

На підставі отриманих результатів доцільними є такі напрями зниження пікового когнітивного навантаження:

1. Оптимізація інформаційного середовища:

- уникнення надмірного дублювання сигналів у зоні 50–20 м, щоб зменшити інформаційний шум;

- формування чіткої візуальної ієрархії: основні стимули (світлофор/шлагбаум) мають бути домінуючими, другорядні – не конкурувати за увагу.

2. Підсилення раннього попередження: підвищення інформативності дальніх підходів ($\approx 200\text{--}300$ м) із метою перенесення частини когнітивної роботи водія з критичної зони на більш «спокійні» відрізки під'їзду.

3. Підвищення помітності в складних випадках (три-чотири колії, 2+2): рішення, що скорочують невизначеність для водія та «пояснюють» структуру переїзду (особливо для 4 (2+2), де є два піки навантаження).

Проведений когнітивний аналіз схем розташування попереджувальних знаків, світлофорів і шлагбаумів на залізничних переїздах показав, що просторове розташування технічних засобів безпосередньо визначає динаміку когнітивного навантаження водія.

Безпосередній проїзд через переїзд супроводжено високим рівнем концентрації, зумовленим тунельним ефектом, тоді як після виходу з небезпечної зони спостерігають поступове зниження навантаження та відновлення стандартного режиму уваги.

Отримані результати узгоджені з положеннями сучасних досліджень у галузі інженерної психології та когнітивної ергономіки, які вказують на вирішальну роль людського фактора для гарантування безпеки руху на залізничних переїздах. Зростання когнітивного навантаження зі збільшенням кількості колій та ускладненням структури переїзду підтверджує гіпотезу про нелінійний характер впливу інформаційного середовища на поведінку водія.

Особливо небезпечними є переїзди з багатоколісною структурою, зокрема з поділом на блоки типу 2+2 (табл. 3), де сформовано декілька піків когнітивного стресу. У таких умовах прояв тунельного ефекту уваги посилений, що підвищує ймовірність помилкових рішень.

Запропонована просторово-когнітивна модель дає змогу розглядати план-схему переїзду не лише як інженерний об'єкт, а як елемент інформаційного впливу на водія, що відкриває нові можливості для оптимізації організації дорожнього руху та підвищення рівня безпеки.

Висновки

1. За результатами вирішення завдання 1 (когнітивний аналіз схем розміщення технічних засобів) встановлено, що просторова конфігурація попереджувальних знаків, переїзної сигналізації та шлагбаума визначає послідовність інформаційних стимулів для водія і безпосередньо впливає на профіль когнітивного навантаження під час під'їзду до переїзду та його перетину.

2. За результатами вирішення завдання 2 (побудова просторово-когнітивної моделі) показано, що зміна когнітивного навантаження має етапний характер і корелює з «таймінгом

попереджень»: на далеких підходах (≈ 286 – 182 м) навантаження є низьким/середнім (фаза первинного виявлення та формування очікування), у зоні ≈ 182 – 89 м зростає внаслідок уточнення ситуації та підготовки до можливої зупинки, а максимум формується перед переїздом у зоні ≈ 50 – 20 м.

3. За результатами вирішення завдання 3 (визначення критичних ділянок) встановлено, що критичною для ризику помилкових рішень є зона ≈ 50 – 20 м перед переїздом і фаза безпосереднього перетину, де водій ухвалює важливе рішення «зупинка/продовження руху» за дефіциту часу. Для цих ділянок характерний прояв тунельного ефекту уваги – звуження поля сприйняття з фокусуванням на домінуючих стимулах (світлофор, шлагбаум, наближення поїзда), що підвищує чутливість до головних сигналів, але зменшує повноту контролю другорядних факторів і може збільшувати ймовірність помилки.

4. За результатами вирішення завдання 4 (моделювання та порівняння варіантів) підтверджено нелінійне зростання когнітивного навантаження зі збільшенням кількості колій і ускладненням структури переїзду. Показано, що варіант з чотирма коліями, розбитими на два блоки (2+2), формує два пікових моменти когнітивного стресу та є когнітивно складнішим, ніж переїзд із чотирма коліями в одному блоці, навіть за однакової кількості колій.

5. За результатами вирішення завдання 5 (формування рекомендацій) обґрунтовано доцільність оптимізації розміщення технічних засобів з урахуванням «таймінгу попереджень» і недопущення перевантаження в зоні ≈ 50 – 20 м. Рекомендовано забезпечувати чітку візуальну ієрархію сигналів, переносити частину інформування на дальні підходи і враховувати структуру багатоколієних переїздів під час проєктування/модернізації з метою зниження ймовірності помилкових дій водія.

6. Практична значущість роботи полягає у створенні бази для аудиту безпеки. Перспективи подальших досліджень передбачають емпіричну валідацію запропонованої просторово-когнітивної моделі та шкал оцінювання на дільницях Козятин–Жмеринка і П'ятихатки–Дніпро. Для підтвердження розрахованих точок когнітивного стресу заплановано використання методів ай-трекінгу (eye-tracking), польових спостережень та експериментів (вимірювання часу реакції, частоти порушень, симуляції). Наступним кроком стане розширення моделі з урахуванням умов видимості, інтенсивності трафіку,

швидкісних режимів, типів переїздів і параметрів інфраструктури, що дасть змогу уточнити кількісні залежності та підвищити практичну точність рекомендацій.

Перспективи подальших досліджень полягають в емпіричній валідації запропонованої просторово-когнітивної моделі та шкал оцінювання на основі польових спостережень і/або експериментів (час реакції, частота порушень, симуляції), а також у розширенні моделі з урахуванням умов видимості, інтенсивності трафіку, швидкісних режимів, типів переїздів і параметрів інфраструктури, що дасть змогу уточнити кількісні залежності та підвищити практичну точність рекомендацій.

Список використаних джерел

1. European Commission, Eurostat. (2025). *Railway safety statistics in the EU (Data from December 2025)*. URL: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Railway_safety_statistics_in_the_EU
2. Operation Lifesaver, Inc. (n.d.). *Collisions & casualties by year (FRA grade crossing statistics, 1981–2025)*. URL: <https://oli.org/track-statistics/collisions-casualties-year>
3. United Nations Economic Commission for Europe. (2017). *Assessment of safety at level crossings in UNECE member countries and other selected countries and strategic framework for improving safety at level crossings (ECE/TRANS/WP.1/2017/4)*. URL: <https://unece.org/fileadmin/DAM/trans/doc/2017/wp1/ECE-TRANS-WP1-2017-4e.pdf>
4. Кабінет Міністрів України. (2024). *Про схвалення Національної транспортної стратегії України на період до 2030 року та затвердження операційного плану заходів з її реалізації у 2025–2027 роках*. № 1550. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1550-2024-%D0%BF/>
5. Bulakh, M., Okorokov, A. (2020). Operational model of risk management during the technical audit of traffic safety of railway transport. *Österreichisches Multiscience Journal*. 28. 50–55.
6. Di Graziano, A., Marchetta, V. (2024). Risk-based and quantitative decision-making tool for selecting effective traffic risk management actions at railway level crossings. *Applied Sciences*. 14 (19). 8630. <https://doi.org/10.3390/app14198630>
7. De Donato, L., Marrone, S., Flammini, F., Sansone, C., Vittorini, V., Nardone, R., Mazzariello, C., Bernaudin, M. (2023). Intelligent detection of warning bells at level crossings through deep transfer learning for smarter railway maintenance. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 123. 106405. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2023.106405>
8. U.S. Government Accountability Office. (2025). *Railway-highway crossings: Improvements needed to federal technical assistance about pedestrian projects related to trespassing (GAO-25-107115)*.
9. Walker, S. (2024). *Examining driver preferences for intelligent audiovisual warnings at highway-rail grade crossings*. Master's thesis, Michigan Technological University. <https://doi.org/10.37099/mtu.dc.etrdr/1786>

10. Carletti, V., Greco, A., Saggese, A., Vento, B. (2025). Improving safety through advanced obstacle detection at railway level crossings. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*. 16. 895–904. <https://doi.org/10.1007/s12652-025-04987-z>
11. Rad, M. A., Lefsrud, L., Hendry, M., Blais, D. (2021). *Literature review on cognitive impacts of cab warning systems and train control technologies*. <https://doi.org/10.7939/r3-gapp-mc47>
12. Nori, R., Zucchelli, M. M., Cordellieri, P., Quagliari, A., Palmiero, M., Guariglia, P., Giancola, M., Giannini, A. M., Piccardi, L. (2024). The prevention of road accidents in non-expert drivers: Exploring the influence of theory of mind and driving style. *Safety Science*. 175. 106516. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2024.106516>
13. Kurhan, M., Kurhan, D., Hmelevska, N. (2023). Analysis of feasibility for implementing European standard railway tracks in Ukraine. *Transport Means*. 605–610. <https://doi.org/10.5755/e01.2351-7034.2023.P2>
14. Курган, М. Б., Лужицький, О. Ф., Іванов, Р. В., Хмелевська, Н. П., Хмелевський, В. С. (2024). Упровадження інноваційних технологій під час модернізації наявних переїздів для організації швидкісного руху поїздів. *Наука та прогрес транспорту*. 1 (105). 62–83. <https://doi.org/10.15802/stp2024/303191>

References

1. European Commission, Eurostat. (2025). *Railway safety statistics in the EU (Data from December 2025)*. Retrieved from: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Railway_safety_statistics_in_the_EU
2. Operation Lifesaver, Inc. (n.d.). *Collisions & casualties by year (FRA grade crossing statistics, 1981–2025)*. Retrieved from: <https://oli.org/track-statistics/collisions-casualties-year>
3. United Nations Economic Commission for Europe. (2017). *Assessment of safety at level crossings in UNECE member countries and other selected countries and strategic framework for improving safety at level crossings (ECE/TRANS/WP.1/2017/4)*. Retrieved from: <https://unece.org/fileadmin/DAM/trans/doc/2017/wp1/ECE-TRANS-WP1-2017-4e.pdf>
4. Kabinet Ministriv Ukrainy. (2024). *Pro skhvalennia Natsionalnoi transportnoi stratehii Ukrainy na period do 2030 roku ta zatverdzhennia operatsiinoho planu zakhodiv z yii realizatsii u 2025–2027 rokakh* [On approval of the National Transport Strategy of Ukraine until 2030]. Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1550-2024-%D0%BF/> [in Ukrainian].
5. Bulakh, M., Okorokov, A. (2020). Operational model of risk management during the technical audit of traffic safety of railway transport. *Österreichisches Multiscience Journal*. 28. 50–55.
6. Di Graziano, A., & Marchetta, V. (2024). Risk-based and quantitative decision-making tool for selecting effective traffic risk management actions at railway level crossings. *Applied Sciences*. 14 (19). 8630. <https://doi.org/10.3390/app14198630>
7. De Donato, L., Marrone, S., Flammini, F., Sansone, C., Vittorini, V., Nardone, R., Mazzariello, C., & Bernaudin, M. (2023). Intelligent detection of warning bells at level crossings through deep transfer learning for smarter railway maintenance. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 123. 106405. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2023.106405>
8. U.S. Government Accountability Office. (2025). *Railway-highway crossings: Improvements needed to federal technical assistance about pedestrian projects related to trespassing (GAO-25-107115)*.
9. Walker, S. (2024). *Examining driver preferences for intelligent audiovisual warnings at highway-rail grade crossings*. Master's thesis, Michigan Technological University. <https://doi.org/10.37099/mtu.dc.etrdr/1786>

10. Carletti, V., Greco, A., Saggese, A., & Vento, B. (2025). Improving safety through advanced obstacle detection at railway level crossings. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*. 16. 895–904. <https://doi.org/10.1007/s12652-025-04987-z>
11. Rad, M. A., Lefsrud, L., Hendry, M., & Blais, D. (2021). *Literature review on cognitive impacts of cab warning systems and train control technologies*. <https://doi.org/10.7939/r3-gapp-mc47>
12. Nori, R., Zucchelli, M. M., Cordellieri, P., Quagliari, A., Palmiero, M., Guariglia, P., Giancola, M., Giannini, A. M., & Piccardi, L. (2024). The prevention of road accidents in non-expert drivers: Exploring the influence of theory of mind and driving style. *Safety Science*. 175. 106516. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2024.106516>
13. Kurhan, M., Kurhan, D., & Hmelevska, N. (2023). Analysis of feasibility for implementing European standard railway tracks in Ukraine. *Transport Means*. 605–610. <https://doi.org/10.5755/e01.2351-7034.2023.P2>
14. Kurhan, M. B., Luzhytskyi, O. F., Ivanov, R. V., Khmelevska, N. P., & Khmelevskyi, V. S. (2024). *Uprovadzhennia innovatsiinykh tekhnolohii pid chas modernizatsii naiavnykh pereizdiv dlia orhanizatsii shvydkisnoho rukhu poizdiv* [Implementation of innovative technologies in modernization of railway crossings for high-speed traffic]. *Nauka ta prohres transportu. 1* (105). 62–83. <https://doi.org/10.15802/stp2024/303191> [in Ukrainian].

Курган Микола Борисович, доктор технічних наук, професор кафедри транспортної інфраструктури, Український державний університет науки і технологій. ORCID iD: 0000-0002-8182-7709.
Тел.: +38 (056) 373-15-48. E-mail: m.b.kurhan@ust.edu.ua.

Іванов Родіон Вікторович, аспірант кафедри транспортної інфраструктури, Український державний університет науки і технологій. ORCID iD: 0009-0005-9125-9468. Тел.: +38 (056) 373-15-48. E-mail: ivanovrodion@ukr.net.

Kurhan Mykola, Dr. Sc. (Tech.), full professor, Department Transport Infrastructure, Ukrainian State University of Science and Technologies. ORCID iD: 0000-0002-8182-7709. Тел.: +38 (056) 373-15-48.
E-mail: m.b.kurhan@ust.edu.ua.

Rodion Ivanov, postgraduate student, Department Transport Infrastructure, Ukrainian State University of Science and Technologies. ORCID iD: 0009-0005-9125-9468. E-mail: ivanovrodion@ukr.net.

Дата надходження статті 16.02.2026 р.

Дата прийняття статті до друку 12.05.2026 р.

Дата публікації (оприлюднення) статті 29.05.2026 р.

Стаття поширюється на умовах ліцензії Creative Commons Attribution License International CC-BY