

DOI: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2025-76-68>

УДК 656.2: 004.89

ЦИФРОВА ТРАНСФОРМАЦІЯ ПАСАЖИРСЬКОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ В УМОВАХ ОБМЕЖЕНИХ РЕСУРСІВ

DIGITAL TRANSFORMATION OF RAILWAY PASSENGER INFRASTRUCTURE IN CONDITIONS OF LIMITED RESOURCES

Залеський Олексій Вікторович

аспірант,

Український державний університет науки і технологій

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-7780-5283>**Zaleskyi Oleksii**

Ukrainian State University of Science and Technology

Актуальність дослідження зумовлена необхідністю цифрової трансформації пасажирської інфраструктури залізничного транспорту України в умовах технологічного відставання, обмежених фінансових ресурсів та зовнішніх загроз, включно з воєнними. Наукова новизна полягає у формуванні комплексної програми «Залізниця 4.0» як системної цифрової моделі розвитку галузі, що охоплює інфраструктурний, аналітичний та сервісний рівні, із запровадженням IoT, АТО, цифрових двійників і клієнтоорієнтованих рішень. Методологічною базою слугували сценарне планування, фінансово-економічне моделювання та підходи проєктного управління. Отримано кількісні оцінки ефективності цифрових ініціатив – зниження аварійних витрат, підвищення доходності, зменшення CO₂ та окупність проєктів. Практична значущість проявляється у розробці фінансово-організаційної моделі реалізації програми, алгоритмів вибору моделей державно-приватного партнерства та ризик-менеджменту для критичної інфраструктури.

Ключові слова: залізничний транспорт, цифрова трансформація, інфраструктура транспорту, державно-приватне партнерство, цифрова екосистема, інновації, пасажирські перевезення.

The article tackles the accelerating degradation of Ukraine's railway system, a problem intensified by full-scale war and decades of structural under-investment and contends that mere physical repairs will fail unless coupled with a far-reaching digital transformation. The methodological toolbox combines system-structural analysis, statistical modelling of traffic and asset losses, comparative benchmarking of German, French and Chinese digital rail programmes, and compound annual growth rate (CAGR) calculations that forecast a 10% yearly expansion of the global digital-rail market to 2032. Empirical results quantify direct wartime damage at US \$4.3 billion, identify a 20-30% potential reduction in maintenance outlays through predictive-maintenance algorithms, and demonstrate a positive net present value for thirty priority projects under conservative tariff and discount-rate scenarios. This robust financial evaluation further emphasizes the importance of well-planned investments in digital infrastructure for resilience. Practical significance is embodied in a donor-oriented road map that sequences infrastructure hardening, cyber-secure data platforms, and situational-awareness centres, aligns them with existing World Bank, EBRD, and EIB funding windows, and offers a transparent “CAPEX versus OPEX-savings” matrix for project selection. Implementation of the recommended modules is expected to significantly enhance the efficiency and resilience of the railway network, reducing delays, increasing system availability, and improving fault-diagnosis capabilities. These improvements will strengthen logistical support for both civilian operations and defence mobility, ensuring rapid response capabilities and maintaining the continuity of essential transport services even under challenging conditions. The study therefore provides policy-makers and investors with a rigorously costed, technologically coherent pathway for rebuilding a safer, greener, and fully interoperable Ukrainian railway in line with EU standards, strengthening the nation's strategic connectivity.

Keywords: railway transport, digital transformation, transport infrastructure, public-private partnership, digital ecosystem, innovations, passenger transportation.

Постановка проблеми. Залізнична галузь переживає глобальну цифрову трансформацію під тиском технологічного прогресу та зростаючої конкуренції з боку автомобільного транспорту. Історично залізниці повільно впроваджували нові технології, але нині операторам необхідно прискорити цифровізацію, щоб утримати конкурентні позиції, інакше вони ризикують опинитися в небезпеці втрати клієнтів на користь автомобільних перевізників. Цифрова трансформація (концепція «Залізниця 4.0») розглядається як шлях до підвищення ефективності, надійності та клієнтоорієнтованості залізниць.

Світові тенденції підтверджують актуальність проблеми, глобальний ринок цифрової залізничної інфраструктури стрімко зростає і, за прогнозами, збільшиться з \$69,8 млрд у 2023 р. до \$165,4 млрд у 2032 р. (понад 10% зростання на рік) [1]. Для національних залізничних компаній, зокрема АТ «Укрзалізниця», це означає необхідність модернізації застарілої інфраструктури та бізнес-моделі.

В умовах воєнних викликів цифровізація набуває додаткового значення як фактор стратегічної стійкості залізничного транспорту, забезпечуючи безперервність перевезень та підтримку мобільності населення. Так, попри війну, Укрзалізниця у 2023 році перевезла 25 млн пасажирів далекого сполучення, що свідчить про критичну важливість надійної залізничної системи та потребу її подальшого розвитку [2]. Виходячи з цього, постає проблема розроблення цілісної програми цифрової трансформації пасажирської інфраструктури залізниці, яка б враховувала сучасні технологічні можливості, обмежені фінансові ресурси та підвищені вимоги до стійкості в умовах ризиків.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Цифровізація залізниць є одним із пріоритетів наукових досліджень в транспортній галузі останніх років. Провідні галузеві об'єднання Європи (CER, UIC та ін.) в спільній «Дорожній карті цифрової залізниці» окреслили ключові напрями цифрової трансформації: забезпечення надійної конективності на всій мережі, покращення клієнтського досвіду пасажирів, зростання пропускнуєї спроможності за рахунок підвищення надійності та ефективності, а також підвищення конкурентоспроможності залізниці через використання великих даних [3].

Концепція «Залізниця 4.0» (або «Цифрова Залізниця») визначається як впровадження технологій Інтернету речей (IoT), штучного

інтелекту (AI), великих даних, автоматизації та інших інновацій для переходу до «розумної» залізниці, де значна частина операцій автоматизована [4]. Така цифрова трансформація покликана створити новий рівень пасажирського сервісу, підвищити безпеку і оптимізувати операційну діяльність залізниць.

У науковій літературі цифровізація залізничної галузі розглядається як ключ до створення гнучкої, динамічної та стійкої транспортної системи.

Зокрема, оглядові дослідження відзначають, що цифровізація є комплексним рішенням для модернізації залізниць, вона об'єднує інформаційно-комунікаційні технології в єдину «парасолькову» платформу, роблячи систему більш гнучкою, швидкою та надійною [5].

Впровадження принципів Індустрія 5.0 (орієнтація на людину та стійкість) у залізничній галузі дозволяє поєднати технічні інновації з пріоритетом комфорту пасажирів і екологічної безпеки. Зарубіжний досвід показує значні вигоди від цифрових інновацій. Наприклад, залізниця Німеччини (Deutsche Bahn) впроваджує IoT-датчики та аналітику для предиктивного обслуговування – за рахунок AI-моделей компанія скоротила витрати на ремонти приблизно на 25% і практично усунула збої руху, пов'язані з несправностями. У Франції пілотні проекти з впровадження цифрового квитка і блокчейн-технологій показали прискорення процесу посадки пасажирів на 18% та зниження рівня шахрайства до майже нуля [3].

В аналітичному звіті McKinsey (2024) вказується, що потенціал впровадження штучного інтелекту на залізницях становить від \$13 до \$22 млрд щорічно для галузі. Ці вигоди охоплюють оптимізацію інфраструктури, операцій, обслуговування клієнтів та внутрішніх процесів [2].

Водночас, у багатьох дослідженнях наголошується на повільнішій адаптації залізничної індустрії до цифрових технологій у порівнянні з автотранспортом, що зумовлено високою вартістю модернізації та наявністю застарілих активів [6].

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Загалом, у наукових працях закладено основу для цифрової трансформації залізниць – визначено напрями, технології та очікувані вигоди. Не вирішеними залишаються питання комплексної реалізації цих змін у конкретних умовах, зокрема: як інтегрувати цифрові рішення у всі підсистеми пасажирського господарства; яку модель фінансування обрати за обмежених

ресурсів; як перебудувати управління проектами та ризиками; якими показниками вимірювати успіх трансформації. Саме цим аспектам присвячено дане дослідження.

Формулювання цілей статті. Метою дослідження є розроблення цілісної програми цифрової трансформації пасажирської інфраструктури залізничного транспорту для підвищення ефективності, конкурентоспроможності та стійкості галузі в умовах обмежених ресурсів і воєнних викликів.

Виклад основного матеріалу дослідження. Цифрова трансформація пасажирського комплексу пропонується у форматі програми «Залізниця 4.0», яка розглядає залізницю як єдину кібер-фізичну систему. Всі компоненти – від залізничної колії до мобільного додатку пасажирів – повинні бути інтегровані через спільну цифрову платформу.

Концепція «Залізниця 4.0» передбачає розвиток залізничної галузі на трьох взаємопов'язаних рівнях. Перший рівень – **інфраструктурний**, що охоплює впровадження сучасних технологій – сенсорні системи для моніторингу стану колій і рухомого складу, безпілотні апарати для інспекцій, новітні засоби зв'язку, зокрема мобільний зв'язок п'ятого покоління та спеціалізовані залізничні стандарти. Другий – аналітичний, що включає використання платформ обробки великих масивів даних, інтелектуальних модулів для прогнозування та оптимізації процесів, а також створення цифрових копій (двійників) інфраструктурних об'єктів і операцій для їх моделювання. Третій рівень – сервісний, де йдеться про розробку зручних цифрових послуг для пасажирів: електронні квитки, інтегровані транспортні сервіси, мобільні застосунки для планування подорожей, доповнену реальність для навігації тощо.

Основна мета цієї концепції полягає у трансформації залізниці з традиційного перевізника на мультисервісну цифрову платформу, яка забезпечує комплексне управління мобільністю людини та інтегрується у ширший транспортний екосистемний ланцюг.

Програма цифрової трансформації залізничного транспорту реалізується у форматі багаторівневої структури, що поєднує стратегічне планування з операційною реалізацією через низку підпроектів. На стратегічному рівні сформовано цілісний орієнтир переходу до сервісно-орієнтованої цифрової залізниці, що включає розробку дорожньої карти змін, систему ключових індикаторів ефективності,

а також механізми управління ризиками та адаптації до зовнішніх викликів.

Передбачено п'ять основних етапів реалізації, кожен із яких триває приблизно два роки.

- Перший етап передбачає впровадження інфраструктури мобільного зв'язку п'ятого покоління (FRMCS) на основних магістральних напрямках.

- Другий етап – пілотне впровадження систем дистанційного моніторингу за допомогою інтернету речей (IoT) для відстеження стану стрілочних переводів.

- Третій етап передбачає створення цифрових моделей (двійників) інфраструктурних об'єктів, зокрема вузлових станцій і ділянок, для прогнозування навантажень і виявлення «вузьких місць».

- Четвертий етап орієнтований на розвиток пасажирських сервісів – інтеграцію концепції мобільності, як послуги (MaaS) та запуск електронного квитка на основі технологій розподіленого реєстру.

- П'ятий етап – створення та масштабування єдиного центру даних (Data Hub), який дозволить знеособлено аналізувати дані для оптимізації роботи та розвитку нових бізнес-моделей.

Контроль пропонується здійснювати спеціально створеній Раді з трансформації, яка щоквартально буде оцінювати прогрес і узгоджувати дії з корпоративною стратегією Укрзалізниці та Транспортною стратегією ЄС.

Такий підхід забезпечить поступове, але цілеспрямоване нарощування цифрового потенціалу галузі з можливістю гнучкого коригування в разі змін зовнішніх умов.

Успішна цифровізація потребує модернізації всієї системи проектного менеджменту. Запропоновано перехід до гібридної методології управління проектом, що поєднує класичні стандарти (PMBOK, ISO 21502) із гнучкими підходами *Agile*. Це зумовлено специфікою програми: вона містить як інфраструктурно-будівельні завдання (що тяжіють до «водоспадної» логіки), так і IT-компоненти. Світовий досвід свідчить, що використання змішаних методів управління цифровими проектами покращує їх результати, за даними консалтингу, проекти із застосуванням *Agile+Waterfall* мають менші відхилення від графіка (на 18%) і бюджету (11%) порівняно з традиційними підходами [6].

У запропонованій програмі створено матричну організаційну модель управління, яка базується на поділі відповідальності між

трьома основними центрами: **Офісом «Цифрова залізниця»** (який забезпечує координацію IT-рішень, даних і цифрових сервісів), **Центром інфраструктури та безпеки** (що відповідає за мережі, обладнання і кіберзахист) та **Підрозділом клієнтського сервісу** (який опікується якістю цифрових послуг для пасажирів). Між цими підрозділами розподілено функціональні ролі, повноваження та сфери контролю на основі RACI-матриці, що забезпечує прозорість процесів і уникнення дублювання функцій.

Для контролю ефективності запроваджено збалансовану систему показників, яка охоплює чотири сектори: фінансовий (виконання бюджету, рівень економічної доданої вартості), операційний (надійність перевезень, показники пунктуальності), клієнтський (індекс задоволеності та рівень охоплення цифровими послугами) і соціально-інноваційний (доступність цифрових сервісів, зниження викидів CO₂ тощо). Усі показники автоматично агрегуються на інтегрований KPI-панелі, доступній стейкхолдерам проєкту.

Для оперативного реагування на відхилення система виявляє критичні збої: якщо показник погіршується понад заданий рівень, сигнал автоматично надходить до Ради з трансформації, яка приймає коригувальні управлінські рішення. Такий механізм дозволяє забезпечити, як контроль на рівні процесів, так і стратегічне управління всією програмою цифрової трансформації в режимі реального часу.

Одним з ключових питань є *модель фінансування програми «Залізниця 4.0»*. Розглянуто три альтернативи залучення інвестицій:

- Державне бюджетне фінансування.
- Класична модель державно-приватного партнерства (ДПП).
- Концесійна схема «проекткування – будівництво – фінансування – експлуатація» (далі ПБФЕ).

Порівняльний аналіз різних моделей фінансування інфраструктурних програм свідчить про суттєві відмінності у фінансовій ефективності залежно від рівня залучення приватного капіталу. У таблиці 1 наведено узагальнені результати аналізу трьох підходів заснованого на даних галузевих звітів [7; 8].

Очікувана внутрішня норма прибутковості (IRR) для державного фінансування, яке передбачає переважно бюджетне покриття витрат і централізоване управління, складає 6–8%. В той час, при переході до моделей ДПП із частковою участю приватного капіталу цей показник зростає до 9–11% завдяки розподілу ризиків та стимулюванню ефективності на всіх етапах реалізації. Найвищий рівень економічної доцільності показує модель концесії, при частці приватного капіталу близько 60% і ставці дисконту 10% її IRR сягає 11–12%, що узгоджується з практиками ЄС і Міжнародного транспортного форуму (рис. 1) [6; 9].

Розрахунок проводився за стандартною формулою:

$$NPV = \sum_{t=0}^T \frac{CF_t}{(1+r)^t},$$

де CF_t – чистий грошовий потік у році t ;

r – ставка дисконту;

T – горизонт проєкту.

Отримані результати підтверджують доцільність застосування гібридних моделей із залученням приватного капіталу. Зокрема, концесійна форма дозволяє підвищити фінансову ефективність проєктів і зменшити строк окупності без шкоди для довгострокової стабільності. Подібний підхід уже показує результативність у проєктах національного рівня в країнах ЄС, що підтверджується звітами Європейського інвестиційного банку та Світового банку.

Як видно з таблиці концесія дозволяє досягти NPV близько 745 млн €, що майже на 40% вище порівняно з традиційною ДПП, а строк окупності скорочується до 11 років.

Таблиця 1

Порівняння показників ефективності для різних моделей фінансування програми «Залізниця 4.0»

Показник	Державне фінансування	Класична ДПП	Концесія (ПБФЕ)
Внутрішня норма прибутковості (IRR), %	6–8	9–11	11–12
Чиста теперішня вартість (далі NPV), млн €	312	522	745
Строк окупності, років	16	13	11

Джерело: сформовано автором на основі [6–9]

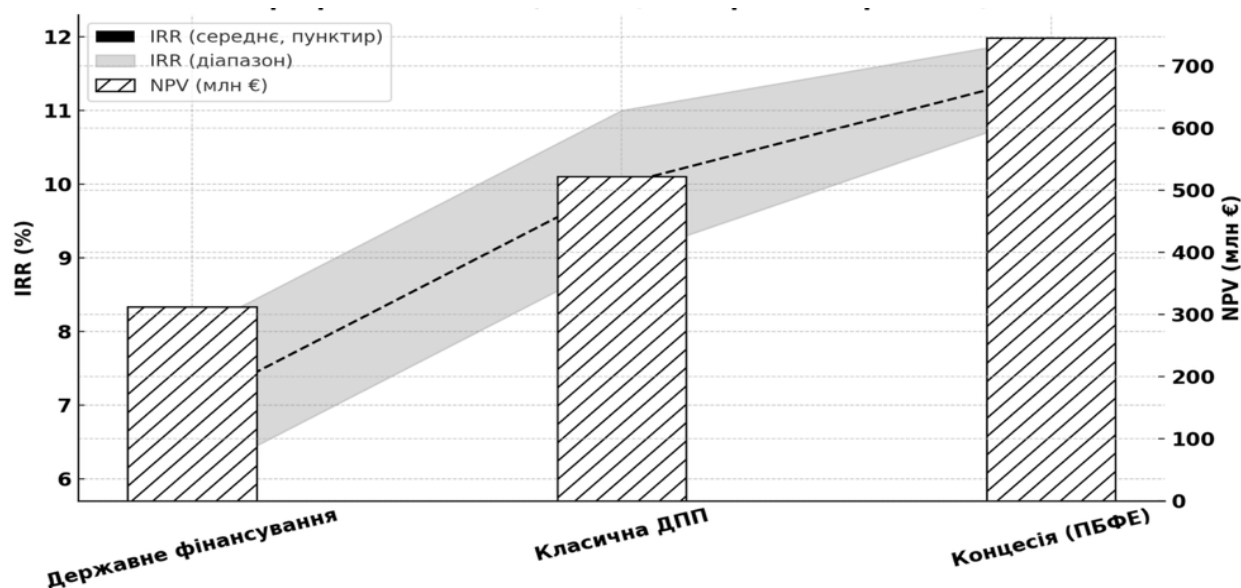


Рис. 1. Оцінка ефективності моделей фінансування на основі показників IRR та NPV в рамках програми цифрової модернізації залізничної інфраструктури

Джерело: сформовано автором на основі [7–10]

Це означає швидше повернення інвестицій та перерозподіл значної частини ризиків будівництва і фінансування на приватного партнера, в той час як держава зберігає стратегічний контроль над інфраструктурою.

Для прийняття рішення щодо вибору моделі фінансування запропоновано алгоритм «вигода-вартість» – спочатку виконують техніко-економічне обґрунтування базового сценарію, далі кількісно порівнюють грошові потоки варіантів, аналізують розподіл ризиків (хто нестиме фінансові, будівельні, політичні ризики), враховують якісні ефекти (соціальні, екологічні вигоди) і, нарешті, колегіально (Радою трансформації) ухвалюють рішення «державні кошти чи ДПП».

В сучасних умовах військового стану в Україні, з огляду на обмежені можливості бюджету та воєнні ризики, перевага надається державно-приватному партнерству. Так, концесійна модель ПБФЕ для масштабних інфраструктурних проєктів вже зарекомендувала себе як ефективна – держава отримує інновації і якісні послуги без одночасного навантаження на бюджет, інвестор – гарантований дохід за прозорими правилами. Позитивний досвід впровадження ДПП у суміжних галузях Центральної Європи підтверджує доцільність цього підходу і для Укрзалізниці.

У дослідженні пропонується запровадити комплексний підхід до управління ризиками та безпековими питаннями, з огляду на те,

що цифрова модернізація критичної інфраструктури неминуче супроводжується появою нових ризиків. Зокрема, пропонується створення системи ризик-менеджменту, що включатиме реєстр з 14 критичних ризиків програми «Залізниця 4.0» – від технологічних (наприклад, відставання стандартів або ризик кібератак) до макроекономічних (інфляція, валютні коливання) та соціальних (опір змінам з боку персоналу).

Для кожного з ризиків планується провести оцінку ймовірності та впливу, визначити стратегії реагування і відповідальних осіб. Наприклад, ризик затримки впровадження нового європейського стандарту зв'язку FRMCS пропонується оцінити з ймовірністю 0,3 і впливом 4 із 5, із відповідним планом дій – коригування строків впровадження та створення резервного фонду на випадок затримок.

Найвищий інтегральний рейтинг в рамках пропозицій має ризик кібератаки на IoT-інфраструктуру (ймовірність 0,4; наслідок 5; рейтинг 2,0). Для його мінімізації рекомендується впровадження архітектури Zero Trust, що базується на розмежуванні доступу, а також створення віддаленого центру кібербезпеки УЗ.

Загалом, пропонується забезпечити інтеграцію принципів інформаційної безпеки на всіх рівнях програми «Залізниця 4.0» – від мереж передачі даних до хмарних сервісів, із реалізацією підходів типу «припускай злом»,

резервуванням каналів зв'язку та постійним моніторингом аномалій. Таким чином, поєднання гнучкого планування з суворою дисципліною кіберзахисту дозволить мінімізувати ризики збоїв у роботі критично важливих цифрових систем.

В рамках практичної реалізації концепції запропоновано системну інтеграцію цифрових технологій у всі основні підрозділи пасажирського комплексу – від вокзалів і платформ до депо, поїздів й сервісних служб. В таблиці 2 узагальнено основні напрями цифрової модернізації за цими підрозділами та очікувані результати.

Таким чином, кожна складова отримує конкретні цифрові рішення, що разом формують єдину екосистему «розумної» залізниці. Впровадження IoT-сенсорів, систем великих даних і штучного інтелекту дозволяє у реальному часі відстежувати стан обладнання, прогнозувати попит пасажирів і оптимізувати розклад та використання ресурсів. Це забезпечує сукупний синергетичний ефект, підвищується надійність техніки, скорочуються енергозатрати, поліпшується досвід пасажирів, зростає дохідність перевезень.

Практичні розрахунки показують високу ефективність запропонованих заходів у сфері технічного обслуговування залізничного транспорту. Згідно з фінансовими звітами АТ «Укрзалізниця», витрати на поточні й аварійні ремонти рухомого складу у 2022 році перевищили 4,6 млрд грн, з яких

понад 1,2 млрд грн припадає на пасажирський сегмент [14]. З огляду на масштаб та функціональне навантаження локомотивного депо «Дарниця», одного з найбільших моторвагонних вузлів у структурі УЗ, орієнтовні щорічні витрати на аварійні ремонти РС в межах 431 млн грн є обґрунтованими [15].

У цьому контексті, модернізація 120 одиниць моторвагонного рухомого складу шляхом встановлення систем сенсорного моніторингу (вимірювання вібрацій, температури тощо) із загальним бюджетом 21,6 млн грн здатна забезпечити зменшення аварійних витрат щонайменше на 23%, що еквівалентно близько 99 млн грн щорічної економії. Такі оцінки узгоджуються з даними EU Agency for Railways, яка вказує на потенціал скорочення витрат на ремонти у межах 15–30% завдяки застосуванню предиктивного обслуговування [16].

Крім того, скорочення простоїв одного вагону в середньому на 0,9 доби дозволяє виконати додаткові рейси, що за приблизними оцінками приносить ще понад 5 млн грн додаткових доходів щороку. Таким чином, сумарний економічний ефект для одного депо може перевищити 104 млн грн на рік, що забезпечує період окупності лише 2,1 року та розрахований NPV за 7 років у розмірі 472,6 млн грн (при $r = 10\%$).

Аналогічна ефективність спостерігається у проектах з енергоефективності. На Південно-Західній залізниці впроваджено

Таблиця 2

**Цифрові ініціативи модернізації та очікуваний ефект
для підрозділів пасажирського комплексу**

Підрозділ	Цифрові ініціативи	Очікуваний ефект
Вокзали	Електронні табло, мобільні застосунки, «розумне» освітлення, енергоменеджмент	Зростання зручності та безпеки, інформація в реальному часі, економія енергоспоживання
Платформи	Сенсори підрахунку пасажиропотоку, Wi-Fi, системи оповіщення, цифрові показники	Краща керованість потоками, оперативне інформування, зростання доступності для маломобільних пасажирів
Депо та технічні служби	IoT-системи діагностики, цифрове планування техобслуговування, предиктивна аналітика	Підвищення надійності, зменшення простоїв, оптимізація запасів
Рухомий склад	Бортові пристрої зв'язку і моніторингу, АТО над ETCS, енергозбереження (регенеративне гальмування)	Безпека руху, точність графіка, підвищення пропускної здатності, зниження витрат
Сервіси для пасажирів	Мобільні додатки, інформаційні кіоски, інтеграція з міським транспортом (MaaS-платформа)	Персоналізація сервісу, інклюзивність, лояльність клієнтів, нові доходи

Джерело: сформовано автором на основі [11–13]

систему автоматизованого ведення поїздів (АТО) рівня 2 на 20 електропоїздах, що дозволило зменшити споживання електроенергії приблизно на 12% на один рейс. Це відповідає економії близько 9,3 ГВт·год на рік та зменшенню викидів CO₂ на понад 8,2 тис. тонн. Враховуючи поточну вартість електроенергії, річний економічний ефект становить приблизно 14,4 млн грн, при інвестиціях у 78 млн грн і позитивному NPV у 31 млн грн при 15-річному горизонті. Проєкт також має суттєві екологічні та соціальні переваги, зокрема зниження технічного зносу й підвищення точності дотримання графіка [17].

Крім того, дослідження свідчать, що цифрові сервіси, пристосовані для маломобільних пасажирів, можуть значно підвищити їхню довіру та частоту користування залізничним транспортом. Так, згідно з даними Office of Rail (Великобританія), після впровадження можливостей для замовлення допомоги за 2 години до поїздки, річна кількість звернень за допомогою зросла на 44% у 2023 порівняно з попереднім роком. Це свідчить про підвищення довіри та готовність користуватися залізницею серед маломобільних пасажирів.

Також дослідження показують, що більше половини (66%) користувачів з інвалідністю зменшують частоту поїздок через складності планування, таких як необхідність попереднього замовлення допомоги або недостатнє інформування. Відмовившись від цих бар'єрів – тобто, запровадивши зручну цифрову платформу з підтримкою «звернувся і поїхав» – можна істотно посилити кількість поїздок та загальний пасажиропотік.

Враховуючи річний пасажиропотік далекого сполучення 18 млн осіб та середній дохід від квитка близько 212 грн, потенційний додатковий дохід від такої цифрової інклюзії може досягати сотень мільйонів гривень щороку [18].

Наведені дані свідчать, що цифрова модернізація пасажирського комплексу приносить не лише якісні покращення сервісу, а й відчутні фінансові результати. Сумарний ефект

від енергозбереження, оптимізації ремонтів та залучення нових клієнтів забезпечує залізницю значне підвищення економічної ефективності. Це особливо важливо в сучасних умовах, коли залізниця конкурує з іншими видами транспорту і водночас виконує критично важливі соціальні функції в державі.

Висновки. Проведене дослідження засвідчує, що цифрова трансформація пасажирської інфраструктури Укрзалізниці є критичною для підвищення ефективності, конкурентоспроможності й стійкості.

Запропонована програма «Залізниця 4.0» охоплює всі рівні, передбачаючи сучасні IoT системи на станціях і рухомому складі, єдину екосистему з обміном даними у реальному часі, персоналізовані сервіси (цифровий паспорт подорожі, інтеграція MaaS) та AI підтримку прогнозного обслуговування.

Економічне моделювання показує позитивну NPV проєктів навіть без урахування нефінансових вигід, що підтверджує їхню інвестиційну доцільність. Для реалізації запропоновано інтегровану модель: концесійне фінансування з приватним операційним компонентом, гібридне управління проєктами та наскрізний ризик менеджмент, який охоплює інфраструктурні й кіберризики.

Дорожня карта модернізації узгоджена зі Стратегією УЗ 2030 та Європейським зеленим курсом і дає змогу Укрзалізниці еволюціонувати з класичного перевізника у цифрову транспортну платформу з високим рівнем сервісу, сталим використанням ресурсів та відповідністю сучасним екологічним стандартам.

У перспективі доцільно поглибити наукові дослідження у сфері нормативно-правового забезпечення цифровізації, зокрема в частині державно-приватного партнерства та стандартизації обміну даними. Крім того, необхідні подальші дослідження соціального впливу цифровізації – змін у структурі зайнятості, потреби у нових професійних компетенціях та взаємодії з пасажирями. Результати таких досліджень сприятимуть сталому розвитку залізничної галузі в умовах цифрової трансформації.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ:

1. Global Railway Digital Transformation Market Report 2023-2032. URL: <https://www.globenewswire.com/news-release/2023/08/02/2716472/0/en/Global-Railway-Digital-Transformation-Market-Report-2023-to-2032.html> (дата звернення: 16.06.2025).
2. Ukraine's railroad workers play crucial role in creating a lifeline during war. URL: <https://www.pbs.org/newshour/show/ukraines-railroad-workers-play-crucial-role-in-creating-a-lifeline-during-war> (дата звернення: 17.06.2025).
3. A Roadmap for Digital Railways. URL: https://uic.org/com/IMG/pdf/a_roadmap_for_digital_railways.pdf (дата звернення: 17.06.2025).
4. Smart railway solutions designed for the digital age. URL: <https://www.al-enterprise.com/en/industries/transportation/rail> (дата звернення: 18.06.2025).
5. European Union Agency for Railways. Digital Transformation of Railway. URL: https://rail-research.europa.eu/wp-content/uploads/2018/04/DIGITAL_TRANSFORMATION_RAILWAYS_2018_web.pdf (дата звернення: 19.06.2025).
6. Boston Consulting Group. Route to a fully digitized rail system. URL: <https://www.bcg.com/publications/2025/route-to-a-fully-digitized-rail-system> (дата звернення: 19.06.2025).
7. Задоя В. О., Чаркіна Т. Ю., Корольов Д. С. Цифрові інструменти та технології в управлінні науковими проєктами. *Review of transport economics and management*. 2024. Т. 12, №28. С. 224–232. DOI: <https://doi.org/10.15802/rtem2024/328104>
8. Чаркіна Т. Ю., Задоя В. О. Діджитал менеджмент та маркетинг як центральний фактор цифрової економіки. *Вісник економіки транспорту і промисловості*. 2024. № 88. С. 100–108. DOI: <https://doi.org/10.18664/btie.88.326974>
9. Обруч Г. В. Особливості цифрового розвитку АТ «Укрзалізниця». *Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Серія «Економіка і управління»*. 2020. Т. 31 (70), № 1. С. 59–64. DOI: <https://doi.org/10.32838/2523-4803/70-1-10>
10. Дикань В., Корінь М. Концепція впровадження цифрового реінжинірингу в діяльність промислових підприємств. *Адаптивне управління: теорія і практика*. Серія «Економіка». 2020. Вип. 8 (16). URL: <https://amtp.org.ua/index.php/journal2/article/download/292/264> (дата звернення: 23.07.2025).
11. Rethinking public-private partnerships to bridge the infrastructure gap. URL: <https://cepr.org/voxeu/columns/rethinking-public-private-partnerships-bridge-infrastructure-gap> (дата звернення: 19.06.2025).
12. Transport and digitalization: Enhancing cross-border operations. URL: <https://unece.org/sites/default/files/2024-02/ECE-TRANS-WP30-2024-Inf03e.pdf> (дата звернення: 20.06.2025).
13. The journey toward AI-enabled railway companies. URL: <https://www.mckinsey.com/industries/infrastructure/our-insights/the-journey-toward-ai-enabled-railway-companies> (дата звернення: 13.07.2025).
14. Річна фінансова звітність за 2022 рік. URL: https://www.uz.gov.ua/about/investors/financial_statements/ (дата звернення: 22.06.2025).
15. Ukrzaliznytsia to overhaul locomotives. URL: <https://www.railwaygazette.com/ukrainian-railways-and-industry/ukrzaliznytsia-to-overhaul-locomotives/61374.article> (дата звернення: 21.06.2025).
16. UK train companies could have to pay disabled passengers more compensation after rule change. URL: <https://www.theguardian.com/uk-news/2025/may/18/uk-train-companies-could-have-to-pay-disabled-passengers-more-compensation-after-rule-change> (дата звернення: 04.07.2025).
17. Artificial intelligence. URL: <https://www.oecd.org/en/topics/artificial-intelligence.html> (дата звернення: 05.07.2025).
18. Frigid Fuxing cuts end-to-end timings. URL: <https://www.railwaygazette.com/traction-and-rolling-stock/frigid-fuxing-cuts-end-to-end-timings/61374.article> (дата звернення: 05.07.2025).

REFERENCES:

1. Global Railway Digital Transformation Market Report 2023-2032. Available at: <https://www.globenewswire.com/news-release/2023/08/02/2716472/0/en/Global-Railway-Digital-Transformation-Market-Report-2023-to-2032.html> (accessed June 16, 2025).
2. Ukraine's railroad workers play crucial role in creating a lifeline during war. Available at: <https://www.pbs.org/newshour/show/ukraines-railroad-workers-play-crucial-role-in-creating-a-lifeline-during-war> (accessed June 17, 2025).
3. A Roadmap for Digital Railways. Available at: https://uic.org/com/IMG/pdf/a_roadmap_for_digital_railways.pdf (accessed June 17, 2025).
4. Smart railway solutions designed for the digital age. Available at: <https://www.al-enterprise.com/en/industries/transportation/rail> (accessed June 18, 2025).

5. European Union Agency for Railways. Digital Transformation of Railway. Available at: https://rail-research.europa.eu/wp-content/uploads/2018/04/DIGITAL_TRANSFORMATION_RAILWAYS_2018_web.pdf (accessed June 19, 2025).
6. Boston Consulting Group. Route to a fully digitized rail system. Available at: <https://www.bcg.com/publications/2025/route-to-a-fully-digitized-rail-system> (accessed June 19, 2025).
7. Zadoia, V., Charkina, T. and Korolov, D. (2024), "Digital tools and technologies in scientific project management", *Review of Transport Economics and Management*. vol. 12 (28), 224–232. DOI: <https://doi.org/10.15802/rtem2024/328104>
8. Charkina, T. Yu., and Zadoia, V. O. (2024), "Digital management and marketing as a central factor of the digital economy", *Visnyk ekonomiky transportu i promyslovosti*, vol. 88, 100–108. DOI: <https://doi.org/10.18664/btie.88.326974>
9. Obruch, H. V. (2020), "Features of the digital development of JSC "Ukrzaliznytsia", *Vcheni zapysky Tavriiskoho natsionalnoho universytetu imeni V. I. Vernadskoho. Seriya: Ekonomika i upravlinnia*, vol. 31 (70), 59–64. DOI: <https://doi.org/10.32838/2523-4803/70-1-10>.
10. Dykan, V., and Korin, M. (2020), "Concept of implementing digital reengineering in industrial enterprises", *Adaptyvne upravlinnia: teoriia i praktyka. Seriya: Ekonomika*, vol. 8(16). Available at: <https://amtp.org.ua/index.php/journal2/article/download/292/264> (accessed June 23, 2025).
11. Rethinking public-private partnerships to bridge the infrastructure gap. Available at: <https://cepr.org/voxeu/columns/rethinking-public-private-partnerships-bridge-infrastructure-gap> (accessed June 19, 2025).
12. Transport and digitalization: Enhancing cross-border operations. Available at: <https://unece.org/sites/default/files/2024-02/ECE-TRANS-WP30-2024-Inf03e.pdf> (accessed June 20, 2025).
13. The journey toward AI-enabled railway companies. Available at: <https://www.mckinsey.com/industries/infrastructure/our-insights/the-journey-toward-ai-enabled-railway-companies> (accessed July 13, 2025).
14. Richna finansova zvitnist za 2022 rik [Annual financial report for 2022]. Available at: https://www.uz.gov.ua/about/investors/financial_statements/ (accessed June 22, 2025).
15. Ukrzaliznytsia to overhaul locomotives. Available at: <https://www.railwaygazette.com/ukrainian-railways-and-industry/ukrzaliznytsia-to-overhaul-locomotives/61374.article> (accessed June 21, 2025).
16. UK train companies could have to pay disabled passengers more compensation after rule change. Available at: <https://www.theguardian.com/uk-news/2025/may/18/uk-train-companies-could-have-to-pay-disabled-passengers-more-compensation-after-rule-change> (accessed July 4, 2025).
17. Artificial intelligence. Available at: <https://www.oecd.org/en/topics/artificial-intelligence.html> (accessed July 5, 2025).
18. Frigid Fuxing cuts end-to-end timings. Available at: <https://www.railwaygazette.com/traction-and-rolling-stock/frigid-fuxing-cuts-end-to-end-timings/61374.article> (accessed July 5, 2025).