

М. Б. КУРГАН, Д. М. КУРГАН, О. Л. ТЮТЬКІН

ТЕОРЕТИЧНЕ ТА ПРАКТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПЕРЕБУДОВИ МЕРЕЖІ ЗАЛІЗНИЦЬ УКРАЇНИ НА ЄВРОПЕЙСЬКИЙ СТАНДАРТ



ДНІПРО
2025

Інтеграція України у європейський залізничний простір є стратегічним кроком для забезпечення конкурентоспроможності та ефективності транспортної системи.

Директива 2016/797/ЄС – Про взаємодію залізничної системи в межах Європейського Союзу

Mykola Kurhan, Dmytro Kurhan,
Oleksii Tiutkin

Theoretical and practical justification
for restructuring Ukraine's railway
network to the European standard

MONOGRAPH

DNIPRO
2025

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ НАУКИ І ТЕХНОЛОГІЙ



М. Б. Курган, Д. М. Курган, О. Л. Тютюкін

Теоретичне та практичне обґрунтування перебудови мережі залізниць України на європейський стандарт

МОНОГРАФІЯ

ДНІПРО
2025

УДК 656.224/.225:625.112(477+4)
Т30

Рецензенти:

д-р техн. наук, проф. С. М. Гапеев,
д-р техн. наук, проф. А. А. Плугін,
д-р техн. наук, проф. В. В. Ковальчук

Рекомендовано до друку Вченою радою
Українського державного університету науки і технологій
(протокол № 3 від 31.10.2024 року)

Т30 ТЕОРЕТИЧНЕ ТА ПРАКТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПЕРЕБУДОВИ МЕРЕЖІ ЗАЛІЗНИЦЬ УКРАЇНИ НА ЄВРОПЕЙСЬКИЙ СТАНДАРТ / М. Б. Курган, Д. М. Курган, О. Л. Тютюкін; Український держ. ун-т науки і технологій. – Дніпро, Журфонд, 2025. – 256 с.

ISBN 978-966-934-671-1

УДК 656.224/.225:625.112(477+4)

Монографія присвячена розробці теоретико-методологічних підходів і практичних рекомендацій щодо визначення технічних можливостей створення залізничних магістралей в Україні за європейським стандартом. Перехід на європейський стандарт залізниць є однією з важливих складових інтеграції України в європейську транспортну систему, що забезпечить зменшення транспортних витрат і підвищення конкурентоспроможності української економіки. Європейська колія сьогодні використовується в більшості країн Європи і дозволяє забезпечити безперешкодний рух поїздів між країнами Європейського Союзу, які використовують цей стандарт.

Ґрунтуючись на результатах вітчизняних і зарубіжних наукових розробок, намічено шляхи вирішення проблеми сумісності транспортних систем при застосуванні комплексного підходу до модернізації транспортних коридорів у межах України. Розглянуто можливі сценарії при переході на колію європейського стандарту: на головній колії укладається суміщена колія (1435/1520 мм), існуюча двоколійна ділянка перебудовується на дві одноколійні з шириною колії 1435 і 1520 мм, проектується залізнична колія європейського стандарту на новій трасі.

Розвинуто теорії оцінки напружено-деформованого стану верхньої будови колії при впровадженні європейської колії, вибору раціональних конструкцій та нормативів улаштування й утримання земляного полотна для забезпечення впровадження європейської колії.

Лл. 114. Табл. 25. Бібліогр.: 177 назв.

© М. Б. Курган, Д. М. Курган, О. Л. Тютюкін, 2025

ISBN 978-966-934-671-1

© Український державний університет науки і технологій, 2025

© Журфонд, 2025

УДК 656.224/.225:625.112(477+4)
Т30

Reviewers:

Dr. Sc. (Tech.), Prof. S. M. Hapieiev,
Dr. Sc. (Tech.), Prof. A. A. Plugin,
Dr. Sc. (Tech.), Prof. V. V. Kovalchuk

Recommended for publication by the Academic Council
of the Ukrainian State University of Science and Technologies
(*protocol No. 3 of 31.10.2024*)

T30 Kurhan, M. B., Kurhan, D. M., & Tiutkin, O. L. (2025). *Theoretical and practical justification for restructuring Ukraine's railway network to the European standard*. Dnipro: Ukrainian State University of Science and Technologies, Jurfond. 256 p. (in Ukrainian).

ISBN 978-966-934-671-1

УДК 656.224/.225:625.112(477+4)

This monograph is devoted to the development of theoretical and methodological approaches as well as practical recommendations for assessing the technical feasibility of creating railway mainlines in Ukraine according to European standards. The transition to the European railway standard is one of the key components of Ukraine's integration into the European transport system, which will reduce transportation costs and enhance the competitiveness of the Ukrainian economy. The European gauge is currently used in most European countries, ensuring the seamless movement of trains between EU member states that adopt this standard.

Based on domestic and international scientific research, the monograph outlines ways to address the compatibility issues of transport systems by applying a comprehensive approach to modernizing transport corridors within Ukraine. Various scenarios for transitioning to the European gauge are considered: laying a mixed-gauge track (1435/1520 mm) on the main railway line; converting an existing double-track section into two single-track lines with gauges of 1435 mm and 1520 mm; designing a new railway line with a European-standard gauge along a new route.

The monograph further develops theories for assessing the stress-strain state of railway superstructure components when implementing the European gauge, selecting optimal track structures, and establishing regulations for subgrade construction and maintenance to support the transition to the European railway standard.

Illustrations: 114. Tables: 25. References: 177 sources.

© M. B. Kurhan, D. M. Kurhan, O. L. Tiutkin, 2025

ISBN 978-966-934-671-1

© Ukrainian State University of Science and
Technologies, 2025

© Jurfond, 2025

ЗМІСТ

| | |
|--|----|
| ГЛОСАРІЙ ОСНОВНИХ ТЕРМІНІВ..... | 9 |
| ВСТУП..... | 15 |
| РОЗДІЛ 1 РЕАЛІЗАЦІЯ ЄВРОПЕЙСЬКОЇ ПРОГРАМИ РОЗШИРЕННЯ ЄВРОКОЛІЇ НА КРАЇНИ СХІДНОЇ ЄВРОПИ..... | 17 |
| 1.1 Стратегія поетапного впровадження євроколії на пріоритетних напрямках України | 17 |
| 1.1.1 Мета стратегії і прогнози поетапного переходу на євроколію | 17 |
| 1.1.2 Переваги й недоліки впровадження європейського стандарту | 20 |
| 1.2 Дослідження відмінностей української та європейської залізничної інфраструктури | 22 |
| 1.2.1 Європейські країни, що межують з Україною | 22 |
| 1.2.2 Польські державні залізниці | 24 |
| 1.2.3 Словацькі залізниці | 25 |
| 1.2.4 Залізниці Угорщини | 28 |
| 1.2.5 Румунські залізниці..... | 31 |
| 1.2.6 Молдовські залізниці | 33 |
| 1.2.7 Українські залізниці..... | 35 |
| 1.2.8 Основні відмінності української та європейської залізничної інфраструктури..... | 38 |
| 1.3 Забезпечення експлуатаційної сумісності залізниць ЄС та України..... | 45 |
| 1.3.1 Директиви, що забезпечують експлуатаційну сумісність залізниць . | 45 |
| 1.3.2 Приклади використання європейської колії на мережі залізниць | 47 |
| 1.3.3 Можливі сценарії при переході на колію європейського стандарту . | 51 |
| 1.4 Методологічні підходи до оцінювання способів транспортуванні вантажів у сполученні Схід – Захід | 55 |
| Висновки до розділу 1..... | 64 |
| РОЗДІЛ 2 АЛЬТЕРНАТИВНІ ВАРІАНТИ УКЛАДАННЯ ЄВРОПЕЙСЬКОЇ КО- ЛІЇ НА ТЕРИТОРІЇ УКРАЇНИ | 66 |
| 2.1 Огляд наукових досліджень з пропускної й провізної спроможності залізниць | 66 |
| 2.2 Оцінка пропускної й провізної спроможності одноколійного напрямку ... | 71 |
| 2.2.1 Визначення пропускної спроможності ділянки залізниці | 71 |
| 2.2.2 Розрахунки провізної спроможності залізниці | 74 |
| 2.3 Збільшення пропускної спроможності для покращенню залізничного сполучення між Україною та Польщею (на прикладі напрямку Варшава – Держкордон – Ковель – Сарни – Київ)..... | 77 |
| 2.3.1 Загальна характеристика ділянки Ковель-Сарни-Коростень | 77 |

| | | |
|-------|---|-----|
| 2.3.2 | Вплив на пропускну спроможність реконструктивних заходів | 80 |
| 2.3.3 | Модернізація залізничного напрямку Київ – Сарни – Ковель – Держкордон з виходом до Варшави..... | 83 |
| 2.4 | Доцільність застосування суміщеної колії для розширення міжнародних перевезень..... | 87 |
| 2.4.1 | Досвід використання суміщеної колії 1435/1520 мм на Львівській залізниці | 87 |
| 2.4.2 | Пріоритетні проекти суміщеної залізничної колії в Україні | 91 |
| 2.4.3 | Переваги та недоліки суміщеної колії | 97 |
| 2.5 | Перебудова однієї з колій двоколіїної ділянки на ширину 1435 мм | 100 |
| 2.5.1 | Стратегія переходу на євроколію на двоколіїній залізниці | 100 |
| 2.5.2 | Характеристика об'єкта дослідження | 101 |
| 2.5.3 | Аналіз результатів дослідження | 108 |
| 2.6 | Підвищення ефективності роботи залізниць зі спеціалізацією напрямків вантажних і пасажирських перевезень | 109 |
| 2.6.1 | Огляд наукових праць з питань розподілу вантажних і пасажирських перевезень на мережі залізниць | 109 |
| 2.6.2 | Мета роботи і методика дослідження | 113 |
| 2.6.3 | Моделювання руху потоку поїздів | 116 |
| 2.6.4 | Передача вантажних поїздів на паралельний хід..... | 120 |
| | Висновки до розділу 2..... | 122 |

| | | |
|-------|--|-----|
| | РОЗДІЛ 3 МІЖНАРОДНИЙ ДОСВІД ТА ПЕРЕДУМОВИ ПРОЄКТУВАННЯ ВИСОКОШВИДКІСНИХ МАГІСТРАЛЕЙ В УКРАЇНІ | 124 |
| 3.1 | Основні вимоги до високошвидкісних магістралей (HSR) | 124 |
| 3.2 | Досвід проєктування й експлуатації ВШМ у передових країнах | 129 |
| 3.2.1 | Японія | 129 |
| 3.2.2 | Франція..... | 133 |
| 3.2.3 | Німеччина | 136 |
| 3.2.4 | Італія | 139 |
| 3.2.5 | Іспанія..... | 141 |
| 3.2.6 | Великобританія..... | 144 |
| 3.2.7 | Китай | 146 |
| 3.2.8 | Сполучені Штати Америки | 150 |
| 3.3 | Плани організації високошвидкісного руху в країнах Європи, що межують з Україною | 153 |
| 3.3.1 | Польща | 153 |
| 3.3.2 | Словаччина | 156 |
| 3.3.3 | Угорщина | 157 |
| 3.3.4 | Румунія | 158 |
| 3.4 | Передумови створення високошвидкісних магістралей в Україні..... | 159 |
| 3.4.1 | Дослідження організації високошвидкісного руху поїздів в Україні | 159 |
| 3.4.2 | Проєктування залізничної колії європейського стандарту на новій трасі (північний хід)..... | 166 |

| | | |
|---|---|------------|
| 3.4.3 | Проектування залізничної колії європейського стандарту на новій трасі (південний хід) | 170 |
| 3.5 | Системний підхід до проектування високошвидкісних магістралей в Україні для інтеграції з європейською мережею | 173 |
| 3.5.1 | Будівництво ВШМ для інтеграції України з Європейським Союзом | 173 |
| 3.5.2 | Проблеми вибору напрямку ВШМ..... | 175 |
| 3.5.3 | Застосування системи автоматизованого проектування (САПР)..... | 177 |
| 3.5.4 | Вибір варіантів положення траси високошвидкісної магістралі..... | 179 |
| 3.5.5 | Метод встановлення оптимальної траси ВШМ | 180 |
| | Висновки до розділу 3..... | 190 |
| РОЗДІЛ 4 ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ КОЛІЇ ПРИ ВПРОВАДЖЕННІ ЄВРОПЕЙСЬКОЇ КОЛІЇ | | |
| 4.1 | Математичного моделювання напружено-деформованого стану залізничної колії | 192 |
| 4.1.1 | Зміна ширини однієї колії двоколіїної ділянки з 1520 на 1435 мм. | 193 |
| 4.1.2 | Застосування ділянки суміщеної колії 1435/1520 мм..... | 195 |
| 4.2 | Вплив роботи баласту на напружено-деформований стан колії..... | 198 |
| 4.3 | Моделювання напружено-деформованого стану залізничної колії для умов швидкісного руху..... | 203 |
| | Висновки до розділу 4..... | 210 |
| РОЗДІЛ 5 ОБҐРУНТУВАННЯ КОНЦЕПЦІЙ ПІДСИЛЕННЯ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА В УКРАЇНІ ТА ЄВРОПЕЙСЬКОМУ СОЮЗІ | | |
| 5.1 | Аналіз концепцій підсилення земляного полотна в Україні та Європейському Союзі | 212 |
| 5.2 | Варіанти підсилення земляного полотна та їхні особливості | 214 |
| 5.3 | Ранжування варіантів підсилення за позитивними та негативними параметрами | 219 |
| 5.4 | Розробка математичних моделей для визначення характеристик земляного полотна під суміщену колію і його підсилення | 222 |
| 5.4.1 | Розробка математичної моделі земляного полотна методом скінченних елементів | 222 |
| 5.4.2 | Закономірності напруженого стану земляного полотна до впровадження європейської колії | 226 |
| 5.4.3 | Закономірності деформованого стану земляного полотна після впровадження європейської колії..... | 230 |
| | Висновки до розділу 5..... | 239 |
| | ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ | 240 |
| | СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ | 243 |

ГЛОСАРІЙ ОСНОВНИХ ТЕРМІНІВ

Аналіз витрат та вигод (АВВ) є одним з найпоширеніших методів оцінки ефективності інвестиційних проєктів. Він дозволяє порівняти очікувані витрати з майбутніми вигодами, що дає змогу прийняти обґрунтоване рішення про реалізацію проєкту. Існує кілька основних методів АВВ, кожен з яких має свої особливості та застосовується в різних ситуаціях: недисконтовані методи – метод простого порівняння загальних сум за весь період реалізації проєкту, метод окупності; дисконтовані методи – чистий приведений дохід (NPV), внутрішня норма дохідності (IRR); індекс рентабельності (PI), період окупності з урахуванням дисконтування, аналіз витрат та вигод (АВВ).

Безпека залізничного транспорту – стан залізничного транспорту, за якого відсутній неприпустимий ризик, пов'язаний із заподіянням шкоди життю або здоров'ю громадян, майну, а також навколишньому середовищу, життю або здоров'ю тварин і рослин.

Вантажонапруженість B_0 та інтенсивність пасажирських перевезень Π_0 – характеристики ступеня завантаження роботою певної ділянки транспортної мережі (т·км/км або пас·км/км):

$$B_0 = \frac{\sum q_i l_i}{L}, \quad \Pi_0 = \frac{\sum p_i l_i}{L}$$

Вантажообіг $\sum q_i l_i$ – кількість транспортної роботи при перевезенні певних обсягів вантажу на певні відстані, вимірюється в тонно-кілометрах (т·км); пасажирообіг – див. стор. 12.

Верхня будова колії – частина залізничної колії, призначена для прийняття навантажень від коліс рухомого складу й передачі їх на нижню будову колії, а також для спрямування руху коліс рейковою колією.

Вид транспортної накладної ЦИМ/СМГС – це важливий документ для організації та контролю перевезення вантажів залізницею на міжнародному рівні. Основні характеристики накладної: ЦИМ - ця частина накладної регулює правила перевезення вантажів у межах країн, що підписали Конвенцію про міжнародні перевезення вантажів заліз-

ницею (СІМ). СІМ визначає умови перевезення, права і обов'язки перевізників та замовників послуг. СМГС - ця частина накладної стосується Спільної угоди про міжнародне перевезення вантажів залізницею (SMGS), яка регулює перевезення вантажів між країнами, що не є членами СІМ, або у випадках, коли перевезення проходить через країни, що підписали SMGS.

Високошвидкісна залізнична магістраль (ВШМ), англійською «High-Speed Rail» (HSR) – це високошвидкісна залізниця, на якій на всій її довжині або на окремих ділянках передбачається рух пасажирських поїздів зі швидкістю понад 200 км/год.

Європейська Комісія - це виконавчий орган ЄС, який відповідає за пропозицію нових законів, управління щоденною роботою Союзу та забезпечення дотримання договорів. Комісія є рушійною силою європейської інтеграції, вона ініціює та координує різноманітні проекти та програми, спрямовані на зближення країн-членів.

Європейський інвестиційний банк (ЄІБ) – це довгостроковий кредитор, який фінансує проекти, які сприяють інтеграції та згуртованості ЄС. ЄІБ відіграє ключову роль у фінансуванні інфраструктурних проєктів, що сприяють зближенню країн-членів та розширенню єдиного ринку.

Європейський Союз (ЄС) – об'єднання, створене в результаті тривалого процесу інтеграції європейських країн після Другої світової війни. Офіційною датою створення ЄС є 1 листопада 1993 року (офіційно – Договір про Європейський Союз). Цей договір започаткував сучасну структуру ЄС, включаючи спільну валюту (євро) та нові політичні й економічні інституції. Основні завдання ЄС: економічна інтеграція, єдина валютна система, забезпечення миру і стабільності, захист прав людини і демократії, екологічна політика, зовнішня політика і безпека, соціальна політика. Станом на 2024 рік Європейський Союз включає 27 країн-членів.

Інфраструктура залізниці – технологічна система, що складається із сукупності підсистем – залізничної колії, залізничного енергопостачання, залізничної автоматики й телемеханіки, залізничного електрозв'язку, станційних споруд і пристроїв, виділених ліній швидкісного залізничного транспорту.

Метод збалансованої оцінки з урахуванням багатьох критеріїв (MCDA) – це потужний інструмент прийняття рішень, який дозволяє оцінювати альтернативи за кількома критеріями одночасно. Він особливо корисний у складних ситуаціях, коли необхідно врахувати різноманітні фактори, які можуть бути як кількісними, так і якісними.

Механізм «Сполучення Європи» (Connecting Europe Facility, CEF) – це програма Європейського Союзу, спрямована на фінансування інфраструктурних проєктів у сферах транспорту, енергетики та цифрових технологій. Метою CEF є покращення зв'язків між країнами-членами ЄС, підвищення інтеграції та сприяння сталому розвитку інфраструктури. Програма надає грантове фінансування або фінансові інструменти для реалізації проєктів, які відповідають її цілям.

Міжнародний союз залізниць (UIC) – це міжнародна організація, заснована у 1922 році, яка об'єднує залізничні компанії, операторів, інфраструктурних менеджерів та інших учасників залізничного транспорту. Основна мета UIC – сприяти розвитку міжнародного залізничного транспорту, забезпечувати безпеку, ефективність і сталий розвиток залізничних систем. UIC розробляє технічні стандарти і рекомендації для залізничної інфраструктури, рухомого складу та технологій, що сприяє інтеграції залізничних систем у світі. Станом на 2023 рік до UIC входить близько 200 членів, серед яких залізничні адміністрації, оператори вантажних і пасажирських перевезень, інфраструктурні менеджери, дослідницькі установи та промислові компанії.

Організація співробітництва залізниць (ОСЗ) – це міжнародна організація, яка займається розвитком співробітництва між залізничними адміністраціями, підприємствами та іншими учасниками залізничного транспорту. ОСЗ була створена для забезпечення інтеграції залізничних мереж, підвищення ефективності перевезень, безпеки, а також сприяння розвитку залізничної інфраструктури. Мета та завдання ОСЗ: створення сприятливих умов для розвитку залізничного транспорту, сприяння інтеграції залізничних мереж країн-учасниць, вдосконалення технічних і експлуатаційних стандартів, розвиток спільних проєктів у сфері залізничного транспорту. Станом на 2023 рік до ОСЗ входить 25 країн.

Міжнародні транспортні коридори (МТК) – це мережа транспортних шляхів, що проходять через кілька країн і регіонів, забезпечуючи транзитні перевезення товарів і пасажирів між ними. Обидві системи ТЕН-Т і МТК функціонують паралельно й доповнюють одна одну, оскільки ТЕН-Т – це проєкт, зосереджений на створенні єдиної транспортної інфраструктури всередині Європейського Союзу, тоді як МТК охоплюють ширшу географію і включають сполучення між Європою, Азією, Близьким Сходом та іншими регіонами.

Обсяг перевезення пасажирів p_i – це кількість пасажирів, перевезених за одиницю часу.

Обсяг перевезень вантажів q_i – це кількість тонн продукції, що перевозиться за одиницю часу. Одиницею часу може бути будь-який період: доба, місяць, рік.

Пасажирообіг $\sum p_i l_i$ – кількість транспортної роботи з перевезення певної кількості пасажирів на певні відстані. Його розміри залежать від транспортної рухливості населення, тобто кількості поїздок за рік, що припадають на одного жителя, і середньої дальності поїздок, а також від рівня життя населення. Вимірюється в пасажиро-кілометрах (пас·км).

Посилення існуючих залізниць – у ДБН В.2.3-19-2018 під цим терміном розуміють модернізацію чи реконструкцію, тобто перехід на новий життєвий цикл внаслідок того, що всі існуючі резерви для вирішення конкретних завдань вичерпано.

Приведена вантажонапруженість, млн т·км/км, – визначається як відношення приведених тонно-кілометрів $\sum q_i l_i + k \sum p_i l_i$, віднесених до одного кілометра експлуатаційної довжини залізниць L :

$$B_{пр} = \frac{\sum q_i l_i + k \sum p_i l_i}{L}$$

Приведена вантажонапруженість використовується в ДБН В.2.3-019-2018 для встановлення категорії залізниці. Надмірне збільшення значення цього показника позбавляє мережу резерву з пропуску додаткових транспортних засобів, а отже, ускладнює роботу

транспорту на цій ділянці. Занадто мале значення цього показника свідчить про неефективність використання ділянки мережі й може служити підставою для закриття цього напрямку.

Провізна спроможність залізниці – це загальна кількість тонн вантажів і пасажирів, що перевозяться на ділянці упродовж року. Пропускна і провізна спроможність характеризують потужність залізниці, дуже важливі показники для характеристики можливостей транспортної мережі та ступеня її використання.

Продуктивність праці – це відношення транспортної роботи до кількості зайнятих у ній працівників. Вимірюється продуктивність праці в приведених тонно-кілометрах на одну людину:

$$P_0 = \frac{\sum q_i l_i + k \sum p_i l_i}{\text{Ч}}$$

де Ч – середньооблікова чисельність працівників, що беруть участь у перевезеннях.

Пропускна спроможність залізниці – це максимальна кількість поїздів, які можуть проходити по ділянці залізниці за добу. Можна визначати пропускну спроможність місць перевантаження, наприклад, при зміні ширини колії.

Технічні специфікації для взаємодії (Technical Specifications for Interoperability, TSI). TSI розроблені в рамках європейської політики для забезпечення сумісності та інтеграції на залізничних мережах Європейського Союзу. Основна мета TSI – стандартизація і уніфікація залізничних систем у країнах ЄС, щоб поїзди могли безперешкодно курсувати між різними державами, використовуючи єдині технічні вимоги для інфраструктури, рухомого складу і систем управління.

Технічні стандарти сумісності Європейських залізничних систем – TSI (Technical Standards of Interoperability) – сферою застосування TSI є європейська залізнична мережа, робота якої регулюється Директивою 96/48 з поправками, внесеними Директивою 2004/50. Відповідно до Директиви 96/48, транс'європейська залізнична система поділяється на структурну (інфраструктура, енергозабезпечення, контроль управління, рухомий склад) та функціональну (обслуговування,

охорона навколишнього середовища, експлуатація, споживач) підсистеми.

Транс'європейська транспортна мережа (TEN-T) – це масштабний проєкт Європейського Союзу, спрямований на створення єдиної, ефективної та добре інтегрованої транспортної системи, що об'єднує країни ЄС і полегшує перевезення пасажирів і вантажів усередині Європи. TEN-T включає залізниці, автомагістралі, водні шляхи, порти, аеропорти та мультимодальні транспортні вузли. Основна частина проєкту – це план на період до 2030 року, коли планується завершити основну мережу. Паралельно з цим триває робота над комплексною мережею, яка має бути завершена до 2050 року.

Транспортні коридори – умовна назва сукупності магістральних транспортних комунікацій з відповідними облаштуваннями різних видів транспорту, які узгоджено функціонують у певному напрямку відповідно до стандартів міжнародного рівня.

Фонд Європейського Союзу CEF (Connecting Europe Facility) – основний інструмент для фінансування розвитку Транс'європейської транспортної мережі (TEN-T) Фонд створений у 2014 році для інвестицій у транспортні, енергетичні, цифрові та телекомунікаційні проєкти.

Чистий дисконтований дохід NPV є одним з найпоширеніших та найфундаментальніших критеріїв. Він показує сумарну чисту вигоду від проєкту, з дисконтуванням майбутніх грошових потоків до теперішньої вартості. NPV вважається кращим, якщо він позитивний

Щільність транспортної мережі за кількістю населення, км/1 млн чол., визначається часткою від ділення суми довжин експлуатованих ділянок доріг конкретного виду транспорту на кількість населення.

Щільність транспортної мережі за площею, км/1000 км², визначається часткою від ділення суми довжин експлуатованих ділянок доріг конкретного виду транспорту на загальну площу території, на якій вони розташовані.

ВСТУП

Для України, як країни з великим транзитним потенціалом, вкрай важливим є досягнення стратегічної мети – інтеграції вітчизняних залізниць у транспортну мережу Центральної та Західної Європи.

Можливості залізничного транспорту для організації перевезень між країнами Європейського Союзу та України використовуються не повною мірою, оскільки є низка технічних причин несумісності транспортних систем України і країн Європи, а саме: різна ширина колії, характеристики рухомого складу, вид СЦБ, напруга в контактній мережі, габарити тощо.

Забезпечення мобільного руху поїздів, перш за все з країн ЄС, є актуальним завданням для України. 1 грудня 2022 року в будівлі Сенату Республіки Польща відбулася конференція «Україна в системі залізничної інфраструктури Європейського Союзу». Фахівці Українського державного університету науки і технологій висвітлили програму науково-технічного супроводження реалізації проекту, що передбачає впровадження європейської колії (1435 мм) на території України. Таке рішення дозволяє поетапний перехід України на європейський стандарт, щоб поєднати українські залізниці з ЄС.

В Україні вже є досвід використання європейської колії. Так, поїзди, що прямують зі Словаччини в Румунію, проходять по європейській колії на українській території (Чоп, Батьово, Королево, Дякове) без заміни колісних пар.

Актуальним завданням сьогодні є розробка теоретико-методологічних підходів і практичних рекомендацій щодо визначення технічних можливостей створення залізничних магістралей в Україні за європейським стандартом. І хоч повний перехід на європейську колію є досить довготерміновою перспективою, проте це необхідний крок. Саме тому слід зробити його одним із пріоритетних напрямів та максимально залучати до нього іноземних інвесторів і, зокрема, Європейський Союз, який усе більше демонструє зацікавленість в інтеграції України у свою економіку та логістичну інфраструктуру.

В даній роботі викладено результати аналізу техніко-технологічних проблем, викликаних несумісністю стандартів української та європейської колійної інфраструктури. Аналіз технічного стану й інфраструктури міжнародних транспортних коридорів у межах України дозволив виявити особливості кожного МТК, реконструкція яких сприятиме

прискореній доставці вантажів і пасажирів, зацікавить європейські та інші держави в транзитних перевезеннях через Україну.

У монографію увійшли результати, отримані під час виконання науково-дослідної роботи «Наукове обґрунтування впровадження європейської колії на території України в повоєнний період» – грантова підтримка Національного фонду досліджень України у межах конкурсу «Наука для відбудови України у воєнний та повоєнний періоди», а також у ході виконання досліджень згідно з Угодою про асоціацію між Україною та Європейським Союзом при підготовці магістрів спеціальності 273 Залізничний транспорт спеціалізації «Інтероперабельність і безпека на залізничному транспорті» в Українському державному університеті науки і технологій.

Під час досліджень було застосовано системний підхід, який передбачає аналіз світового досвіду, дослідження передумов щодо науково-технічного забезпечення сталого розвитку залізничних перевезень у міжнародному сполученні Україна – Євросоюз. Розроблено методологічні підходи та методи оцінки ефективності розвитку інфраструктури та спеціалізованого рухомого складу для здійснення міжнародних перевезень при зміні стандарту залізничної колії.

Результати роботи оприлюднені в доповідях на Міжнародних конференціях: Міжнародна науково-практичної конференції здобувачів вищої освіти, викладачів та науковців «Сучасні дослідження: транспортна інфраструктура та інноваційні технології» (Київ, 29-30 листопада 2023 р.), 82 Міжнародна науково-практична конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту», (Дніпро, 20-21 квітня 2023 р.), II Міжнародна науково-практична конференція «Логістика і транспортна безпека: проблеми та перспективи розвитку в контексті аналізу сучасних викликів і загроз» (Дніпро, 09 листопада 2023 р.), Proceedings of 27th International Scientific Conference. Transport Means 2023. Lithuania, TRANSBALTICA 2024: Transportation Science and Technology - Invitation Letter (Вільнюс, Литва, 19-20 вересня 2024 р.), 10-та Міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд і будівель на залізничному транспорті» (Харків, 20-22 листопада 2024 р.).

Реалізація європейської програми розширення євроколії на країни Східної Європи

1.1 Стратегія поетапного впровадження євроколії на пріоритетних напрямках України

1.1.1 Мета стратегії і прогнози поетапного переходу на євроколію

Основною метою заміни колії на стандарт 1435 мм є забезпечення безперешкодного руху поїздів між країнами Європейського Союзу, які використовують цей стандарт. Така європейська колія використовується в більшості країн Європи і дозволяє підключення до існуючої мережі залізниць у Європі без необхідності перевантажувати вагони або змінювати візки в пунктах перестановки вагонів.

З метою інтеграції в транспортну систему Європи, Україна веде роботу зі стандартизації ширини колії на 1435 мм. Питання щодо будівництва в Україні колії 1435 мм (євроколії) виникало неодноразово протягом історії. Ось декілька ключових моментів:

19 століття. Після будівництва перших залізниць в Україні, які використовували колію 1524 мм, виникали дискусії про можливість переходу на євроколію (1435 мм). Це було пов'язано з кращим сполученням з європейськими країнами та можливістю використання більш сучасного рухомого складу.

1920-ті роки. Після здобуття Україною незалежності в 1917 році розглядалося питання про перехід на євроколію, але воно не було реалізовано через брак коштів та політичну нестабільність.

1990-ті роки. Після розпаду Радянського Союзу та здобуття Україною незалежності питання про перехід на євроколію знову стало актуальним. Було підписано ряд угод з європейськими країнами про співпрацю у сфері залізничного транспорту, які передбачали модернізацію української залізничної мережі та можливий перехід на євроколію.

2000-ні роки. Було розпочато будівництво перших ділянок євроколії в Україні, насамперед на кордоні з Польщею, Румунією та Угорщиною.

2023 рік. У липні 2023 року Європейська комісія та Європейський інвестиційний банк оприлюднили стратегію інтеграції залізничних мереж України, Молдови та Європейського Союзу, яка передбачає поетапний перехід на євроколію на всіх основних напрямках в Україні (далі – Стратегія). Основні цілі Стратегії:

- з'єднати залізничні мережі України та Молдови з мережею ЄС за допомогою євроколії шириною 1435 мм;

- сприяти збільшенню обсягів торгівлі та інтеграції до єдиного європейського транспортного простору;

- підвищити рівень обслуговування пасажирів та вантажотправників.

Стратегія передбачає поетапне впровадження євроколії на пріоритетних напрямках.

Перший етап (до 2030 року):

- будівництво євроколії на лініях: Мостиська – Львів – Київ – Дніпро – Покровськ – Донецьк (Україна), Кишинів (Молдова) – Ясси (Румунія);

- модернізація існуючих залізничних ліній на цих напрямках.

Другий етап (до 2040 року):

- розширення мережі євроколії на інші важливі напрямки в Україні та Молдові;

- підключення до євроколії морських портів та промислових центрів.

Третій етап (після 2040 року):

- завершення будівництва мережі євроколії в Україні та Молдові;

- інтеграція залізничних систем України та Молдови до єдиної європейської системи управління та тарифної політики.

Загальна вартість реалізації Стратегії оцінюється в 7 млрд євро. Очікується, що кошти будуть залучені з різних джерел, включаючи грантові програми ЄС, кредити міжнародних фінансових інституцій та приватні інвестиції. Важливо зазначити, що Стратегія є лише рамковим документом. Для її реалізації необхідно розробити детальні плани та програми дій, а також забезпечити необхідне фінансування. Крім

того, перехід на євроколію потребуватиме внесення змін до чинного законодавства України та Молдови.

Варто зазначити, що в Україні вже існують ділянки залізниці з європейською колією, які прилягають до Польщі, Румунії, Словаччини та Угорщини.

На даний момент Укрзалізниця проводить роботи з модернізації залізничної інфраструктури з метою переходу на стандарт 1435 мм. Будівництво залізниць європейського стандарту відбувається в окремих регіонах України, зокрема на маршруті Львів – Краковець, де вже побудовано новий залізничний перехід з шириною колії 1435 мм.

У межах програми ЄС «Механізм Сполучення Європи» (CEF) було погоджено проєкт інтеграції залізничної системи України в транспортну систему блоку [1].

CEF (Connecting Europe Facility) – це фонд Європейського Союзу, створений у 2014 році для інвестицій у транспортні, енергетичні, цифрові та телекомунікаційні проєкти. Зокрема, це основний інструмент для фінансування розвитку Транс'європейської транспортної мережі (TEN-T).

Проєкт передбачає вдосконалення залізничної мережі та розвиток колії 1435 мм для забезпечення технологічної сумісності та підвищення пропускної спроможності залізничною інфраструктури. Його загальний бюджет 85.91 млн євро, CEF надасть «Укрзалізниці» 42.95 млн євро. У рамках зазначеної заявки планується реалізувати:

- проєктування реконструкції інфраструктури залізниці з впровадженням колії 1435 мм на ділянці Чоп – Львів;
- проєктування реконструкції інфраструктури залізниці з будівництвом колії 1435 мм та електрифікацією на ділянці Львів – Чернівці – Вадул – Сірет – Держкордон;
- розробку стратегії реконструкції Львівського залізничного вузла з урахуванням перспектив розширення залізничної мережі колії шириною 1435 мм транс'європейської транспортної мережі на території України;
- проєктування та будівництво колії 1435 мм з електрифікацією на ділянці Павлове-2 – Матьовце – Ужгород;
- електрифікацію колії 1435 мм на ділянці Чоп – Ужгород.

Крім цього передбачені витрати на проведення експертизи щодо відповідності вимогам TSI вищезазначених проєктів, а також ділянок

Ковель – Ягодин – Держкордон та Медика/Мостиська II – Львів (Скнилів).

Також планується модернізація залізничних магістралей на сході та півдні України, яка передбачає заміну верхньої будови колії, переведення залізничних переїздів на нову ширину колії, реконструкцію тунелів, мостів та інших інженерних споруд.

Україна з Польщею домовилися про з'єднання Варшави і Києва. Наразі точний маршрут з'єднання залізниці між Варшавою та Києвом ще не визначений, оскільки проєкт знаходиться на етапі розробки. Зокрема, за деякими даними, планується побудувати новий залізничний міст через річку Сян, який з'єднає Польщу та Україну.

В рамках цього проєкту передбачається модернізація існуючих залізничних ділянок та будівництво нових у зоні прикордонного переходу. Відомо, що проєкт реалізуватиметься за сприяння Європейського Союзу та польської сторони, яка вже виділила кошти на попереднє вивчення проєкту.

В цілому, з'єднання залізниці між Варшавою та Києвом є важливим кроком у зміцненні транспортних зв'язків між Україною та Польщею, що сприятиме розвитку економіки та підвищенню рівня життя населення обох країн.

1.1.2 Переваги й недоліки впровадження європейського стандарту

Інтеграція в ЄС неможлива без зміни стандарту ширини залізничної колії. Звичайно, цей процес складний і потребує значних інвестицій, однак останні рішення органів Євросоюзу в сфері залізничного транспорту свідчать, що перехід на євроколію обов'язковий для всіх країн-учасниць у середньостроковій перспективі (до 2050 року). Тому для вступу в ЄС Україна має бути готова до глобальної перебудови залізничної мережі. Переведення залізниць на європейський стандарт може бути одним з інструментів для досягнення окреслених цілей та реалізації цих напрямків розвитку.

Закон України «Про залізничний транспорт» від 23 березня 2017 року прямо не передбачає перехід на європейський стандарт залізниць (ширина колії 1435 мм), однак, містить засади, які можуть бути використані для обґрунтування такого переходу:

– Стаття 2 визначає залізничний транспорт як «одну з важливих базових галузей економіки України, що забезпечує її внутрішні та зовнішні транспортно-економічні зв'язки і потреби населення у перевезеннях»;

– Стаття 3 встановлює цілі державної політики у сфері залізничного транспорту, до яких належать:

– інтеграція залізничного транспорту України до європейської та світової транспортних систем;

– забезпечення конкурентоспроможності залізничного транспорту на внутрішньому та зовнішньому ринках.

– Стаття 14 визначає основні напрямки розвитку залізничного транспорту, до яких належать:

– оновлення та модернізація залізничної інфраструктури;

– впровадження нових технологій та техніки;

– підвищення рівня обслуговування пасажирів та вантажовідправників.

Незважаючи на складність та масштабність завдання, перехід на євроколію в Україні може мати значні переваги для країни:

– завдяки кращому сполученню з європейською мережею залізниць стане легше та дешевше перевозити товари до ЄС та з нього. Це може призвести до значного зростання експорту та імпорту, що стимулюватиме економічне зростання та створить нові робочі місця;

– перехід на євроколію дозволить Україні стати частиною єдиного європейського транспортного простору. Це відкриє нові можливості для співпраці з європейськими партнерами та полегшить подорожі людей та перевезення вантажів по всій Європі;

– нові європейські стандарти залізничної інфраструктури та рухомого складу призведуть до покращення якості обслуговування пасажирів та вантажотправників. Це включатиме більш комфортні поїзди, коротший час у дорозі, а також більш надійне та безпечне транспортне сполучення;

– завдяки використанню сучасних європейських технологій та кращої логістики очікується зниження витрат на транспортні перевезення. Це зробить українські товари більш конкурентоспроможними на світовому ринку;

– сучасні європейські локомотиви та вагони більш екологічні, ніж ті, що використовується в Україні наразі. Перехід на євроколію

може призвести до значного зниження викидів парникових газів та інших забруднювачів.

Противники переходу висловлюють занепокоєння з приводу його високої вартості, тривалості реалізації та необхідності змін у законодавстві. Тому це питання потребує ретельного вивчення всіх аспектів цього проєкту, щоб прийняти обґрунтоване рішення щодо його доцільності.

Звичайно, перехід на євроколію також матиме певні виклики:

- будівництво нових залізничних ліній та модернізація існуючих потребуватиме значних інвестицій;

- перехід на євроколію – це довгостроковий проєкт, який потребуватиме багато часу та зусиль;

- необхідність змін до чинного законодавства України.

Незважаючи на ці виклики, перехід на євроколію є стратегічно важливим завданням для України.

1.2 Дослідження відмінностей української та європейської залізничної інфраструктури

1.2.1 Європейські країни, що межують з Україною

Залізнична мережа України органічно вписується у європейську через Польщу, Словаччину, Угорщину, Румунію, Молдову, Болгарію (поромна переправа). Україна має надзвичайно вигідне географічне положення, пов'язане з її близькістю до світових, зокрема центрально-і західноєвропейських, ринків. Однак вигідне, з погляду транспортних перевезень, геополітичне розташування України не використовується повною мірою.

Стратегічним завданням науково-технічної політики в галузі транспортної системи України є вихід на світовий рівень за технічними параметрами та якістю послуг, що реалізуються транспортом. У зв'язку з цим першочерговим і пріоритетним завданням для транспортної галузі є розширення наукових досліджень з проблем створення прогресивних технологій організації міжнародних вантажних перевезень, формування та функціонування ефективної транспортної системи, розробка принципово нових систем управління з використанням прогресивних інформаційних технологій.

Україна розташована в центральній частині Східної Європи на перетині транспортних шляхів з Європи в Азію і зі Скандинавських країн до країн Середземноморського регіону. На рис. 1.1 наведено карту України із зазначенням країн, з якими вона межує.

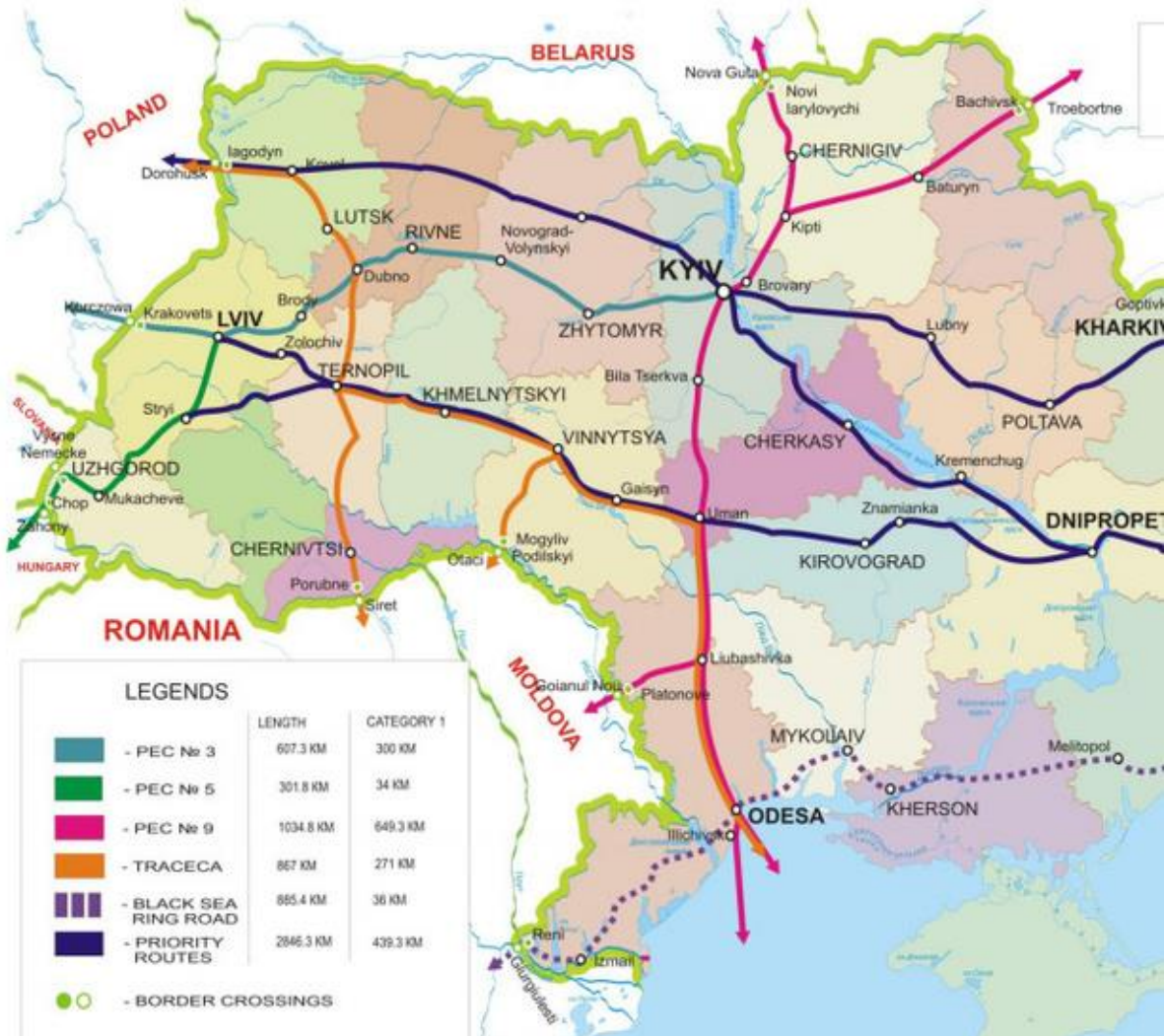


Рис. 1.1. Україна і суміжні з нею країни [2]

Згідно з економічними прогнозами, найбільше зростання обсягів вантажних перевезень очікується через прикордонні переходи Україна – Польща (табл. 1.1).

Прикордонні переходи

| Найменування переходів | Суміжна держава | Напрямок |
|------------------------|-----------------|--------------------|
| Дорогуськ – Ягодин | Польща | Хелм – Ковель |
| Грубешув – Ізов | Польща | Славкув – Ковель |
| Медика – Мостиська-2 | Польща | Перемишль – Львів |
| Чірна-над-Тісоу – Чоп | Словаччина | Братислава – Львів |
| Матєвце – Ужгород | Словаччина | Кошице – Ужгород |
| Захонь – Чоп | Угорщина | Будапешт – Львів |
| Дорнешти – Вадул-Сірет | Румунія | Вікшани – Львів |

1.2.2 Польські державні залізниці

Польські державні залізниці (пол. Polskie Koleje Państwowe Spółka Akcyjna, PKP SA) – державна залізнична компанія. Протяжність ліній 19.290 тис. км, зокрема магістральних колій 4 235 км, першорядних 10 551 км, другорядних 3 815 км, ділянок місцевого значення 2 561 км. Частка виконуваної експлуатаційної роботи відповідно становить: 43.6; 48.6; 6.4; 1.4 % [3].

Максимальна технічна швидкість і частка виконуваної експлуатаційної роботи відповідно: понад 120 км/год (7.6 %), 120-80 км/год (65.8 %), 79-50 км/год (21.2 %), менше ніж 50 км/год (5.4 %).

У 2023 р. перевезено 216.3 тис. тонн вантажів, зокрема внутрішні перевезення становили 61 %, експорт – 22 %, імпорт – 14.4 %, транзит – 2.6 %; пасажирські перевезення – 318.1 млн пасажирів.

Близько 19 тис. км залізничних ліній мають колію 1435 мм, діє лінія з широкою колією (1520 мм) Ізов – Грубешів – Славкув Південний (м. Катовіце). Між Польщею і Швецією працює поромна переправа.

Автоблокуванням оснащено 2108 км, 17 станцій з 312 стрілочними переводами і 95 переїздів, які керуються комп'ютерними системами.

Польські залізниці зберігають першорядні позиції в перевезеннях на внутрішньому ринку, систематично підтримують і поліпшують діяльність на міжнародних транспортних коридорах [5].

Основні залізничні станції і вузли: Варшава, Ольштин, Катовіце, Вроцлав, Гданськ, Краків, Люблін (рис. 1.2).



Рис. 1.2. Схема польських залізниць [4]

8 лютого 2022 року було відправлено контейнерний поїзд, завантажений експортними товарами, із залізничного сухого порту Хуньчунь (Китай) до Малашевича (Польща), ознаменувавши старт маршруту «Нінбо – Хуньчунь – Європа».

У Польщі є плани організації високошвидкісного руху поїздів (див. розділ 3).

1.2.3 Словацькі залізниці

Словацькі залізниці (Železnice Slovenskej republiky - ŽSR) – державне підприємство, установа, відповідальна за управління залізничною

мережею Словаччини. Експлуатаційна довжина 3 627 км. Залізнична колія шириною 1 435 мм має протяжність одноколійних ліній 68.7 %, двоколійних – 28.2 %. Крім того, вузькоколійних залізниць – 50 км, ліній з колією 1520 мм – 100 км. Електрифіковано 1587 км, зокрема 51 % на постійному струмі 3 кВ і 49 % км на змінному струмі 25 кВ, 50 Гц. На залізничній колії діє близько 10 тисяч стрілочних переводів; працюють 402 станції [6].

Залізниці в основному прокладені вздовж річок і між гір. Через гірський ландшафт 252 км головних колій мають криві радіусом менше 300 м, 814 км мають ухил 10 ‰. На залізницях побудовано 2285 мостів загальною довжиною майже 50 км і 76 тунелів (43.3 км).

Основні залізничні вузли: Братислава, Жиліна, Зволен і Кошице; прикордонні станції: Кути, Чадца, Комарно, Русовцах, Девінська Нова Вес, Плавеч; перевантажувальні станції: Матшовце і Чірна-над-Тісоу (рис. 1.3).

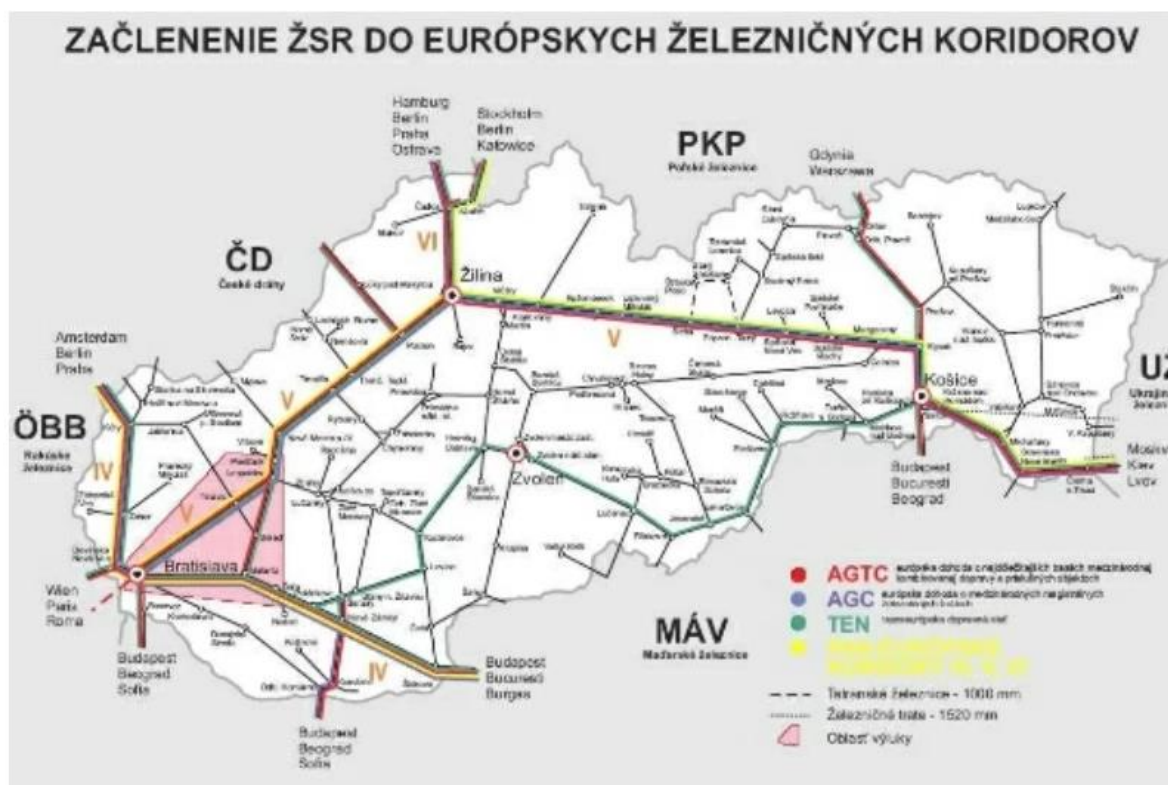


Рис. 1.3. Схема словацьких залізниць [7]

Торговий і перевантажувальний центр Чірна-над-Тісоу забезпечує комерційну діяльність, перевантаження товарів з вагонів широкої колії 1520 мм у вагони для колії 1435 мм і навпаки, а також додаткові

послуги, ремонт технічних засобів, контакт з органами державного управління [8].

Щодо забезпечення країни транспортними послугами залізниці Словацької Республіки (ZSR) належать до найбільш ефективно діючих залізниць у Європі. Частка залізниці в транспортних перевезеннях країни становить 19.8 %.

Залізниці Словаччини є популярним засобом пересування. За багатьма популярними маршрутами поїзди курсують щогодини. Найбільш значимі маршрути: Братислава – Жиліна, Братислава – Штурово, Жиліна – Кошице, Братислава – Кути та ін.

З метою підвищення якості послуг на транспортному ринку залізничними компаніями організуються та застосовуються різні види міжнародного транспортування вантажів. З них найбільш перспективним є розвиток комбінованих, інтермодальних, мультимодальних перевезень, де транспортними та логістичними компаніями накопичено великий досвід. Залізниці Словацької Республіки мають розвинену інфраструктуру для організації комбінованих перевезень.

У міжнародному пасажирському сполученні курсують поїзди категорії «Євросіті», «Інтерсіті», «Експрес», а також швидкі, прискорені й пасажирські (рис. 1.4).



Рис. 1.4. Електричка з Попраду до Штрбського Пlesa [9]

Максимальна швидкість пасажирського поїзда 140 км/год, середня 120 км/год. Існуюча головна ділянка лінії від Ужгорода до Кошице

електрифікована на постійному струмі 3 кВ. Щодо конструкції верхньої будови колії, то передбачена безстикова колія, рейки UIC60 на залізобетонних шпалах, баласт щебеневий товщиною під шпалою 30 см, пружне скріплення.

1.2.4 Залізниці Угорщини

Залізниці Угорщини (Magyar Allamvasutak – MAV) являють собою густу мережу, що розгалужується в усі напрямки від Будапешта.

Реконструкція магістралі Белград – Будапешт, що здійснюється за участю китайських компаній, є одним з найбільших інфраструктурних проєктів Центральної та Східної Європи [10].

Держава здійснює управління транспортною інфраструктурою країни через Міністерство національного розвитку. Перевезення виконує державна компанія MAV. В Угорщині діє також спільно з Австрією залізнична компанія АТ «Залізниці Дьйор – Шопрон – Ебенфурт», яка за довжиною ліній і обсягами роботи має другорядне значення (Угорщині належать 60 % акцій, Австрії майже 30 % і приблизно 10 % – іншим акціонерам). Залізнична мережа MAV розділена на 7 дирекцій: Будапештська, Дебреценська, Мишкольцька, Печська, Сегедська, Сомбатхейська й Захонська (перевантажувальна комерційна дирекція).

Експлуатаційна довжина залізниць (2020 р.) 7 829 км (27-ме місце у світі) [8]. Ширина колії в основному 1435 мм; широкую колію мають залізниці в Захонському вузлі (36.5 км), разом зі станційними коліями їх загальна протяжність становить 149.6 км. На мережі працюють 736 станцій. Угорські залізниці мають 26 стикових пунктів із залізницями сусідніх країн, зокрема з Україною (Захонь – Чоп, Еперешке – Батьово), з Румунією, Хорватією, Словенією, Австрією, Словаччиною (рис. 1.5).

Залізниці Угорщини виконують 29.3 % вантажних і 39.0 % дальніх пасажирських перевезень у країні. Територією Угорщини через залізничну мережу проходять міжнародні транспортні коридори: IV, V, Va, Vb, Vv/10a [12]. За щільністю залізничної мережі Угорщина не поступається середньоєвропейським показникам. Двоколіїні лінії мають довжину 1292 км (16.6 %), 39.5 % загальної протяжності залізниць електрифіковано; безстикова колія становить 45.5 %; майже на 35 % залізниць реалізується максимальна допустима швидкість 100- 120 км/год, на лінії Будапешт – Хедьешхалом швидкість – до

160 км/год. Автоблокуванням обладнано 35 % ліній. З тягових засобів 33.3 % складають електровози, 1.7 % електропоїзди, 43.9 % тепловози і 21.1 % дизель-поїзди.



Рис. 1.5. Схема залізниць Угорщини [11]

Комерційне, технологічне й юридичне забезпечення організації перевезень здійснюють спеціалізовані дирекції з вантажних і пасажирських перевезень. Оперативне управління перевезеннями пасажирів і вантажів виконує диспетчерський центр спеціалізованої дирекції з руху.

У 2023 році перевезено 43.2 млн пасажирів і 32.1 млн т вантажів; пасажирообіг становив 6.8 млрд пас·км, вантажообіг – 20.3 млрд т·км.

У вантажообігу внутрішнє повідомлення становить 2.3, експорт 1.5, імпорт 2.4, транзит 1.2 млрд т·км. Середня дальність вантажних перевезень 171 км, середня маса вантажного поїзда 939 т; середній оборот вантажного вагона 3.8 діб. Електричною тягою виконується 83.4 % вантажообігу (нетто).

Угорські поїзди діляться на 2 класи. Крім основних класів поїзди поділяються ще й на категорії: «Ех» – поїзди-експреси, «ІС» – поїзди Intercity, що з'єднують міста в країні, «G» – швидкісні поїзди, «S» – звичайні поїзди. Між Будапештом і містами країн Європи курсують

як нічні поїзди EuroNight зі спальними й сидячими вагонами, так і денні, тільки із сидячими вагонами (рис. 1.6). Ці поїзди здебільшого не угорські, а формування тих країн, де в них пункт призначення від Будапешта.



Рис. 1.6. Поїзд угорських залізниць марки Bombardier Talent під час зупинки на вокзалі Будапешт – Делі [12]

З України доходять до Будапешта вагони такого сполучення: Київ – Будапешт, Київ – Белград, Львів – Будапешт. Усі ці вагони потрапляють у Будапешт одним поїздом через перехід Чоп – Захонь і прямують до Будапешта, а далі перечіпляються до поїздів Будапешт – Белград і Будапешт – Венеція.

У процесі розвитку залізничного транспорту з'явилася необхідність масового перевантаження на кордоні Угорщини. Для цього в східній частині Угорщини в районі ст. Захонь поетапно був створений потужний перевантажувальний комплекс – один з найбільших «сухопутних портів» Середньої і Східної Європи, у розвиток якого вкладаються інвестиції з метою збільшення переробної спроможності району, створення митних складів загального користування й захисту навколишнього середовища.

Між залізничними мережами ЧФР (Румунія) та MAV (Угорщина) використовується інформаційний додаток ІММСОМ і, зважаючи на хорошу взаємодію між адміністраторами залізничної інфраструктури

та залізничними перевізниками, середній час простою вантажних поїздів на прикордонних станціях був оптимізований.

1.2.5 Румунські залізниці

Румунські залізниці (рум. Căile Ferate Române, CFR) – державна румунська залізнична компанія.

Румунія має міжнародне залізничне сполучення з усіма сусідніми країнами (Сербією, Угорщиною, Україною, Болгарією, Молдовою), кількома країнами Євросоюзу (наприклад, Австрія) і Туреччиною [13] (рис. 1.7).

Експлуатаційна довжина залізниць 11.380 тис. км, з них 4 тис. км (36.9 %) електрифіковано на змінному струмі (25 кВ, 50 Гц). Ширина колії в країні 1435 мм, є також ділянки 1520 мм і 1000 мм.

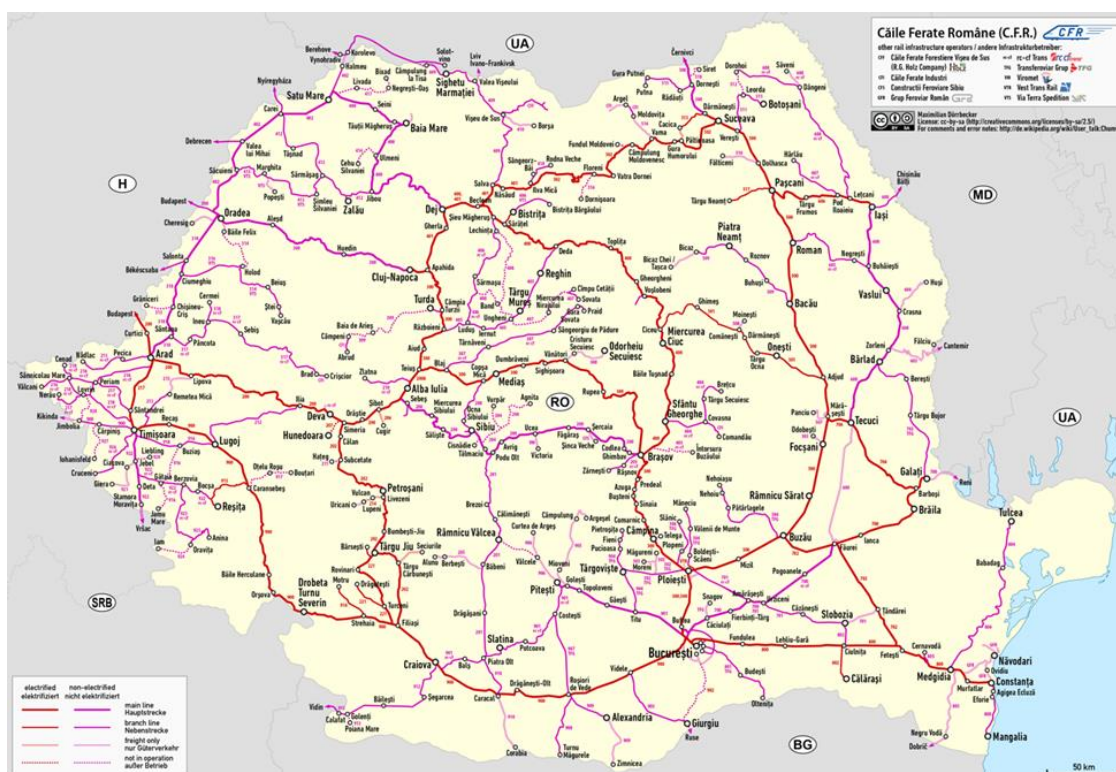


Рис. 1.7. Схема залізниць Румунії [14]

Середня швидкість руху поїздів на румунських дорогах становить 60 км/год. Головними залізничними вузлами вважаються Ясси, Конс-

танца, Ремніца, Бухарест, Галац. З Бухареста розходиться чотири основних напрями: Бухарест – Констанца; Бухарест – Плоєшті – Брашов – Тиргу – Муреш і далі на Клуж – Напока, Арад, Тімошоаре, Сату-Маре; Бухарест – Плоєшті – Бузеу – Бакеу і далі на Ясси й Сучаву; Бухарест – Крайова – Тімошоаре. Від цих напрямків і Бухареста розходиться ще кілька напрямків. Між собою вони з'єднані великою кількістю рокадних ліній.

У Румунії реалізуються довгострокові програми модернізації інфраструктури. До великих проєктів розвитку інфраструктури входять два, пов'язаних з так званими критськими коридорами. Румунська ділянка довжиною 888 км, що є складовою коридору IV, проходить зі сходу на захід від угорського кордону до чорноморського порту Констанца; ділянка довжиною 585 км коридору IX північ – південь пов'язує Україну з Болгарією і Грецією. Коридори IV і IX вже інтенсивно використовуються для міжміських перевезень.

Реконструкція дозволила підвищити максимальну швидкість пасажирських поїздів з 120 до 160 км/год і вантажних з 80 до 120 км/год. Обмеження швидкості збереглися на окремих ділянках у Карпатах, де ухили досягають 27 ‰, і в кривих малого радіуса. Крім реконструкції колії із заміною або посиленням штучних споруд передбачається ремонт контактної мережі змінного струму напругою 25 кВ.

Механізація робіт з утримання інфраструктури дозволила скоротити чисельність персоналу до 37.5 тис. Очікується, що скорочення часу поїздки за рахунок підвищення максимальної швидкості руху до 160 км/год приведе до збільшення кількості пасажирів.

З 2023 року компанія CFR Calatori виконала половину пасажирообігу у внутрішніх сполученнях, інша половина припадає на автомобільний і повітряний транспорт. Підйом національної економіки став поштовхом до зростання перевезень, пасажирообіг досяг 5800 млн пас·км.

Перспективи розвитку залізничного транспорту пов'язані також з використанням сучасних високошвидкісних поїздів типу ICE або Pendolino в сполученні з Віднем і Грецією. Аналізується можливість будівництва швидкісної залізниці за маршрутом Бухарест – Яси – Кишинів [13].

Встановлено, що протяжність залізниць в Румунії в 1.7 рази менша, ніж в Україні, при цьому відсоток електрифікованих ліній становить

37 % проти 47 %; пасажирообіг в Румунії менший у 6.5 разів, а вантажообіг – у 8 разів порівняно з Україною.

Генеральний план розвитку транспорту Румунії передбачає інвестиції й радикальні інституційні зміни, спрямовані на те, щоб кардинальним чином покращити ситуацію на залізничному транспорті країни.

1.2.6 Молдовські залізниці

Молдовська залізниця (рум. *Calea Ferată din Moldova (CFM)*) – залізничний оператор у Республіці Молдова, який здійснює пасажирські та вантажні перевезення, а також відповідає за залізничну інфраструктуру в межах країни. Загальна протяжність мережі Молдовської залізниці станом на 2023 рік – 1157 км, з яких 77 км стандартної колії (1435 мм). Вся мережа неелектрифікована. Межує з румунськими залізницями (1520/1435 мм – зміна ширини колії) на заході, і Укрзалізницею на півночі та сході (рис. 1.8). Мережа залізниць включає 84 станції, відкриті для вантажів і пасажирські перевезення. Логістичний термінал вантажів – Міжнародний вільний порт Джурджулешть оснащений суміщеною колією 1435/1520 мм.

Транспортно-логістична стратегія на 2013-2022 рр. визначає пріоритети та основний вектор для розвитку галузі залізничного транспорту. Вона спрямована на створення нормативно-правової бази, реструктуризації Молдовської залізниці, відновлення залізничної інфраструктури, поліпшення парку локомотивів і вагонів.

Відповідно до плану модернізації залізничної інфраструктури для залізничних ділянок основної мережі TEN-T, які мають сполучення з сусідніми державами, передбачає відновлення курсування пасажирських поїздів у сполученні Молдова – Румунія маршрутами Кишинев – Бухарест Норд, Кишинів – Унгени (ЧФМ) – Сокола (Яси) (ЧФР), Унгени (ЧФМ) – Яш (ЧФР).

За інформацією Молдовської залізниці застосування накладної ЦИМ/СМГС здійснюється за всіма транзитними напрямками, а також в експортному та імпортному повідомленнях, що дозволило скоротити час на процедуру, необхідну для переоформлення накладних на прикордонних передавальних станціях.



Рис. 1.8. Схематична карта прикордонних переходів [15]

Основними видами вантажів, що перевозяться по накладній ЦИМ/СМГС є: з Молдови – пшениця, ячмінь, кукурудза, насіння ріпаку, насіння соняшника, меляса, портландцемент, прокат; до Республіки Молдова – солод, сіль, гази нафтові, бензин, паливо дизельне, мазут, нітрат амонію, брухт чорних металів; у транзитному сполученні – пшениця, кукурудза, насіння соняшнику, макухи, сіль, руда та концентрати залізні, смоли, гази нафтові, бензин, паливо дизельне, добрива, чавун, прокат, труби.

23 червня 2022 р. було підписано Меморандум про взаєморозуміння між Республікою Молдова та Україною щодо відновлення залізничного руху на ділянці залізниці Березино (Україна) – Бессарабка (Республіка Молдова). Таким чином, Республіка Молдова зможе експортувати/імпортувати товари через порт Ізмаїл, розташований на Дунаї, зменшивши затори в порту Рені.

У вересні 2022 року розпочато роботи з проектування та реабілітації залізничної інфраструктури ділянки Бендер – Бессарабка – Етулія – Джурдж. Основною метою проєкту є підвищення пропускної спроможності, збільшення швидкості руху та, як наслідок, зменшення часу доставки вантажів, приведення умов та характеристик залізничної інфраструктури у відповідність до європейських стандартів та існуючих європейських нормативних документів. Реалізація проєкту передбачає капітальну реконструкцію верхньої будови колії та станцій, включаючи системи СЦБ та зв'язку та енергопостачання, ремонт земляного полотна на ділянках перегонів, де є проблеми, заміна стрілочних переказів, закриття та демонтування шести залізничних станцій. Проєкт розрахований на 4 роки, дата завершення – 2026 рік.

Виконуючи умови Угоди про асоціацію Республіки Молдова щодо гармонізації залізничного законодавства Республіки Молдова відповідно до норм ЄС, 18.02.2022 прийнято Кодекс залізничного транспорту. Новий Кодекс частково привносить до національного законодавства Директиву 2012/34/ЄС від 21.11.2012 про створення єдиного європейського залізничного простору, Директиву 2016/798/ЄС від 11.05.2016, що містить вимоги щодо безпеки, які повинні дотримуватися усі учасники залізничного транспорту, включаючи операторів, інфраструктурних менеджерів, постачальників та інших зацікавлених осіб. Директива визначає критерії та вимоги до підготовки та сертифікації машиністів. Це включає освітні програми, навчання, оцінювання та практичні заняття.

1.2.7 Українські залізниці

Українські залізниці (АТ «Укрзалізниця»). Заснована у жовтні 2015 року як державне акціонерне товариство залізничного транспорту загального користування. Постановою Кабінету Міністрів України від 31 жовтня 2018 року компанія була перетворена з публічної на приватну.

Оскільки основним завданням на період до 2030 року є інтеграція залізничного транспорту України до Європейської транспортної системи [16], то виникає питання, а що являють собою сьогодні українські залізниці. За протяжністю вони займають 11 місце у світі та 3 місце у Європі після Німеччини й Франції. За щільністю залізничної колії (0.037 км на 1 км²) наближаються до найбільш розвинених європейських країн (Німеччина – 0.128, Великобританія – 0.078, Польща – 0.074, Франція – 0.066) [17].

Українські залізниці мають експлуатаційну довжину 19.8 тис. км, зокрема електрифікованих ліній 9.4 тис. км або 47.3 % загальної довжини головних колій. Довжина ліній, обладнаних автоблокуванням і диспетчерською централізацією, становить 12.2 тис. км [18].

Залізничний транспорт України є провідною галуззю економіки, виконує 82.9 % вантажообігу і 36.4 % пасажирообігу всіх видів транспорту (за даними Держстату без урахування трубопровідного транспорту та даних анексованої території Автономної Республіки Крим і м. Севастополь), на відміну від країн Європейського Союзу, де частка залізничних перевезень становить 6-8 % пасажирські й до 20 % – вантажні.

Планом заходів з реформування залізничного транспорту передбачено впровадження структурної реформи Укрзалізниці. Ці перетворення вже розпочаті, наприклад, затверджено нову організаційну структуру УЗ, що відповідає європейським директивам. Центральний орган управління залізничним транспортом загального користування – АТ «Укрзалізниця», має великі права щодо розвитку залізничного транспорту. До складу АТ «Укрзалізниця» входять регіональні філії «Донецька залізниця», «Львівська залізниця», «Одеська залізниця», «Придніпровська залізниця», «Південно-Західна залізниця», «Південна залізниця» (рис. 1.9).

Найбільшою загрозою сталому функціонуванню залізничного транспорту є майновий знос його основних фондів, особливо рухомого складу, що перевищив 90 % [19].

Для подальшого успішного розвитку залізничного транспорту необхідно провести технічну модернізацію інфраструктури залізничних коридорів, реструктурувати пасажирське господарство, вдосконалити організацію й технологію пасажирських і вантажних перевезень, створити рухомий склад нового покоління [16].

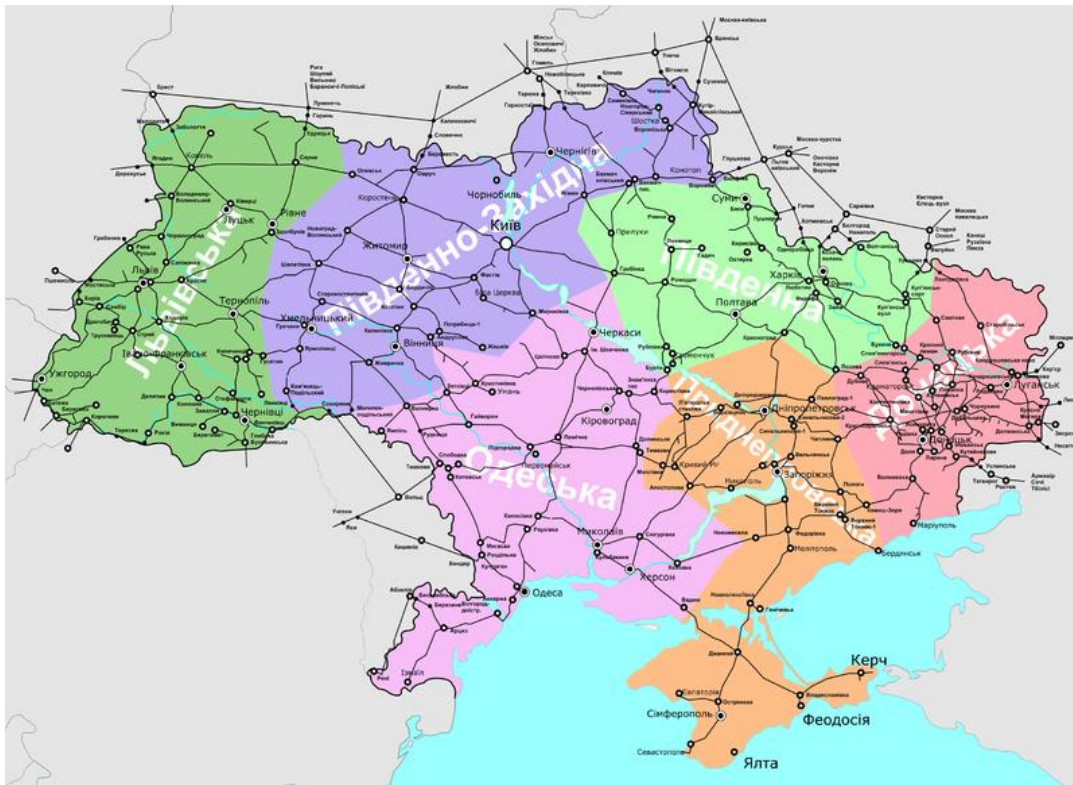


Рис. 1.9. Регіональні філії АТ «Укрзалізниця»

Модернізація й реконструкція залізничних колій, електрифікація мережі, будівництво других головних колій – планові завдання для збільшення пропускної спроможності залізниць, впровадження швидкісного руху поїздів як умови реалізації геополітичних переваг України.

Вважається необхідним протяжність другої колії довести до 35- 40 %, електрифікованих залізниць – до 50-55 %, залізниць, облаштованих автоблокуванням і ДЦ, – до 80 % від експлуатаційної довжини [17].

Як і в минулі роки, умови роботи українських залізниць залишаються більш складними, ніж європейських. Експлуатаційна довжина залізниць за останні роки незначно скорочується в усіх країнах Європи, зокрема і в Україні: за останні 10 років цей показник знизився в середньому на 1 % і на початок 2020 року становив 19.8 тис. км. Виробіток на одного працівника залізниці – 753 тис. зведених тонно-кілометрів на рік, чому сприяло скорочення за останні десять років майже на третину кількості працівників основної діяльності.

Один із вагомих показників є вантажонапруженість, тобто інтенсивність використання залізниць для перевезень вантажів і пасажирів. Динаміка зміни цього показника за даними [18] наведена на рис. 1.10.

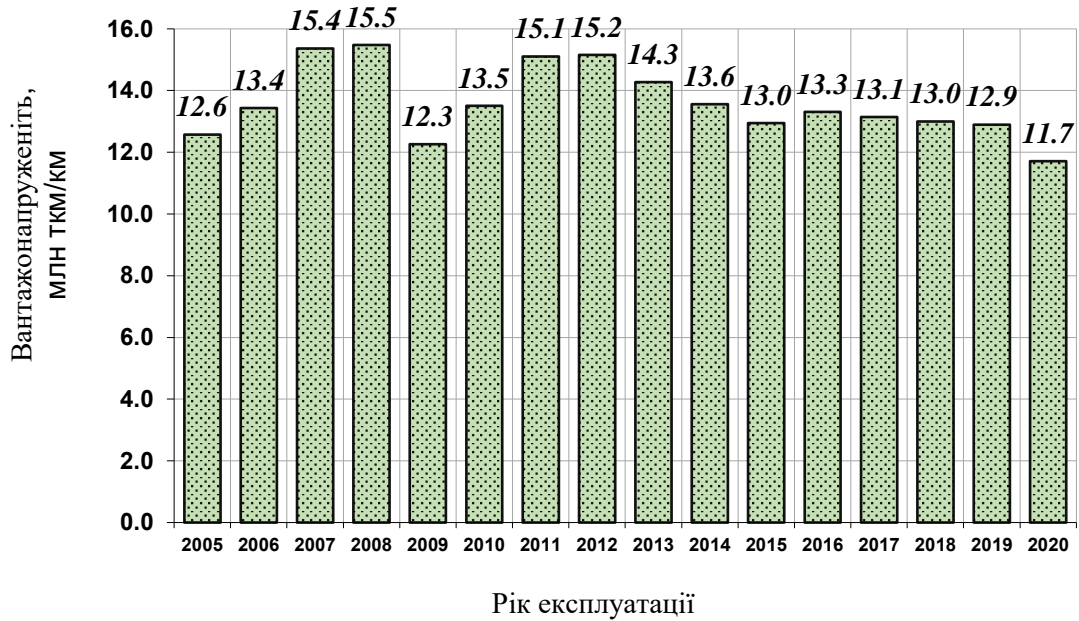


Рис. 1.10. Динаміка зміни вантажонапруженості за роками

На основі проведеного авторами дослідження [20] встановлені відмінності української та європейської залізничної інфраструктури країн, що межують з Україною.

1.2.8 Основні відмінності української та європейської залізничної інфраструктури

Основними відмінностями при порівнянні залізниць є технічна не-сумісність (ширина колії, напруга в контактній мережі, габарити наближення споруд, рухомий склад тощо). У європейських країнах, що межують з Україною, ширина колії 1435 мм, а в Україні 1520 мм. Що стосується напруги в контактній мережі:

Польща. Напруга 3 кВ постійного струму (DC) використовується на 65% електрифікованих ліній (наприклад, Варшава – Радом, Вроцлав – Зелена Гура, Краків – Закопане, деякі гірські маршрути: наприклад, лінія Карпач – Закопане), напруга 25 кВ змінного струму (AC) використовується на 35% електрифікованих ліній, переважно на нових та модернізованих маршрутах (Варшава – Вроцлав – Краків – Гданськ, Варшава – Катовице – Щецин, Варшава – Люблін – Ряшів; швидкісні лі-

нії: СМК (Центральна магістраль комунікацій) та Е30 (Варшава – Краків). Існують проекти з модернізації електрифікації в деяких країнах, наприклад, в Польщі, де планується перевести частину мережі з 3 кВ DC на 25 кВ AC, щоб підвищити сумісність з сусідніми країнами ЄС.

Словаччина. Напруга 25 кВ змінного струму (AC) використовується на всій електрифікованій мережі.

Угорщина. Напруга 25 кВ змінного струму використовується на всій електрифікованій мережі.

Румунія. 97% електрифікованих ліній в Румунії працюють на змінному струмі 25 кВ) (основні магістральні лінії: Бухарест – Констанца, Бухарест – Клуж-Напока, Бухарест – Тімішоара, Бухарест – Ясси, швидкісні лінії: лінія Бухарест – Клуж-Напока, більшість регіональних та локальних ліній. В Румунії 3% електрифікованих ліній використовують постійний струм 3 кВ, це переважно короткі гірські маршрути.

Існують проекти з модернізації електрифікації, де планується перевести частину мережі з 3 кВ DC на 25 кВ AC, щоб підвищити сумісність з сусідніми країнами ЄС та покращити експлуатаційні характеристики.

Основні показники роботи залізниць країн, що межують з Україною, наведено в табл. 1.2 і на рис. 1.11 – 1.15.

Молдова. Напруга 25 кВ змінного струму (AC) використовується на 80% електрифікованих ліній (Кишинів – Бельці – Окниця, Кишинів – Кагул, Кишинів – Унгени, Кишинів – Бессарабка, деякі гірські маршрути: наприклад, лінія Кишинів – Оргіїв – Резіна), 3 кВ постійного струму (DC) використовується на 20% електрифікованих ліній, переважно на старих маршрутах (наприклад, лінія Кишинів – Хинчешти – Леова).

У деяких прикордонних районах можуть бути двосистемні мережі, де використовуються обидва типи електрифікації, щоб полегшити перехід поїздів з однієї системи на іншу.

Аналізуючи наведену вище діаграму, можна зробити висновок, що значення щільності мережі залізниць щодо площі території Польщі у два рази більша за щільність залізничної мережі України, а щільність мережі України менша в порівнянні з Словаччиною і Угорщиною відповідно в 2.24 і 2.55 рази [20].

Також розглянемо діаграму щільності залізничної мережі щодо населення розглянутих країн, наведену на рис. 1.12.

Показники роботи залізниць

| Показники | Молдова | Польща | Румунія | Словаччина | Угорщина | Україна |
|--|---------|--------|---------|------------|----------|---------|
| Площа, тис км ² | 33.8 | 312.7 | 238.4 | 49.0 | 93 | 603.7 |
| Населення, млн чол. | 2.5 | 38.4 | 21.6 | 5.5 | 10.3 | 42.4 |
| Експлуатаційна довжина залізниць, км | 1152 | 19461 | 11380 | 3627 | 7829 | 19790 |
| Довжина електрифікованих залізниць, км | 70 | 11924 | 4033 | 1587 | 3208 | 9355 |
| Частка електрифікованих залізниць, % | 6.1 | 61.3 | 35.4 | 43.8 | 41.0 | 47.3 |
| Перевезено пасажирів, млн пас. | 0.6 | 334.8 | 70.3 | 67.1 | 141.0 | 393.6 |
| Пасажирообіг, млрд пас·км | 0.03 | 23.9 | 5.7 | 3.2 | 7.8 | 37.36 |
| Перевезено вантажів, млн тонн | 3.8 | 248.6 | 39.7 | 44.4 | 28.9 | 343.4 |
| Вантажообіг, млрд т·км | 1.2 | 62.5 | 24.3 | 5.9 | 20.3 | 187.6 |
| Чисельність працівників, тис. чол. | 5.6 | 123.5 | 37.5 | 32.60 | 37.1 | 249.1 |
| Щільність мережі за площею, км/1000 км ² | 34.1 | 62.2 | 47.7 | 74.0 | 84.2 | 32.8 |
| Щільність мережі за кількістю населення, км/1 млн чол. | 460.8 | 506.8 | 526.9 | 659.5 | 760.1 | 466.7 |
| Вантажонапруженість, млн т·км/км | 1.1 | 4.4 | 2.6 | 2.5 | 3.6 | 11.4 |

З діаграми видно, що серед порівнюваних країн за щільністю мережі лідером є Угорщина, щільність мережі залізниць якої в 1.63 рази більша за аналогічний показник в Україні. Цей показник близький за значенням у Польщі й Румунії.

За відносною щільністю залізнична мережа в розрахунку на душу населення складає 0.76 м/особу в Угорщині, 0.66 у Словаччині, на одиницю площі 0.84 м/км² в Угорщині, 0.74 в Словаччині. Таке, на перший

погляд, сприятливе положення пов'язане, однак, зі значними фінансовими труднощами, оскільки експлуатувати мережу, ступінь завантаження якої неоднаковий для різних ліній, економічно не вигідно.

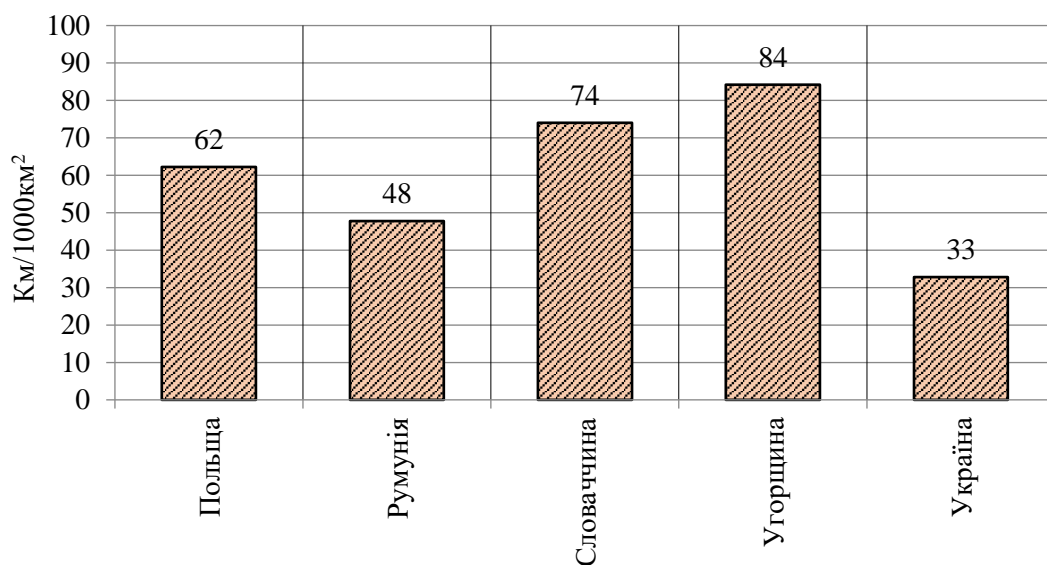


Рис. 1.11. Щільність мережі залізниць, км/1000 км² площі території

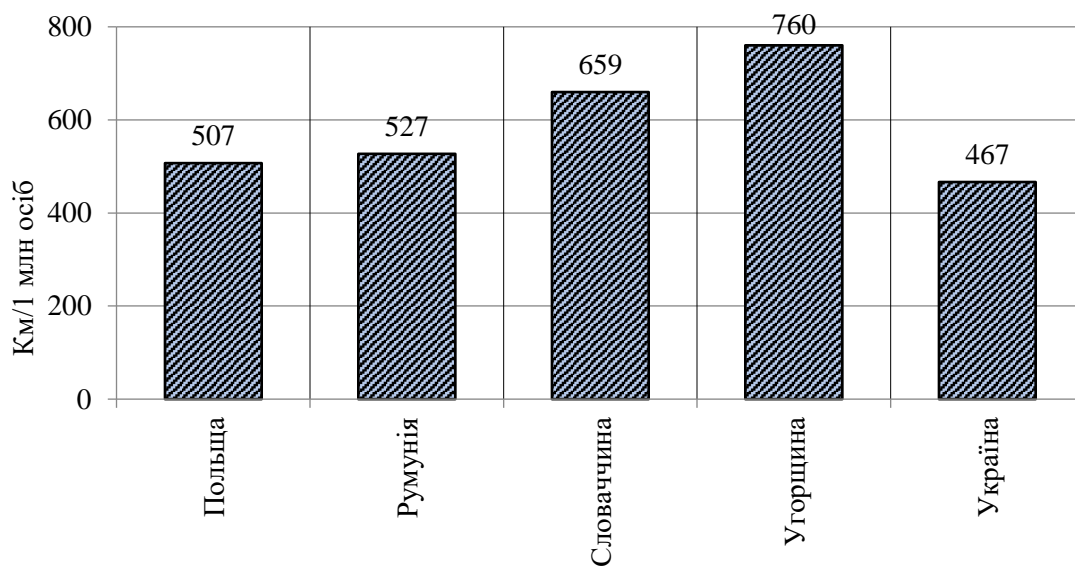


Рис. 1.12. Щільність мережі залізниць (км/1 млн чол. населення)

Порівняння електрифікованих залізничних ліній європейських країн, що межують з Україною, наведено на рис. 1.13.

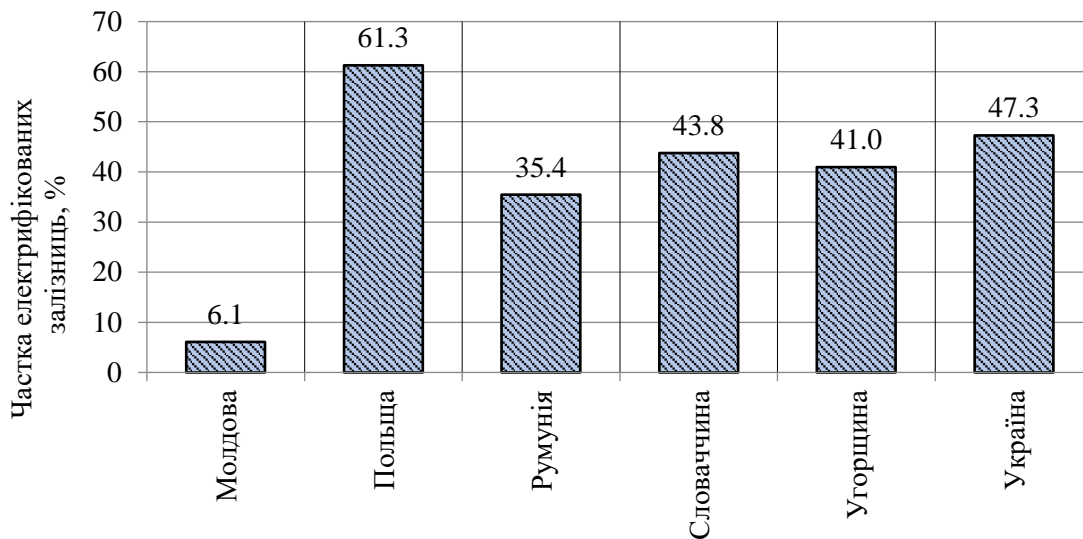


Рис. 1.13. Протяжність електрифікованих залізниць

З вище наведеної табл. 1.2 і діаграмі на рис. 1.13 видно, що найбільша протяжність електрифікованих залізниць у Польщі 11.8 тис. км, в Україні 9.4 тис. км, що становить відповідно 61.3 % і 47.3. Це один з найбільш важливих показників, наприклад, в Україні питома вага електричної тяги в загальному вантажообігу становить 89 % [18].

Порівнюючи вантажонапруженість залізничної мережі України із сусідніми країнами (рис. 1.14) видно, що найбільша вантажонапруженість наявна в таких країнах: у Польщі цей показник менший у 2.59 рази, в Угорщині – в 3.17 рази, у Румунії й Словаччині відповідно 4.38 і 4.56 рази.

Пояснити таку ситуацію можна тим, що залізниці Польщі орієнтовані переважно на пасажирські й транзитні перевезення. Потенціал подальшого зростання перевезень пов'язаний з розвитком змішаних сполучень з країнами Східної Європи.

Широке впровадження механізації робіт з утримання інфраструктури залізниць дозволило в багатьох європейських країнах скоротити чисельність працівників, що призвело до збільшення такого показника, як виробіток на одну особу за рік (рис. 1.15).

Аналізуючи кількісні і якісні показники роботи залізниць (табл. 1.2) і наведені вище рисунки, приходимо таких висновків.

Залізниці України та європейських країн мають різні умови експлуатації, відрізняються технічним станом, оснащенням, параметрами профілю й плану, а тому, зважаючи на різні обсяги й вартість робіт з

реконструкції існуючих залізниць, потребують додаткового фінансування – не тільки державного, але й від Європейського Союзу.

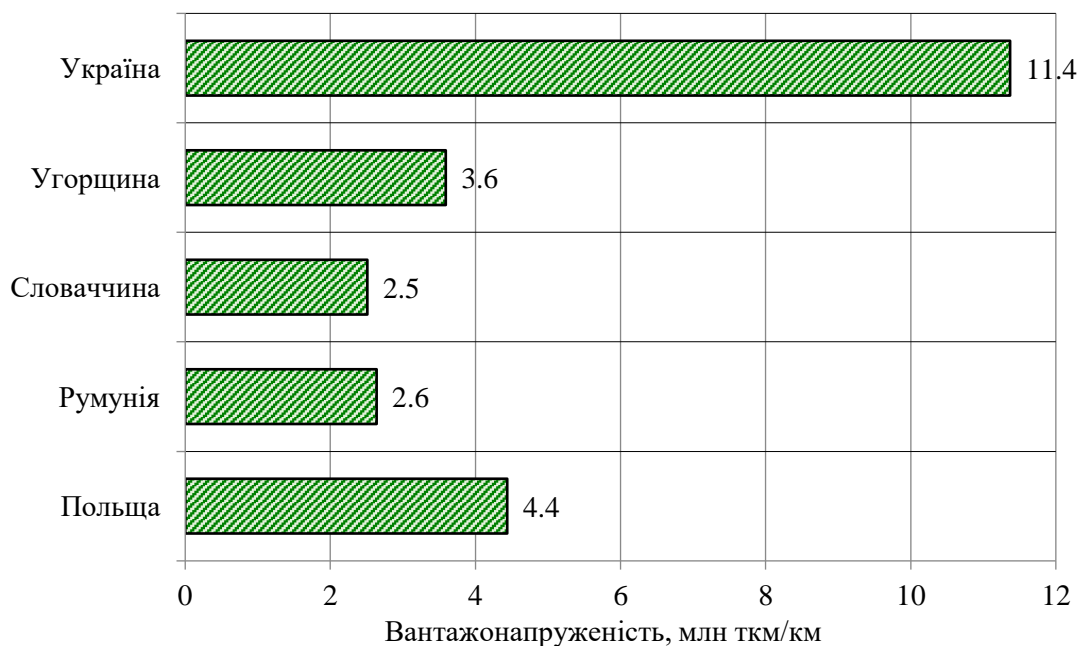


Рис. 1.14. Вантажонапруженість залізниць

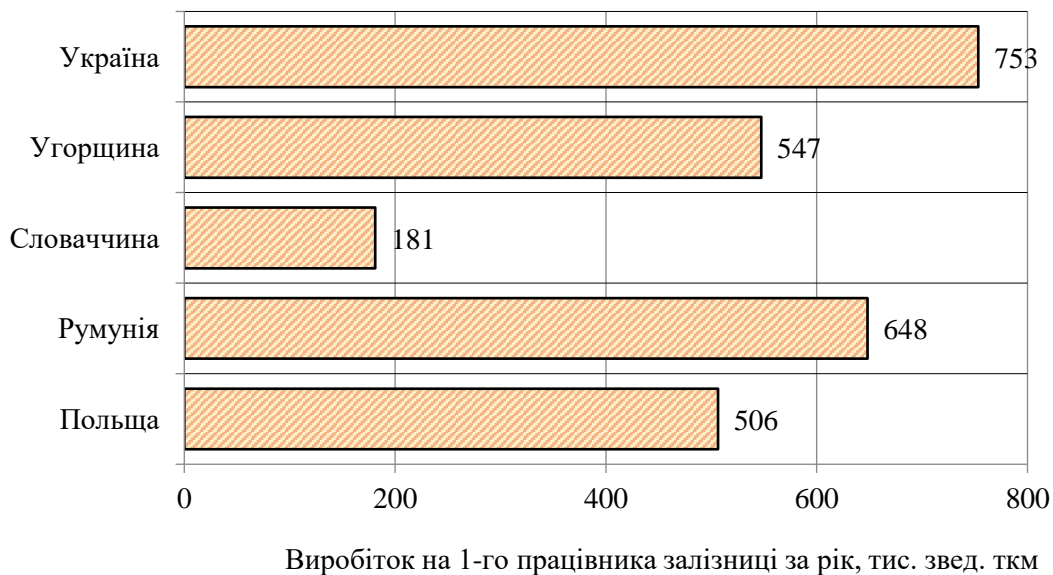


Рис. 1.15. Виріток на одного працівника за рік

При перевезенні вантажів у країнах, що межують з Україною, залізничний транспорт використовується на 16-20 % порівняно з автомобільним, за винятком України (54.6 %). Щодо перевезень пасажирів цей показник становить 6 - 13 %, за винятком Словаччини (37.0 %) і України (28.4 %). Якщо для залізниць будуть створені рівні з автотранспортом умови конкуренції, то європейські країни зможуть отримувати хороші експлуатаційні показники при збільшенні обсягів транзитних перевезень.

Сьогодні залізнична конкурентоспроможність держав-членів ЄС обмежується відмінностями в устаткуванні, технологіях, сигналізації, правилах безпеки, у системі гальмування, тяговому струмі, а також за швидкістю. Така ситуація вимагає, щоб міжнародні поїзди, що проходять через кілька країн, зупинялися на кордоні. Технічні відмінності між державами склалися історично й пов'язані з необхідністю захистити власні інтереси.

За результатами проведеного дослідження встановлено основні відмінності залізничних транспортних систем України та країн, що межують з нею на західному кордоні:

- за параметрами проєктування;
- за габаритами наближення споруд;
- за спеціалізацією напрямків для перевезень;
- за нормами влаштування та утримання залізничної колії;
- за конструкцією залізничної колії;
- за напругою в контактній мережі.

Через відмінності в технічних вимогах до рухомого складу, залізничної колії різних стандартів при організації безперевантажувальних перевезень необхідно вирішити низку технічних питань. Частина питань з інфраструктури й рухомому складу регламентована в TSI, частина – у пам'ятках UIC і ОСЗ, але багато з них залишаються не вирішеними повною мірою (ширина колії, обриси бандажів коліс рухомого складу, габаритні розбіжності, гармонізація вимог до ходових частин, зчепних приладів, відмінності гальмівних систем тощо). Ці проблемні питання потребують додаткових досліджень і раціональних рішень.

Залізничний транспорт України може бути інтегрований у європейську транспортну мережу за умови виконання модернізації колії, штучних споруд та інших пристроїв, що входять до інфраструктури заліз-

ниці, впровадження нового рухомого складу, що забезпечить перевезення пасажирів денними поїздами з необхідним комфортом і максимальною встановленою швидкістю.

Закон «Про залізничний транспорт України» [21] пропонує нову модель ринку залізничних перевезень, що враховує європейське законодавство, встановлює принцип рівноправного доступу до послуг інфраструктури, поширюється на всіх осіб, зацікавлених в отриманні таких послуг. У зв'язку з побудовою нової структури взаємовідносин на залізничному транспорті в проєкті закріплені основні вимоги, обов'язки й права оператора інфраструктури, перевізника, права й обов'язки пасажирів, основні вимоги до рухомого складу та основи діяльності операторів залізничного рухомого складу, норми з управління об'єктами інфраструктури тощо.

1.3 Забезпечення експлуатаційної сумісності залізниць ЄС та України

1.3.1 Директиви, що забезпечують експлуатаційну сумісність залізниць

У Європейському Союзі діє низка Директив, спрямованих на забезпечення експлуатаційної сумісності залізниць, як високошвидкісних (HSR), так і звичайних.

Директива 96/48/ЄС з експлуатаційної сумісності залізниць в межах трансєвропейської високошвидкісної залізничної мережі прийнята в 1996 році. Ця Директива стосується експлуатаційної сумісності систем ВШМ. Передбачалося, що цей напрям діяльності повинен забезпечити реалізацію важливого завдання ЄС – відкриття країнам ЄС доступу до вільної торгівлі та безперешкодних переміщень. Директива визначає «Технічні вимоги з експлуатаційної сумісності» (TSI) як документ, який містить основні вимоги до рухомого складу та інфраструктури високошвидкісних залізниць, що входять у Трансєвропейську мережу (TEN), і гарантує вільне обертання таких поїздів на високошвидкісній мережі та безпеку руху.

В якості базових параметрів, які TSI повинні визначати з метою досягнення експлуатаційної сумісності, наведено наступні:

– габарити колії та штучних споруд;

- максимальне навантаження на колію і осьове навантаження;
- довжина й висота платформ;
- параметри електропостачання;
- сигналізація і керування рухом поїздів (Європейська система керування рухом на залізницях TRNVS);
- рухомий склад: довжина та габарит поїздів, гальмівна система тощо;
- граничні допустимі параметри, які відносяться до безпеки руху, електромагнітного впливу, зовнішнього шуму та вібрації, шуму всередині рухомого складу, наявності системи кондиціонування повітря;
- пристосування для пасажирів з обмеженою рухомістю.

Директива 2001/14/ЄС. Ця Директива, прийнята в 2001 році, стосується розподілу пропускної спроможності та стягнення плати за користування залізничною інфраструктурою. Вона встановлює принципи справедливого та недискримінаційного доступу до залізничної мережі для всіх операторів поїздів.

Директива 2008/57/ЄС. Ця Директива, прийнята в 2008 році, стосується експлуатаційної сумісності залізничної системи в цілому, включаючи як ВШМ, так і звичайні залізниці. Вона встановлює загальні вимоги до технічних характеристик, систем керування рухом, експлуатації та безпеки залізниць.

Директиви ЄС про експлуатаційну сумісність залізниць застосовуються до всіх держав-членів Європейського Союзу. Це означає, що всі країни ЄС повинні впровадити положення цих Директив у своє національне законодавство та практику. Крім того, Директиви також застосовуються до країн Європейської вільної торгівлі (ЄВТ), які уклали Угоди про асоціацію з ЄС.

Важливо зазначити, що Директиви ЄС не мають прямої дії. Це означає, що вони не створюють юридичних зобов'язань для фізичних та юридичних осіб. Замість цього, держави-члени ЄС повинні впровадити положення Директив у своє національне законодавство, яке потім буде створювати юридичні зобов'язання для громадян та підприємств.

Слід відмітити, що попередні Директиви ЄС про експлуатаційну сумісність залізниць не втратили свою силу після прийняття Директиви 2008/57/ЄС. Директива 2008/57/ЄС є збірною Директивою, яка скасовує та замінює низку попередніх Директив, включаючи Директиву 96/48/ЄС та Директиву 2001/14/ЄС, однак вона не скасовує всі положення цих попередніх Директив. Директиви ЄС мають ієрархічну

структуру. Це означає, що пізніші Директиви мають пріоритет над попередніми, якщо вони стосуються одного й того ж питання. Таким чином, Директива 2008/57/ЄС має пріоритет над Директивами 96/48/ЄС та 2001/14/ЄС у питаннях, які вони спільно охоплюють.

1.3.2 Приклади використання європейської колії на мережі залізниць

Запропонована стратегія [22] визначає три основні етапи, які здійснюватимуться з заходу на схід поетапно:

- будівництво євроколії 1435 мм від кордону з Польщею (Мостицька) до Львова та у Молдові від Кишинєва до кордону з Румунією;

- будівництво євроколії 1435 мм між Львовом та Києвом, створення другого коридору на півночі України – від Польщі (Дорогуськ) до Києва та з'єднання Львова з Чопом;

- продовження євроколії від Києва на схід – до Харкова та Дніпра, а також розширення мережі на заході та півдні України: від Польщі (Рава-Руська) до Львова, від Львова – до кордону з Румунією (через Івано-Франківськ і Чернівці), від Одеси – до Кишинєва (рис. 1.16).

Виникає питання, яким способом буде збудована нова колія: якщо це двоколійна ділянка, то одна колія залишається шириною 1520 мм, друга перекладається на ширину 1435 мм, чи одна з колій буде суміщеною (1435/1520 мм), чи буде збудована колія 1435 мм на новій трасі. Кожен з окреслених варіантів потребує різних інвестицій та забезпечує різний рівень пропускної й провізної спроможності. Переваги та недоліки кожного з підходів розглядались, наприклад, в таких публікаціях [23, 25].

Концепції будівництва високошвидкісної залізниці в Польщі в контексті європейських мереж розглядаються в роботі [26].

В угоді між Польською компанією «Центральний комунікаційний порт Польщі (СРК) та Укрзалізницею передбачається розвиток нових транскордонних сполучень з європейською колією 1435 мм, зокрема будівництво високошвидкісної залізниці (HSR) [27]. Документ визначає спільну підготовку техніко-економічного обґрунтування запланованої нової залізничної лінії європейського стандарту між Польщею та Україною.



Рис. 1.16. План будівництва ділянок залізниць європейського стандарту [22]

В статті [28] відмічається, що за ініціативою країн Балтії 2008 року народився міжнародний проєкт нової лінії HSR «Rail Baltica» яка б сполучала Таллінн, Ригу, Каунас через Білосток і Варшаву з Берліном, рис. 1.17. В проєкті передбачається додаткове техніко-економічне обґрунтування щодо максимальної швидкості пасажирських поїздів в трьох варіантах, тобто 160 км/год, 200 км/год і 250 км/год з виконанням робіт до 2027 року. Лінія Rail Baltica буде адаптована до вантажного руху з максимальною швидкістю 120 км/год. Прогнозується, що відразу після запуску транспорту по всій лінії Rail Baltica, вантажні перевезення через польський кордон у південно-західному напрямку можуть сягнути 12-18 млн т і поступово збільшуватиметься у наступні роки. Серйозні труднощі у виконанні зазначених проєктів пов'язано з тим, що модернізація ділянок до швидкості понад 160 км/год потребує додаткових інвестицій [29].

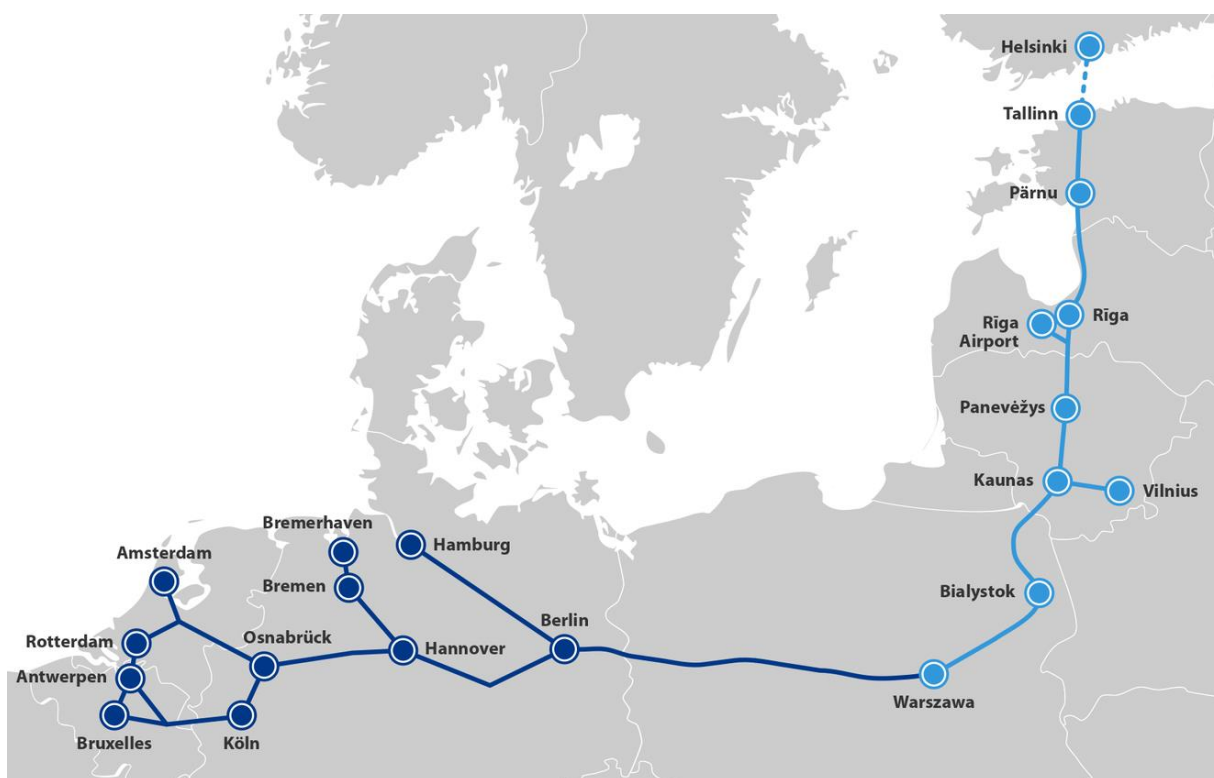


Рис. 1.17. Схема транспортного коридору Rail Baltica [35]

Коридор починається в порту Гельсінкі і проходить на південь через три країни Балтії і північно-східної Польщі до Варшави. Звідти він пролягає традиційним коридором зі сходу на захід через Лодзь, Каліш/Острів «Велькопольський» до Познані, а потім до Берліна, досягаючи головних портів на західному узбережжі Північного моря (Гамбург, Бремен, Бремерхафен, Амстердам, Роттердам і Антверпен).

Серед численних досліджень присвячених вибору пріоритетних напрямків міжнародних перевезень слід виділити наукову працю [30], в якій наведено теоретичні основи і емпіричні результати аналізу й моделювання транспортних мереж на прикладі Польщі. Перспективи інтеграції залізниць України до європейської транспортної мережі будуть залежати від розвитку залізничного пасажирського транспорту в Європейському Союзі [31].

Багато проблем як на європейських, так і на українських залізницях виникає із-за суміщеного руху поїздів [32].

Дослідження [33] стосується проблем прийняття рішень, з якими стикаються менеджери залізничної інфраструктури в залізничній мережі з виділеними коліями та коридорами спільного користування, тобто одні й ті ж колії обслуговують пасажирські та вантажні поїзди.

Одним з визначальних ознак залізничного транспорту є логістика – система взаємодоповнюючих компонентів, які можуть бути використані для обґрунтування стратегічних напрямків розвитку транспорту. До таких висновків прийшли автори роботи [34]. До альтернативних методів оцінки логістичного потенціалу можна віднести експертний, рейтинговий, індексний та статистичний. В основі дослідження покладено експертний метод і використано системний підхід.

Ефективність залізничних транспортних систем Схід-Захід істотно залежить від зміни колії 1435/1520 мм, що пов'язано зі складними вантажно-розвантажувальними роботами. В роботах [35, 36] наведено результати порівняльного аналізу транспортування вантажів з використанням різних систем для передачі їх в пунктах зміни ширини залізничної колії.

У статті [37] представлено особливості імітаційної моделі, яка дозволяє проводити обчислювальні експерименти та робити висновки щодо розподілу видів транспорту у національній транспортній системі. Охарактеризовано окремі елементи моделі, в т. ч. модель попиту на пасажирський і вантажний транспорт, механізм розподілу матеріальних і пасажирських потоків на мережі. Наведено характеристики, що описують інфраструктуру, транспортні засоби та інші параметри.

В роботі [38] викладено методи дослідження та вирішення актуальних транспортних проблем, що розглядалися 9 – 12 червня 2019 р. на Міжнародній науковій конференції «Транспорт 21 століття». Зокрема, наведено сучасні технології та рішення, що використовуються для планування, управління та експлуатації транспорту.

В роботі авторів [20] наведені результати аналізу основних відмінностей залізничної інфраструктури України і Європейських країн. Доведено, що міжнародні перевезення територією України мають певні особливості. Зміна стандартів залізничної колії на кордоні з країнами Європи змушує шукати найбільш раціональні маршрути перевезення вантажів з урахуванням відстані, технічного стану, швидкості доставки та інших параметрів міжнародних транспортних коридорів.

У статті [39] представлено квазіавтоматичну модель для проведення аналізу шляхом зміни граничних умов або припущень і наведені рекомендації щодо підвищення якості роботи транспортної мережі.

Зростаючий попит на пасажирські та вантажні перевезення в поєднанні з обмеженим капіталом для розширення залізничної інфраструктури

ктури Сполучених Штатів Америки створює тиск для більш ефективного використання пропускну́ї спроможності залізниць. Це ще більше ускладнюється тим, що більшість пасажирських залізничних перевезень здійснюється на коридорах, які спільно використовуються для вантажного руху. Методи визначення потужності залізниць зазвичай поділяються на аналітичні та імітаційні. В статті [40] була введена комбінована категорія «імітаційно-аналітична» і зроблено висновок, що європейські залізничні дослідження є більш уніфікованими з точки зору можливостей, концепцій і методів, тоді як дослідження в США представляють більшу різноманітність методів, інструментів і цілей.

Протягом останніх 20 років на британській залізничній мережі спостерігається значне зростання як вантажних, так і пасажирських перевезень, що викликає занепокоєння щодо достатньої пропускну́ї й провізної спроможності. Було реалізовано низку інфраструктурних ініціатив, спрямованих на збільшення спроможності та зменшення конфліктів. Новий підхід, викладений в роботі [41] дозволив детально досліджувати потоки в транспортних коридорах. Використання емпіричного методу для оцінки детального впливу на експлуатацію залізничних вантажних перевезень стало важливим елементом у процесі оцінки заходів з вдосконалення мережі.

Стратегія транспортної інфраструктури ЄС, як визначено в Керівних принципах TEN-T [42], зосереджується на покращенні якості транспортної інфраструктури за рахунок нових інвестицій та ефективного використання існуючої інфраструктури з метою покращення доступності, мобільності й безпеки. Відповідні інвестиційні пріоритети визначені в рамках тематичної цілі «Сприяння сталому транспорту та усунення вузьких місць у ключових мережевих інфраструктурах».

Виходячи з результатів вищенаведеного аналізу, в монографії наведені результати, сконцентровані на порівнянні різних варіантів будівництва залізничної колії за європейськими стандартами на території України.

1.3.3 Можливі сценарії при переході на колію європейського стандарту

Забезпечення мобільного руху поїздів, перш за все з країн ЄС, є актуальним завданням для України. 1 грудня 2022 року в будівлі Сенату

Республіки Польща відбулася конференція «Україна в системі залізничної інфраструктури Європейського Союзу». Фахівці Українського державного університету науки і технологій висвітлили програму науково-технічного супроводження реалізації проєкту, що передбачає впровадження європейської колії (1435 мм) на території України. Таке рішення дозволяє поетапний перехід України на європейський стандарт, щоб поєднати українські залізниці з ЄС.

Як впливає з пропозицій Європейської комісії і Європейського інвестиційного банку, нова магістральна мережа колії 1435 мм працюватиме паралельно з існуючою – 1520 мм. При будівництві колії європейського стандарту в Україні можливі різні сценарії (рис.1.18).



Рис. 1.18 Можливі сценарії при переході на колію європейського стандарту

Найбільш відомі такі сценарії:

1. Існуюча двоколійна ділянка перебудовується на дві одноколії з шириною колії 1435 і 1520 мм.
2. На головній колії укладається суміщена колія (1435/1520 мм).
3. Проєктується залізнична колія європейського стандарту на новій трасі.

Розглянемо перші два питання докладніше на прикладі напрямків Варшава – Ковель – Коростень – Київ, Варшава – Львів – Шепетівка – Київ та Варшава – Львів – Жмеринка – Київ (рис. 1.19).



Рис. 1.19. Варіанти європейської колії при реконструкції існуючих напрямків

Впровадження поїздів класу «Eurocity» на напрямках від Варшави до Києва (ширина колії 1435 мм) дозволить організувати безпересадочний рух від Берліна до Києва, але потребує відповідних реконструктивних заходів (табл. 1.3).

Укладання суміщеної колії не потребує улаштування окремого земляного полотна, що можна віднести до переваг цього способу організації руху поїздів. Однак застосування суміщеної колії потребує розв'язок і обходів роздільних пунктів через необхідність укладання стрілочних переводів нормальної 1520 мм і європейської 1435 мм колій, що призводить до зниження швидкості руху поїздів при проходженні станцій. Розв'язання цієї задачі, як і спорудження другої колії шириною 1435 мм паралельно існуючій лінії 1520 мм, приводить або до необхідності реконструкції роздільних пунктів на даному напрямку, або застосування кривих для їх обходу [16, 29].

Реконструктивні заходи для впровадження поїздів «Eurocity»

| Вартість реконструкції | Необхідні заходи | Недоліки варіанту |
|---|--|---|
| 1 | 2 | 3 |
| 1. Варшава – Ковель – Коростень – Київ (767 км) – 3560 млн євро | Будівництво другої колії на ділянці Ковель – Сарни – Коростень (298 км) шириною колії 1435 мм. Електрифікація ділянки залізниці Дорогуськ – Ковель – Сарни – Коростень (360 км, колія 1435 мм). Перебудова другої колії з ширини 1520 мм на 1435 мм на ділянці Коростень – Київ або укладання суміщеної колії на одній з головних колій (156 км). | Інвестиції в цей варіант матимуть окупність при великих обсягах перевезень. При перебудові двоколійної ділянки Коростень – Київ під дві одноколійні (1520/1435 мм) пропускна спроможність знижується в 4 – 5 разів. |
| 2. Варшава – Львів – Шепетівка – Київ (914 км) – 2270 млн євро | Заміна колії шириною 1520 мм на колію 1435 мм на ділянці Рава Руська – Львів або укладання суміщеної колії (67 км). Перебудова другої колії з ширини 1520 мм на 1435 мм на ділянці Львів – Красне – Здолбунів – Шепетівка або укладання суміщеної колії на одній з головних колій (268 км). Заміна двоколійних вставок Шепетівка – Новоград-Волинський – Коростень (150 км) на колію шириною 1435 мм. Перебудова другої колії з ширини 1520 мм на 1435 мм на ділянці Коростень – Київ або укладання суміщеної колії на одній з головних колій (156 км). | Інвестиції в цей варіант матимуть окупність при великих обсягах перевезень. При перебудові двоколійної ділянки Львів – Красне – Здолбунів – Шепетівка і Коростень – Київ під дві одноколійні (1520/1435 мм) пропускна спроможність знижується в 4 – 5 разів. |

| 1 | 2 | 3 |
|---|---|---|
| 3. Варшава – Львів – Жмеринка – Київ (967 км) – 1735 млн євро | Заміна колії шириною 1520 мм на колію 1435 мм на ділянці Рава-Руська – Львів або укладання суміщеної колії (67 км). Перебудова другої колії з ширини 1520 мм на 1435 мм на ділянці Львів – Красне – Тернопіль – Хмельницький – Жмеринка – Київ (627 км) або укладання суміщеної колії на одній з головних колій. | Інвестиції в цей варіант матимуть окупність при великих обсягах перевезень. При перебудові двоколіїної ділянки Львів – Красне – Здолбунів – Шепетівка і Коростень – Київ під дві одноколіїні (1520/1435 мм) пропускна спроможність знижується в 4 - 5 разів. |

1.4 Методологічні підходи до оцінювання способів транспортуванні вантажів у сполученні Схід – Захід

Оцінка ефективності проєктних рішень – один з головних елементів інвестиційного аналізу й основний інструмент вибору з декількох інвестиційних проєктів найбільш ефективного. В основу оцінок ефективності проєкту покладено такі принципи: розгляд варіанта (проєкту) протягом усього розрахункового періоду, позитивність і максимум ефекту, урахування чинника часу, впливу інфляції, невизначеностей, ризиків тощо. Початок розрахункового періоду рекомендується приймати як дату виділення коштів на проєктні роботи. В основу попередньої оцінки покладені наступні методики.

1. Методика оцінки інвестиційних проєктів: Керівництво з аналізу витрат і вимог (Європейська рада). Guide to Cost Benefit Analysis of Investment Projects [46].

Методика «Guide to Cost Benefit Analysis of Investment Projects» офіційно визнаним документом, який використовується інституціями Європейського Союзу для оцінки інвестиційних проєктів. Хоча з 2014 року було розроблено деякі нові методи та інструменти аналізу витрат та вигод (АВВ), методика ЄС все ще вважається надійною та

всебічною основою для оцінки інвестиційних проєктів. Вона ґрунтується на міжнародно визнаних принципах АВВ, охоплює широкий спектр факторів, які слід враховувати при оцінці інвестиційних проєктів, гнучка і може бути адаптована до різних типів проєктів. Однак, важливо зазначити, що існують й інші методи АВВ, які можуть бути більш підходящими для певних типів проєктів. Наприклад, метод збалансованої оцінки з урахуванням багатьох критеріїв (MCDA) може бути корисним для оцінки проєктів з декількома конкуруючими цілями. Аналіз ризиків може бути більш важливим для проєктів з високим рівнем невизначеності.

2. Керівництво Організації економічного співробітництва та розвитку з оцінки проєктів. Це загальний документ, який розроблений Організацією економічного співробітництва та розвитку для оцінки різноманітних проєктів, незалежно від сфери їхньої діяльності. Він містить загальні принципи, методика та інструменти для проведення якісної оцінки проєктів, щоб визначити їх ефективність, результативність, стійкість та вплив.

3. Критерії комітету сприяння розвитку для оцінки допомоги в цілях розвитку (DAC Criteria for Evaluating Development Assistance). Цей документ, розроблений Комітетом з допомоги розвитку (DAC), спеціалізується на оцінці проєктів, які фінансуються з коштів міжнародної допомоги. Він встановлює критерії, за якими слід оцінювати ефективність такої допомоги.

Незважаючи на те, що Критерії DAC було прийнято в 1991 році, принципи та підходи до оцінки проєктів залишаються актуальними й досі:

- ґрунтуються на міжнародно визнаних принципах оцінки розвитку;
- охоплюють широкий спектр факторів, які слід враховувати при оцінці проєктів розвитку;
- гнучкі й можуть бути адаптованими до різних типів проєктів.

Аналіз витрат та вигод (АВВ) є одним з найпоширеніших методів оцінки ефективності інвестиційних проєктів. Існує декілька методів АВВ, кожен з яких має свої особливості та застосовується в різних ситуаціях.

Відповідно до методик, оцінювання може виконуватися за такими показниками: NPV (Net Present Value of Discounted Cash Flow) – чис-

тий дисконтований дохід; PI (Profitability index) – індекс прибутковості; IRR (Internal Rate of Return) – внутрішня норма рентабельності; MIRR (Modified Internal Rate of Return) – модифікована внутрішня норма рентабельності; PBP (Payback Period, Pay-Back Period) – період окупності; DPB (Discounted payback period) – дисконтований термін окупності.

Таблиця 1.4

Основні методи АВВ та їх порівняння

| Метод | Опис | Переваги | Недоліки | Застосування |
|---|--|---|--|-----------------------------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Метод простого порівняння загальних сум | Порівнюються сумарні витрати та сумарні вигоди за весь період реалізації проєкту | Простий у розумінні та розрахунках | Не враховує часову вартість грошей | Для попередньої оцінки проєктів |
| Метод окупності | Визначається період часу, за який проєкт окупиться | Інтуїтивно зрозумілий | Не враховує грошові потоки після точки окупності, не враховує часову вартість грошей | Для швидкої оцінки проєктів |
| Чистий приведений дохід (NPV) | Розраховується різниця між сумою приведених до теперішнього часу грошових потоків від проєкту та сумою початкових інвестицій | Враховує часову вартість грошей, дозволяє порівнювати проєкти з різною тривалістю | Вимагає визначення ставки дисконтування | Для оцінки доцільності інвестицій |

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|----------------------------------|---|--|--|--|
| Внутрішня норма дохідності (IRR) | Визначається ставка дисконтування, при якій NPV дорівнює нулю | Показує максимальну ставку дисконтування, при якій проєкт ще є доцільним | Може мати декілька розв'язків або не мати розв'язків | Для порівняння проєктів з різною ризикованістю |
| Індекс рентабельності (PI) | Показує, у скільки разів сума приведених до теперішнього часу грошових потоків від проєкту перевищує суму початкових інвестицій | Дозволяє порівнювати проєкти з різним обсягом інвестицій | Не враховує абсолютний розмір проєкту | Для порівняння проєктів з різним масштабом |

Вибір методу АВВ залежить від конкретної ситуації та цілей аналізу. Зазвичай, для прийняття остаточного рішення використовується декілька методів:

- NPV є одним з найпоширеніших і найнадійніших методів. Він показує сумарну чисту вигоду від проєкту, з дисконтуванням майбутніх грошових потоків до теперішньої вартості. NPV вважається кращим, якщо він позитивний. Переваги: NPV – це простий та зрозумілий метод, який враховує часову цінність грошей. Недоліки: NPV не враховує ризик проєкту та його вплив на ліквідність компанії;

- IRR дозволяє порівнювати проєкти з різною ризикованістю;
- PI корисний для порівняння проєктів з різним масштабом;
- Метод простого порівняння загальних сум і метод окупності можуть використовуватися для попередньої оцінки проєктів або для пояснення результатів більш складних методів для неспеціалістів.

Для порівняння різних варіантів авторами розроблена модель прогнозування й оцінки ефективності здійснення залізничних перевезень від кордону однієї держави до кордону іншої з урахуванням усіх витрат за показником NPV, який являє собою різницю сукупного доходу

D_t і всіх видів витрат з урахуванням фактора часу (K_i – інвестиції, витрати в K_L – локомотивний парк, K_g – вагонний парк, C_t – поточні експлуатаційні витрати і C_s – витрати, що залежать від виду технологічних операцій і часу перебування вантажних вагонів на станції стикування колій різної ширини [17]):

$$NPV(t) = \sum_{t=0}^{T_p} (D_t - K_t^i - K_t^L - K_t^g - C_t - C_{st}) \eta_t \quad (1.1)$$

Невизначеність і ризику при оцінці ефективності варіантів враховувалися через модифіковану норму дисконту, яка входить у розрахунок коефіцієнта дисконтування різночасових витрат η_t .

Для визначення плати за перевезення використовувався Міжнародний залізничний транзитний тариф (МТТ), який застосовується для відправки вантажів, а також при перевезеннях через прикордонні й припортові станції [47].

Для прикладу, в табл. 1.5 наведено формули для визначення плати за перевезення вантажів у контейнерах.

Таблиця 1.5

Формули для визначення плати за перевезення вантажів у контейнерах

| Характеристика контейнера | Стан | Відстань перевезень до 1000 км включно | Відстань перевезень більша за 1000 км |
|---|--------------|--|---------------------------------------|
| Універсальний великотоннажний, 40 футів | Завантажений | $y = 2,9132x - 14,88$ | $y = 0,3128x + 2592$ |
| | Порожній | $y = 1,4563x - 7,08$ | $y = 0,1559x + 1298$ |
| Універсальний великотоннажний, 20 футів | Завантажений | $y = 1,6184x - 8,37$ | $y = 0,1732x + 1442$ |
| | Порожній | $y = 0,8095x - 4,02$ | $y = 0,0863x + 722$ |
| Універсальний середньотоннажний, 5 тонн | Завантажений | $y = 0,2383x + 51,5$ | $y = 0,0243x + 263,0$ |
| | Порожній | $y = 0,1186x + 25,7$ | $y = 0,0121x + 131,2$ |

З табл. 1.5 випливає, що плата визначається залежно від відстані перевезення, причому найбільший темп зростання плати (у середньому на 10 % на кожні 100 км) спостерігається при відстанях до

1000 км і тільки на 0.5 % – при більших відстанях. Це, як буде показано нижче, суттєво впливає на кінцевий результат.

Аналогічно побудовані тарифи в багатьох країнах. Наприклад, на залізницях США під час перевезення дешевих масових вантажів або на напрямках, де є конкуренція з боку інших видів транспорту, тариф нижче, ніж для вантажів, перевезення яких може здійснюватися тільки залізничним транспортом. Тобто відстань транспортування умовно розподіляється на зони економічної ефективності доставки вантажів. Чим краще стан автомобільних доріг і сучасного вантажного автотранспорту, тим вищою буде зона економічної ефективності за інших рівних умов. Вищесказане справедливо і стосовно залізничного транспорту. З іншого боку, очевидним є скорочення зони економічної ефективності доставки вантажів при підвищенні витрат вантажовідправників.

Розроблена модель дозволяє досліджувати й прогнозувати доходи, що отримає АТ «Укрзалізниця» від обсягів перевезень на перспективу для різного рівня прогнозу – оптимістичний, песимістичний, середній (проміжний). Докладний опис моделі наведено в табл. 1.6 – 1.8 і на рис. 1.20.

Таблиця 1.6

Розрахункові формули для визначення вартості рухомого складу

| Вартість інвентарного парку в t -й рік | |
|---|---|
| локомотивний парк | вагонний парк |
| $ZLok_t = \Pi_l Lok_t, \quad (1.5)$ де $Lok_t = O_l n_t^e k_{инв}^l$ або $Lok_t = \left(\frac{2L}{V_\delta} + t_{oc} + t_{об} + \sum_{i=1}^m t_i \right) \frac{1}{24} n_t^e k_{инв}^l$ | $ZVag_t = \Pi_e Vag_t, \quad (1.6)$ де $B_t = O_e n_t^{ep} m k_{инв}^e$ або $B_t = \left(\frac{2L}{V_\delta} + \sum_{i=1}^k t_{mex_i} + \sum_{i=1}^r t_{ван_i} \right) \frac{1}{24} n_t^e m k_{инв}^e$ |

У формулах (1.5), (1.6) :

L – довжина ділянки тягового обслуговування, км;

V_δ – середня дільнична швидкість руху поїздів, км/год;

$t_{oc}, t_{об}$ – час перебування локомотива відповідно в пункті основного й оборотного депо (екіпіровка, технічний огляд та ін.);

$\sum_{i=1}^m t_i$ – час перебування локомотива на $m-1$ станціях зміни бригад,

ГОД;

$k_{інв}^n$ – коефіцієнт переходу від робочого до інвентарного парку (з урахуванням локомотивів, що перебувають у ремонті й резерві).

$\sum_{i=1}^k t_{mex_i}$ – час простою вагонів на станції з технічними операціями,

ГОД;

$\sum_{i=1}^r t_{cm_i}$ – час простою вагонів на станціях навантаження та розванта-

ження, ГОД;

k, r – кількість станцій, де виконуються відповідно технічні операції з вагонами, навантаження й розвантаження вагонів.

Таблиця 1.7

Розрахункові величини, що включені до математичної моделі

| Колонка табл. 1.5 | Величина | Пояснення відповідних величин |
|-------------------|-----------------|--|
| 1 | 2 | 3 |
| 1, 2 | t, G_t | Номер розрахункового року $t = 0, 1, 2, 3, \dots, T$ (T – розрахунковий період) і відповідний вантажопотік G_t . Дозволяє дослідити вплив вантажопотоку G_t і темпу його зростання ΔG на перевізний процес: $G_t = G_0 + \Delta G t^n$ (1.2), може бути $n = 1, n > 1, n < 1$. |
| 3, 4 | n_t, N_t | Кількість поїздів, що проходять за добу n_t і за рік N_t , залежить від маси вантажного поїзда нетто $Q_{нетто}$ при відомому вантажопотоці G_t і коефіцієнті річної нерівномірності перевезень γ : $n_t^e = \frac{G_t \gamma 10^6}{365 Q_{нетто}}$ (1.3) |
| 5, 6 | $Lok_t, ZLok_t$ | Інвентарний локомотивний парк Lok_t і прогнознi річні вкладення для придбання локомотивів $ZLok_t$, які, у свою чергу, залежать від кількості поїздів на добу, відстані транспортування й дільничної швидкості. |

| 1 | 2 | 3 |
|------|--------------------------|---|
| 7, 8 | Vag_t , $ZVag_t$ | Інвентарний локомотивний парк Vag_t і прогнозні річні вкладення на придбання вагонів $ZVag_t$, які, у свою чергу, залежать від кількості поїздів на добу, кількості платформ, відстані транспортування й дільничної швидкості |
| 9 | K_t | Прогнозні інвестиції K_t для реконструкції інфраструктури залізниці й прикордонної станції, що забезпечують перевезення й технологічні операції з вантажем |
| 10 | D_t | Прогнозні річні доходи D_t , які будуть отримані як плата за перевезення вантажів у міжнародному залізничному сполученні. За перестановку завантажених вагонів з візків однієї ширини колії на візки іншої ширини колії або контейнерів з вагонів нараховується збір, який сплачується за перевезення через кордон вантажоодержувачем |
| 11 | C_t | Прогнозні річні експлуатаційні витрати C_t на здійснення перевезень. Приймалися за статистикою витрат на українських залізницях, виходячи з вартості 1 поїздо-км і 1 поїздо-год. |
| 12 | C_{st} | Витрати, що залежать від виду технологічних операцій (перевантаження, заміна візків вагонів тощо) і часу перебування вантажних вагонів на станції стикування колій різної ширини. Грошові показники C_{st} розраховувалися на підставі статистичних даних роботи Львівської залізниці |
| 13 | η_t | $\eta_t = \frac{1}{(1 + E_n)^t} \quad (1.4)$ – коефіцієнт дисконтування різночасових витрат. Соціально-економічна норма дисконту E_n , що входить до формули, характеризує мінімальні вимоги суспільства до суспільно-економічної ефективності проектів. Прийнята норма $E_m = 0,08$ |
| 14 | NPV_t | Чистий дисконтований дохід – формула (1.1) |
| 15 | $\sum_{t=1}^{t=T} NPV_t$ | Наростаючий підсумок чистого дисконтованого доходу |

Таблиця 1.8

**Моделювання витрат на перевезення вантажів у контейнерах на ділянці
Одеса – Львів**

(відстань 1010 км, маса поїзда нетто 1200 т, кількість платформ 40)

| Роки, t | G, млн т | Кількість поїздів | | Lok, шт | ZLok, млн € | Vag, шт | ZVag, млн € | Kinv, млн € | Dt, млн € | Ct, млн € | Cst, млн € | ηt | NPV, млн € | Підсумок NPV, млн € |
|----------------|----------------|----------------------|-----------|------------|----------------|------------|----------------|-------------------|-----------------|-----------------|------------------|-------|------------------|---------------------------|
| | | n, добу | N, рік | | | | | | | | | | | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
| 1 | 5.0 | 13 | 4745 | 48 | 192 | 1907 | 763 | 30 | 323 | 109.3 | 7.47 | 0.926 | -720.9 | -721 |
| 2 | 5.5 | 14 | 5110 | 51 | 12 | 2053 | 58 | 0 | 348 | 117.7 | 8.05 | 0.857 | 130.2 | -591 |
| 3 | 6.0 | 15 | 5475 | 55 | 16 | 2200 | 59 | 0 | 373 | 126.1 | 8.62 | 0.794 | 129.8 | -461 |
| 4 | 6.5 | 16 | 5840 | 59 | 16 | 2347 | 59 | 0 | 398 | 134.5 | 9.20 | 0.735 | 131.9 | -329 |
| 5 | 7.0 | 18 | 6570 | 66 | 28 | 2640 | 117 | 0 | 447 | 151.3 | 10.35 | 0.681 | 95.4 | -234 |
| 6 | 7.5 | 19 | 6935 | 70 | 16 | 2787 | 59 | 0 | 472 | 159.8 | 10.92 | 0.630 | 142.7 | -91 |
| 7 | 8.0 | 20 | 7300 | 73 | 12 | 2933 | 58 | 0 | 497 | 168.2 | 11.50 | 0.583 | 144.1 | 53 |
| 8 | 8.5 | 21 | 7665 | 77 | 16 | 3080 | 59 | 0 | 522 | 176.6 | 12.07 | 0.540 | 139.7 | 193 |
| 9 | 9.0 | 23 | 8395 | 84 | 28 | 3373 | 117 | 0 | 571 | 193.4 | 13.22 | 0.500 | 109.7 | 302 |
| 10 | 9.5 | 24 | 8760 | 88 | 16 | 3520 | 59 | 0 | 596 | 201.8 | 13.80 | 0.463 | 141.6 | 444 |
| 11 | 10.0 | 25 | 9125 | 92 | 16 | 3667 | 59 | 0 | 621 | 210.2 | 14.37 | 0.429 | 137.9 | 582 |
| 12 | 10.5 | 26 | 9490 | 95 | 12 | 3813 | 59 | 0 | 646 | 218.6 | 14.95 | 0.397 | 135.8 | 718 |
| 13 | 11.0 | 28 | 10220 | 103 | 32 | 4107 | 118 | 0 | 696 | 235.4 | 16.10 | 0.368 | 108.4 | 826 |
| 14 | 11.5 | 29 | 10585 | 106 | 12 | 4253 | 59 | 0 | 721 | 243.8 | 16.67 | 0.340 | 132.8 | 959 |
| 15 | 12.0 | 30 | 10950 | 110 | 16 | 4400 | 59 | 0 | 745 | 252.2 | 17.25 | 0.315 | 126.3 | 1085 |
| Усього: | | | | | 440 | | 1760 | 30 | 7976 | 2699 | 184.5 | | 1085.4 | |

Реконструкція напрямку Одеса – Львів

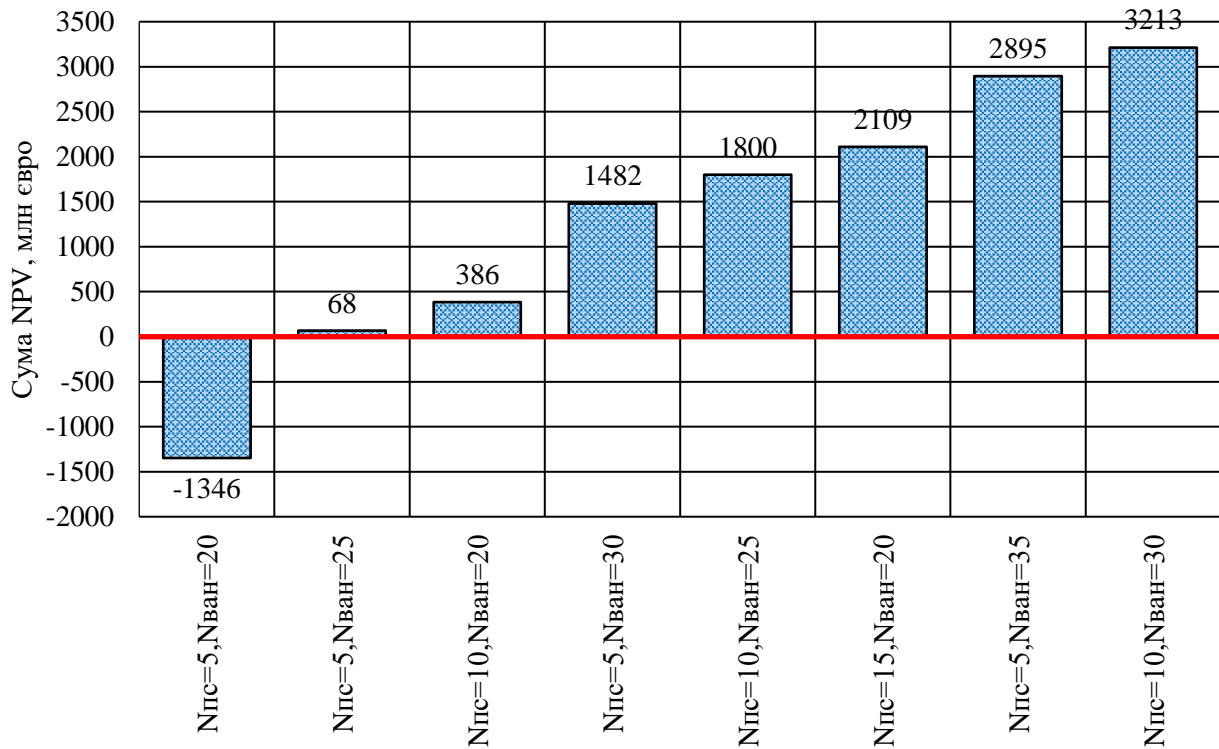


Рис. 1.20. Діаграма розподілу NPV за роками

Аналіз результатів показав, що при вартості реконструкції інфраструктури залізниці Одеса – Київ – Львів (1010 км) 2.5-3.0 млн євро/км перехід на євроколію економічно може бути виправданим при річних обсягах вантажних перевезень 20-25 млн тонн і обсягах пасажирського руху 5-10 пар поїздів на добу (рис. 1.20).

Висновки до розділу 1

На основі аналізу вимог Директив ЄС (Директива 96/48/ЄС, Директива 2001/14/ЄС, Директива 2008/57/ЄС), спрямованих на забезпечення експлуатаційної сумісності залізниць та пропозицій Європейської комісії і Європейського інвестиційного банку, визначені стратегічні завдання науково-технічної політики в галузі транспортної системи України як вихід на світовий рівень за технічними параметрами та якістю послуг, що реалізуються залізничним транспортом. У зв'язку з цим першочерговим і пріоритетним завданням для транспортної га-

лузі є розширення наукових досліджень з проблем створення прогресивних технологій організації міжнародних вантажних перевезень, формування та функціонування ефективної транспортної системи, розробка принципово нових систем управління з використанням прогресивних інформаційних технологій.

Дослідження відмінностей української та європейської залізничної інфраструктури дозволили встановити, що залізниці України та європейських країн мають різні умови експлуатації, відрізняються технічним станом, оснащенням, параметрами профілю й плану, а тому потребують додаткового фінансування не тільки державного але й від Європейського Союзу, зважаючи на різні обсяги й вартість робіт з реконструкції існуючих залізниць.

У Європейському Союзі діє низка Директив, спрямованих на забезпечення експлуатаційної сумісності залізниць, як високошвидкісних, так і звичайних, а тому інтеграція України в ЄС неможлива без зміни стандарту ширини залізничної колії. Цей процес складний і потребує значних інвестицій, однак перехід на колію 1435 є обов'язковим для всіх країн-учасниць у середньостроковій перспективі до 2050 року.

Незважаючи на складність та масштабність завдання, перехід на євроколію в Україні може мати значні переваги для країни: призведе до значного зростання експорту та імпорту, відкриє нові можливості для співпраці з європейськими партнерами, призведе до покращення якості обслуговування пасажирів та вантажовідправників, зробить українські товари більш конкурентоспроможними на світовому ринку. Перехід на євроколію може призвести до значного зниження викидів парникових газів та інших забруднювачів.

При будівництві колії європейського стандарту в Україні можливі різні сценарії: існуюча двоколійна ділянка перебудовується на дві однокільні з шириною колії 1435 і 1520 мм; на головній колії укладається суміщена колія (1435/1520 мм); проектується залізнична колія європейського стандарту на новій трасі. Кожний з сценаріїв потребує наукового обґрунтування.

Альтернативні варіанти укладання європейської колії на території України

2.1 Огляд наукових досліджень з пропускної й провізної спроможності залізниць

Головна проблема українських залізниць, яку необхідно вирішити під час відбудови країни, – перехід від застарілої та зношеної інфраструктури стандартів СРСР до сучасної – європейської.

Українські залізниці використовують застарілі технології з високим ступенем зносу. Це стосується як стандартів колії, так і систем сигналізації, безпеки руху, логістики і диспетчеризації перевезень, рухомого складу. Фактично, залізнична інфраструктура України потребує масштабної перебудови і відповідно – глобальних інвестицій та тривалого часу [48].

Підвищенню пропускної спроможності одноколійних залізниць присвячені роботи як закордонних, так і вітчизняних фахівців. У Європі найпоширеніший метод аналізу пропускної спроможності надає Міжнародний союз залізниць (UIC) код 406 [49]. Він був впроваджений у 1987 році та з того часу оновлювався кілька разів. Метод UIC 406 ґрунтується на імітаційному моделюванні роботи залізниці. Він дозволяє прогнозувати вплив різних факторів на пропускну спроможність, таких як: тип та характеристики поїздів (довжина, швидкість, час зупинки), інфраструктура залізниці (кількість колій, довжина перегонів, наявність роз'їздів), система управління рухом (графіки руху, правила перевезення).

Зростаючий попит на пасажирські та вантажні перевезення транспортування в поєднанні з обмеженими капітальними вкладеннями для розширення залізничної інфраструктури Сполучених Штатів Америки (США) потребує більш ефективного використання поточної потужності ліній. В статті [40] використовуються результати понад 50 попередніх досліджень виконаних в США та Європі, щоб описати різні визначення пропускної спроможності залізниці та підходи, а потім класифікувати їх на основі кожного з них. Методи потужності зазвичай

поділяються на аналітичні та методи моделювання, але в цій статті також представлено третій, «комбінований» підхід, який використовує аналітичний та імітаційний підходи.

У статті [50] розглядається можливе підвищення пропускної спроможності ділянки між двома станціями одноколіїної залізничної лінії за рахунок використання розширеної зони станційних стрілочних пунктів та методи оцінки пропускної спроможності такої залізничної інфраструктури, де частина одноколіїної ділянки не обладнана, наприклад, лінійними блоками або іншими системами сигналізації та централізації, стає частково двоколіїною. Як приклад, розглядається напрямок, у міській агломерації Градец – Кралове та Пардубіце та її околицях (100 км на схід від Праги), де є 60 ділянок одноколіїної лінії з середньою довжиною перегонів 7.4-10.0 км. Дослідження проводилося на трьох рівнях. Перший є лише аналітичним, другий базується на розробленій власній мезоскопічній стохастичній імітаційній моделі, а третій базується на стохастичній мікроімітаційній моделі, розробленій за допомогою програмного забезпечення OpenTrack. Запропоновані методи розширили сучасні загальні підходи до оцінки пропускної спроможності.

В іншій роботі [51] представлено модель ціноутворення розподілу пропускної спроможності залізничної інфраструктури. Ціни на розподіл пропускної спроможності залізничної інфраструктури моделюються з урахуванням усіх економічно обґрунтованих витрат. Структура моделі розроблена як набір розрахункових блоків у Microsoft Excel. Рекомендовані ціни на пропускну спроможність залізниці були знайдені шляхом моделювання набору варіантів, і надані рекомендації для різних умов експлуатації.

Проведений авторами аналіз [52] показав, що перевезення в поєднанні з більш високою швидкістю та більшою частотою руху пасажирських поїздів, що курсують на одній колії, можуть призвести до збільшення заторів у багатьох місцях. Щоб задовольнити цей попит і підтримувати трафік необхідні інвестиції в проекти для збільшення пропускної спроможності багатьох ліній. Дослідження дозволило знайти найбільш ефективну стратегію розширення потужностей одноколіїних ліній. Програмне забезпечення було використано для проведення експериментів, що моделюють роботу дорожнього руху на таких лі-

ніях. Отримані результати показали, що для одноколіїної лінії найкраща стратегія – це будівництво нових роз'їздів між існуючими станціями.

Пропускна спроможність одноколіїних залізниць обмежена у зв'язку з зайнятістю ділянки колії поїздом, що блокує інші поїзди, які повинні рухатися в протилежному напрямку, і, таким чином, створюючи низьку частоту руху поїздів і подовжений час перебування на станції. Обмеження потужності стає більш інтенсивним, оскільки в експлуатації задіяний графік руху, що призводить до великої залежності і взаємодії поїздів один з одним. Таким чином, робить висновок автор [53], визначення факторів для максимізації пропускної спроможності перегонів і станцій є життєво важливим завданням. Параметри процесу моделювання використовуються для аналітичного оцінювання потужності станцій.

В роботі [54] відмічається, що попит на вантажні залізничні перевезення в Північній Америці суттєво зростає в найближчому майбутньому. Крім того, державні органи прагнуть збільшити швидкість і частоту курсування пасажирських поїздів. Мережа залізниць – одноколіїна з роз'їздами для схрещення і обгону поїздів. Автори вважають, що розширення інфраструктури можлива шляхом будівництва додаткової головної колії, яка необхідна для підтримки працездатності мережі за умов збільшення залізничного руху.

Ще на початку 1990-х років почали розробляти системи на основі ERTMS/ETCS (Європейська система управління залізничним рухом/Європейська система управління поїздами), оскільки вони гарантують сумісність на європейському рівні, а також значно покращують продуктивність залізничних систем. У цьому контексті в статті [55] аналізується використання HD-ERTMS (тобто ERTMS високої щільності), яка зазвичай застосовується у випадку залізничних вузлів двоколіїних ліній, так і у випадку одноколіїних залізничних ліній. Попередні результати показали, що HD-ERTMS дозволяє відправляти послідовні пакети поїздів в одному напрямку, збільшуючи пропускну спроможність лінії до 60%.

Згідно з цілями європейської транспортної політики передбачається, що до 2030 року транспортна система має стати більш конкурентоспроможною та ефективною у використанні ресурсів. Це висуває високі вимоги до залізничної інфраструктури, яка в основному працює в змішаному режимі як пасажирських, так і вантажних перевезень.

Мета статті [56] полягає в тому, щоб запропонувати процедури, які дозволять просто і точно визначити кількісну оцінку переваг для підвищення пропускної спроможності лінії. Методичний підхід до визначення показників пропускної спроможності було розглянуто на прикладі вантажного залізничного коридору «Янтар», який з'єднує Балтійське море з Чорним морем. Він проходить через кілька європейських країн, в тому числі через Словаччину. Аналітичні процедури були запропоновані відповідно до методології, яка використовується на залізницях Словаччини, а питання якості були оцінені з використанням нового підходу для визначення оптимальної та критичної пропускної спроможності.

У 2017 році були опубліковані результати наукового дослідження [57]. Мета звіту – надати аналіз можливостей збільшення пропускної спроможності для майбутніх вантажних поїздів на період 2030-2050 рр. Пропускна спроможність лінії оцінена для різних сценаріїв і комбінацій інфраструктури й поїздів. Встановлено, що пропускна спроможність одноколіїної дороги сильно залежить від відстані між станціями і швидкості поїздів. Звертається увага на те, що швидші вантажні поїзди можуть збільшити пропускну спроможність протягом дня, створюючи більше інтервалів між швидкими пасажирськими поїздами та мінімізуючи обгони. Навіть якщо швидші поїзди дорожчі, загальна вартість може бути нижчою за умови підвищення продуктивності, коли можна зробити ще один оборот локомотива або рухомого складу за день.

Для розрахунку пропускної спроможності залізничних колій в роботі [58] використовувалася методика розроблена національною залізничною компанією Словаччини *Železnice Slovenskej Republiky (ŽSR)*. Вона ґрунтується на графіковій діаграмі руху поїздів (*graph schedule diagram*) та використовується для прогнозування максимальної кількості поїздів, які можуть курсувати ділянкою колії протягом певного періоду часу. Для прогнозування впливу нового типу поїзда на пропускну здатність залізничної колії в розрахунках використовувався перспективний поїзд. Він характеризується такими параметрами, як довжина, швидкість, час зупинок на станціях, міжстанційна відстань. Наведені результати практичної пропускної спроможності конкретної ділянки для поточного стану без реконструктивних заходів та після запропонованих заходів.

В роботі [59] викладено теоретичні відомості щодо розрахунків пропускної спроможності залізничних напрямків при різному технічному оснащенні. Розглядаються питання її підвищення за рахунок зміни способів організації руху поїздів та підвищення технічного оснащення інфраструктури і тягового забезпечення. Особлива увага приділяється посиленню пропускної спроможності за рахунок електрифікації залізничних ліній, пом'якшення профілю колії та зменшення міжпоїзних інтервалів.

В роботі [60] відмічається, що у сучасних умовах актуальною проблемою є також підвищення ефективності роботи залізничного транспорту промислових підприємств. Метою дослідження є розробка заходів щодо підвищення пропускної та провізної спроможності залізничної інфраструктури промислових підприємств в умовах збільшення обсягів перевезення вантажів. Дослідження виконано з використанням методів графоаналітичного моделювання.

Одноколійні дільниці залізниць, як правило, мають потрібну пропускну спроможність, яка у деяких випадках значно менша за наявну. У цьому випадку виникає потреба в посиленні технічної оснащеності таких дільниць. При розробці та аналізі таких варіантів розрахунок наявної пропускної спроможності виконується аналітично, але при розробці графіка руху поїздів таку пропускну спроможність не завжди вдається реалізувати. В статті [61] розглянуто варіанти прокладки ниток графіка поїздів на обмежуючому перегоні при різних варіантах технічного оснащення суміжних перегонів – одноколійні та двоколійні. Встановлено, що різні варіанти прокладки ниток на графіку поїздів впливають на величину періоду графіка руху поїздів і, як наслідок, на наявну пропускну спроможність одноколійної дільниці. Для визначення пропускної спроможності реальних, нових чи реконструйованих дільниць найбільш перспективним, вважають автори, є побудова варіантних графіків руху поїздів для різних його видів, їх порівняння і вибір кращого. Таке рішення дозволяє також оцінити ефективність можливого збільшення пропускної спроможності дільниць при різних варіантах їх технічного посилення.

В роботі [62] на прикладі залізничних напрямів з тепловозною тягою, які з'єднують Україну з Польщею, досліджено ефективність їх електрифікації для підвищення пропускної спроможності. Для досягнення цієї мети в дослідженні проаналізовано ряд проектів, згідно з якими планується електрифікація існуючих одноколійних залізниць.

За результатами розрахунків зроблено висновок, що експлуатаційні показники залежать від технічного оснащення залізниць, на які впливають обрис поздовжнього профілю, величини ухилів, тип електрово- зів, маси рухомого складу тощо.

Окрім вище розглянутих праць, представляють інтерес роботи, присвячені збільшенню пропускної й провізної спроможності. Так, в статті [43] наведено результати дослідження впливу неоднорідності типу поїзда на пропускну здатність одноколіїної залізниці, а в роботі [44] досліджена пропускна спроможність вантажних залізничних коридорів в Словацькій Республіці. Стаття зосереджена на характеристиках роботи залізничних вантажних коридорів та використанні їх пропускної спроможності при суміщеному пасажирському й вантажному русі. Враховуючи недоліки суміщеного руху поїздів на одних і тих коліях, може бути цікавою пропозиція відокремлення вантажного руху від пасажирського з переключенням на паралельний хід. Підвищення ефективності роботи залізниці при спеціалізації напрямків вантажних і пасажирських перевезень викладено в роботі *Railway capacity analysis: methodological framework and harmonization*.

Короткий огляд наукових праць дозволив виявити фактори, які впливають на рівень пропускної спроможності одноколіїних ділянок, а також розглянути заходи, які запропоновані різними фахівцями для посилення потужності залізниць.

2.2 Оцінка пропускної й провізної спроможності одноколіїного напрямку

2.2.1 Визначення пропускної спроможності ділянки залізниці

Для розширення понять щодо визначення пропускної спроможності необхідним є проведення аналізу закордонного досвіду, зокрема, залізниць з «європейською» моделлю ринку перевезень [63]. За різних умов організації перевезень набули поширення різні способи розрахунку пропускної спроможності. Як правило, розрізняють наступні визначення понять пропускної спроможності [64]: теоретична пропускна спроможність (англ., *Theoretical Capacity*, TC) – це кількість поїздів, які могли б прослідувати через дільницю протягом певного інтервалу

часу, за умови повністю впорядкованого графіку руху (паралельний з однаковим часом ходу поїздів). Це верхня межа пропускної спроможності лінії, а її спосіб розрахунку є нескладним і базується на аналітичних обчисленнях. При розрахунку теоретичної пропускної спроможності не враховуються резерви, ігноруються наслідки змін під час руху і збої, які відбуваються в реальності при слідуванні поїздів по дільниці.

Практична пропускна спроможність (англ., Practical Capacity, PC) – це практична межа «типового» обсягу поїздопотoku, який може бути пропущений через дільницю за умови прийняттого рівня надійності. Відображає реальну послідовність слідування поїздів різних категорій, їхні пріоритети та враховує резерв. Якщо теоретична пропускна спроможність являє собою верхню теоретичну межу, то практична – представляє собою пропускну спроможність, що реально може бути реалізована.

Використана пропускна спроможність (англ., Used Capacity, UC) – це фактичний обсяг поїздопотoku, що пропускається через лінію. Пропускна спроможність, що використовується, відображає фактичний потік поїздів і операції, які відбуваються на лінії. Вона, як правило, нижча за практичну пропускну спроможність.

Доступна пропускна спроможність (англ., Available Capacity, AC) – це різниця між використаною пропускною спроможністю і практичною. Вона характеризує додаткову кількість поїздів, яка може бути пропущена через дільницю. Якщо доступна пропускна спроможність не буде використана, то її вважають втраченою (невикористаною).

Якщо порівняти вище наведені поняття згідно стандарту UIC 406 [49] з існуючими визначеннями на залізницях України, одразу можна знайти відмінності між ними. Так, згідно до Інструкції [65], на залізницях України використовується поняття наявної пропускної спроможності дільниці на перегонах, під якою розуміється максимальна кількість вантажних поїздів (пар поїздів) установленої ваги і довжини, які можуть бути пропущені через цю дільницю за одиницю часу (доба, година) відповідно до її технічної оснащеності і прийнятого способу організації руху поїздів.

Якщо колії в основному спеціалізовано для пасажирського (приміського) руху, то наявна пропускна спроможність вимірюється у пасажирських поїздах. Визначається така пропускна спроможність для паралельного графіку руху поїздів. Окрім наявної розрізняють результа-

тивну наявну пропускну спроможність дільниці, яка відповідає найменшій наявній пропускній спроможності окремої дільниці, що розраховується для наступних елементів: по перегонам, по станціям, по пристроям електропостачання електрифікованих ліній.

Визначення наявної пропускну спроможності більше наближене до поняття так званої теоретичної пропускну спроможності, так само розрахунки ведуться для паралельного графіку без обліку резервів. Однак при розрахунку в аналітичних формулах враховується надійність постійних технічних пристроїв інфраструктури (колії, пристроїв СЦБ і зв'язку, електропостачання) та рухомого складу (локомотиви, вагони), а отже і можливі ймовірні відмови в їх роботі в процесі експлуатації.

В цій роботі розрахунок пропускну спроможності здійснюється для обмежуючого перегону, який має найбільший період графіка. Так, максимальна пропускна спроможність n_{max} одноколійних перегонів в парах поїздів при паралельному графіку руху визначається за формулою [65]:

$$n_{max} = \frac{(1440 - t_{тех})\alpha_n}{T}, \quad (2.1)$$

У формулі (2.1) $t_{тех}$ – тривалість технологічного «вікна», $t_{тех} = 60$ хв;

α_n – коефіцієнт надійності, який враховує вплив відмов у роботі технічних засобів (колії, пристроїв СЦБ і зв'язку, контактної мережі тощо) на наявну пропускну спроможність залізниці, $\alpha_n = 0.96$;

T – період графіка, хв.

Наявна пропускна спроможність у вантажному русі $n_{вант}$ може бути розрахована за формулою (2.2), якщо відомі час ходу поїзда по найбільш важкому перегону, число пасажирських і інших поїздів, а також тип пристроїв СЦБ і технологія процесу перевезень.

$$n_{ван} = n_{max}(1 - p) - E_{пас}n_{пас} - E_{зб}n_{зб} + n_{зб}, \quad (2.2)$$

де p – коефіцієнт резерву пропускну спроможності (0.15 – 0.20);

$E_{пас}$, $E_{зб}$ – коефіцієнти зйому пасажирських і збірних поїздів;

$n_{пас}$, $n_{зб}$ – кількість збірних і пасажирських поїздів.

2.2.2 Розрахунки провізної спроможності залізниці

Провізна спроможність залізничної лінії G , млн т нетто в рік, визначається в кожному напрямку окремо. Вона залежить від частки наявної пропускної спроможності лінії для вантажного руху $n_{\text{вант}}$, середньої маси поїзда на ділянці $Q_{\text{нт}}$, співвідношення маси поїзда нетто і бруто η , а також від кількості пасажирських і збірних поїздів $n_{\text{пас}}$, $n_{\text{зб}}$.

Для визначення поперегінної провізної спроможності скористаємося формулою [59]:

$$G = \frac{365 \cdot n_{\text{вант}} \cdot Q_{\text{нт}}}{\gamma \cdot 10^6}, \quad (2.3)$$

де $Q_{\text{нт}}$ – середня маса поїзда нетто, тонн; $Q_{\text{нт}} = Q_{\text{ун}} \cdot \eta \cdot \mu$.

η – коефіцієнт, що враховує тару вагонів, приймається $\eta = 0.70-0.74$;

μ – коефіцієнт, що враховує структуру вантажопотоку, приймається $\mu = 0.80-0.90$;

γ – коефіцієнт нерівномірності перевезень, $1.05-1.15$;

$n_{\text{вант}}$ – кількість вантажних поїздів, пар поїздів за добу, визначається за формулою (2.2).

Як впливає з аналізу формули (2.3), провізну спроможність ділянки визначають максимальна інтенсивність потоку поїздів, їхня середня маса і певною мірою конструкція рухомого складу. У свою чергу, ці величини залежать від багатьох технічних параметрів лінії: профілю колії, довжини станційних приймально-відправних колій, потужності локомотивів, ходової швидкості вантажних поїздів, структури поїздопотоків. Профіль колії, довжина станційних колій і структура потоку і тип локомотива й визначають максимально можливу масу поїзда. Однак, потужність локомотива може бути використана як на збільшення маси поїзда, так і на збільшення ходової швидкості. Відповідно до правил тягових розрахунків масу рухомого складу і швидкість руху поїзда визначають, виходячи з умов повного використання потужності і тягових характеристик локомотиву. Зі збільшенням маси при інших рівних умовах знижується ходова швидкість і зменшується пропускна спроможність лінії і навпаки. Вочевидь, що максимум провізної спроможності буде забезпечено при оптимальному співвідношенні маси і швидкості вантажних поїздів.

При значних розмірах пасажирського руху на двоколіїних лініях зменшення маси вантажних поїздів для наближення їхньої швидкості до швидкості пасажирських може зменшити зйом з графіка. Тоді найбільшу провізну спроможність лінії можна досягти при масі поїзда, дещо меншою максимально можливою за силою тяги або довжиною станційних колій.

Часто виникає питання, чи достатньо максимальної пропускної спроможності дільниці, щоб забезпечити пропуск певної кількості пасажирських і вантажних поїздів. Якщо обсяг вантажних перевезень відомий, то, використовуючи формулу (2.3), можна знайти кількість вантажних поїздів:

$$n_{\text{вант}} = \frac{G \cdot \gamma \cdot 10^6}{365 \cdot Q_{\text{нт}}} \quad (2.4)$$

Прирівнявши вирази (2.2) і (2.4), можна визначити обсяг вантажів, які можна перевезти при відомі максимальній пропускній спроможності напрямку (n_{max}) і заданій кількості пасажирських поїздів ($n_{\text{пас}}$)

$$G = \frac{365 \cdot Q_{\text{нт}} \cdot [n_{\text{max}}(1-p) - E_{\text{пас}} \cdot n_{\text{пас}}]}{\gamma \cdot 10^6} \quad (2.5)$$

Результати розрахунків, отримані за формулою (2.5), наведені у вигляді графіків на рис. 2.1.

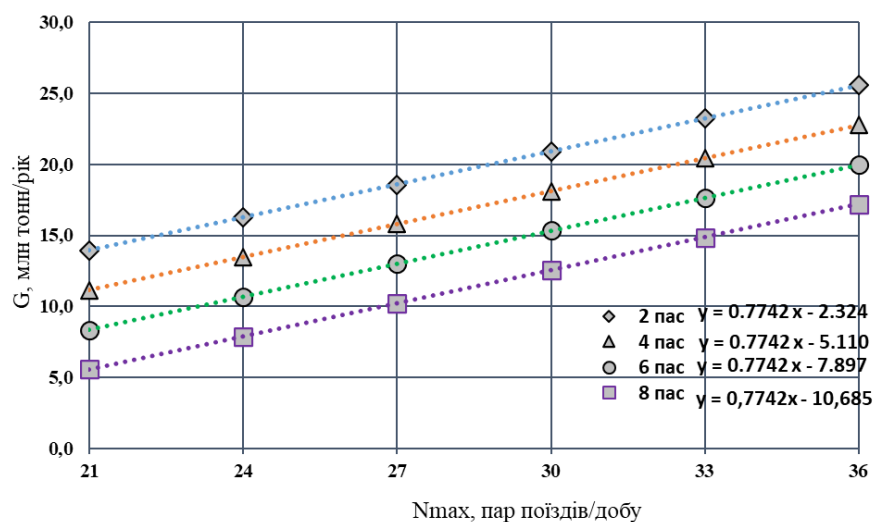


Рис.2.1. Провізна спроможність в залежності від максимальної пропускної спроможності і кількості пасажирських поїздів

Можна також знайти кількість пасажирських поїздів ($n_{пас}$) при відомій максимальній пропускній спроможності напрямку (n_{max}) і запланованому обсягу вантажних перевезень за рік (G) (рис. 2.2, 2.3)

$$n_{пас} = \frac{1}{E_{пас}} \left(n_{max} (1 + p) - \frac{G \cdot \gamma \cdot 10^6}{365 \cdot Q_{HT}} \right) \quad (2.6)$$

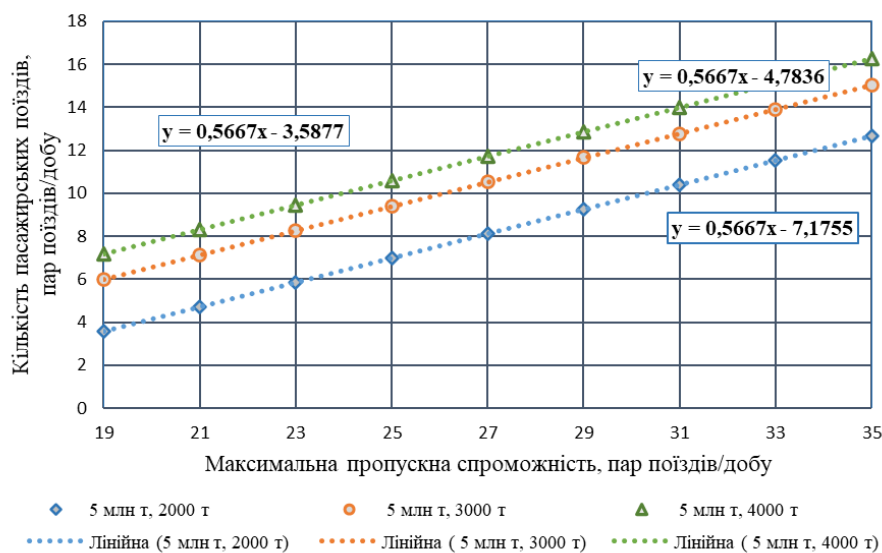


Рис. 2.2. Кількість пасажирських поїздів при суміщеному вантажному русі при $G = 5$ млн т і масі поїздів $Q = 2000 - 4000$ т

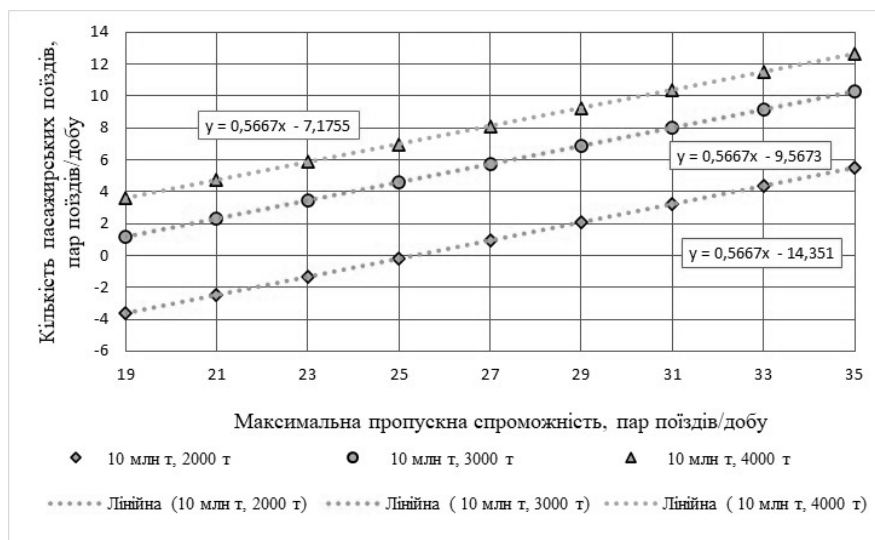


Рис. 2.3. Кількість пасажирських поїздів при суміщеному вантажному русі при $G = 10$ млн т і масі поїздів $Q = 2000 - 4000$ т

Значення пропускної й провізної спроможності, що наведені на графіках рис. 2.1 – 2.3, будуть використані при встановленні ефективних заходів, пов'язаних з впровадженням євроколії на мережі залізниць.

2.3 Збільшення пропускної спроможності для покращенню залізничного сполучення між Україною та Польщею (на прикладі напрямку Варшава – Держкордон – Ковель – Сарни – Київ)

2.3.1 Загальна характеристика ділянки Ковель – Сарни – Коростень

Розглянемо реконструкцію одноколійної ділянки залізниці Ковель – Сарни – Коростень для збільшення пропускної й провізної спроможності при забезпеченні експлуатаційної сумісності українських і польських залізниць.

Ділянка Ковель – Сарни – Коростень має загальну довжину близько 300 км. Розташована переважно на території Волинської та Рівненської областей в межах регіональних філій «Львівська залізниця» та «Південно-Західна залізниця». Ділянка одноколійна на тепловозній тязі. Схема ділянки наведена на рис. 2.4.

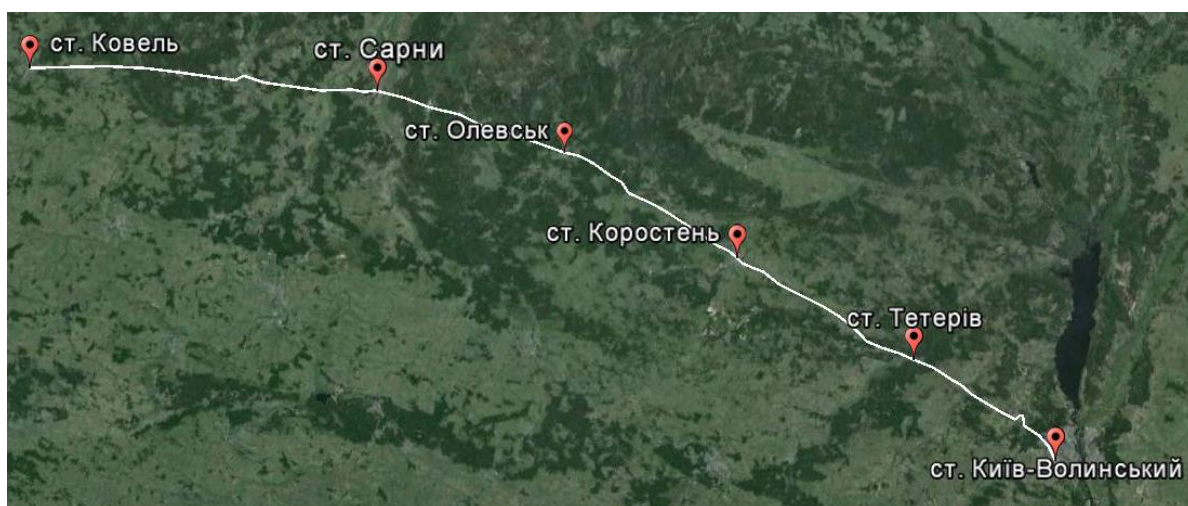


Рис. 2.4. Схема ділянки Ковель – Сарни – Київ

На ділянці укладені рейки типу Р65, колія ланкова, шпали залізобетонні, баласт – щебневий на піщаній подушці, тип скріплення – КБ. Домінуючим елементом земляного полотна являється насип, близько 95%. Для відсіпки земляного полотна були використані ґрунти другої групи із розвіданих кар’єрів, а також із виїмок. Найбільша висота насипу складає близько дев’яти метрів, а виїмки – шість метрів. Ширина основної площадки земляного полотна складає 7 метрів. Порівнюючи ділянки, що входять до напрямку Ковель – Сарни – Коростень, слід зазначити, що ділянка Ковель – Сарни найбільш складна як за величиною ухилів, так і за радіусами кривих.

Для визначення максимальної пропускної спроможності залізниці були виконані тягові розрахунки для тепловозної тяги, локомотив 2М62. Маса вантажного поїзда варіювалася від 2000 до 4000 т. Пропускна спроможність розрахована за формулою (2.1), а отримані результати наведені на рис. 2.5 – 2.7.

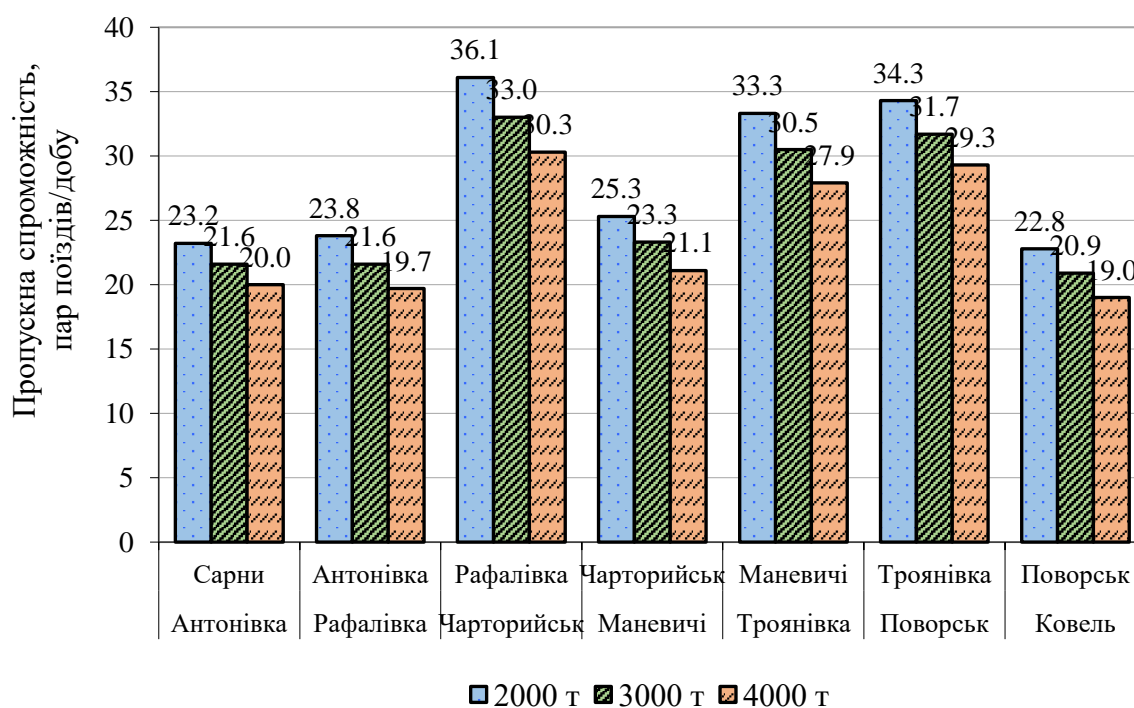


Рис. 2.5. Поперегінна пропускна спроможність на ділянці Ковель – Сарни

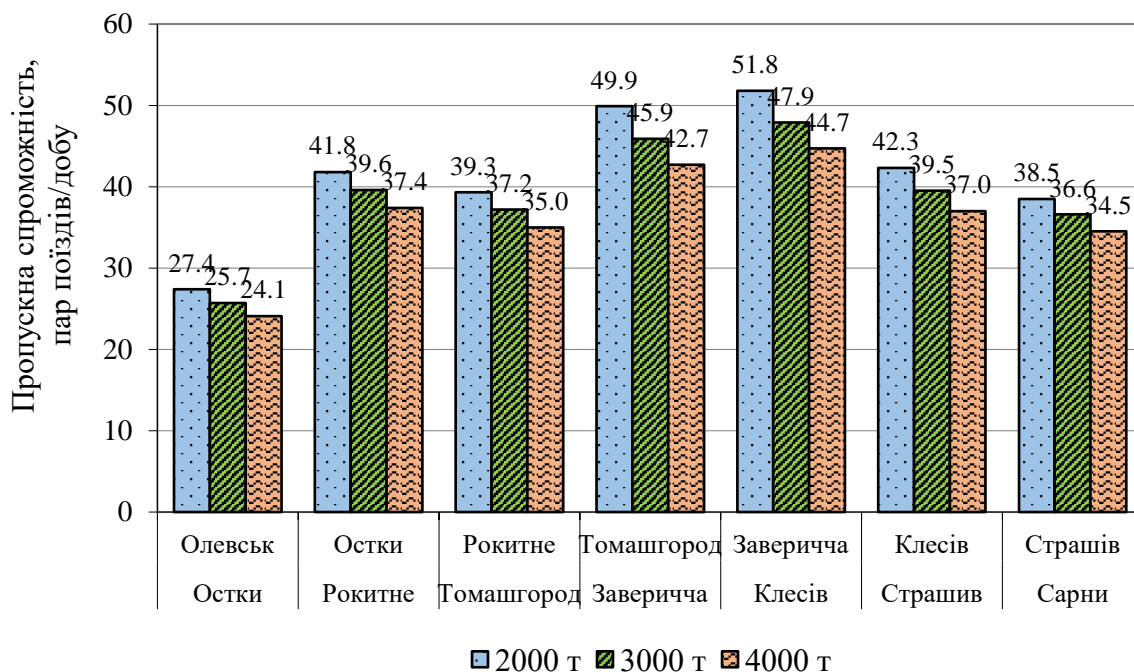


Рис. 2.6. Поперегінна пропускна спроможність на ділянці Сарни – Олевськ

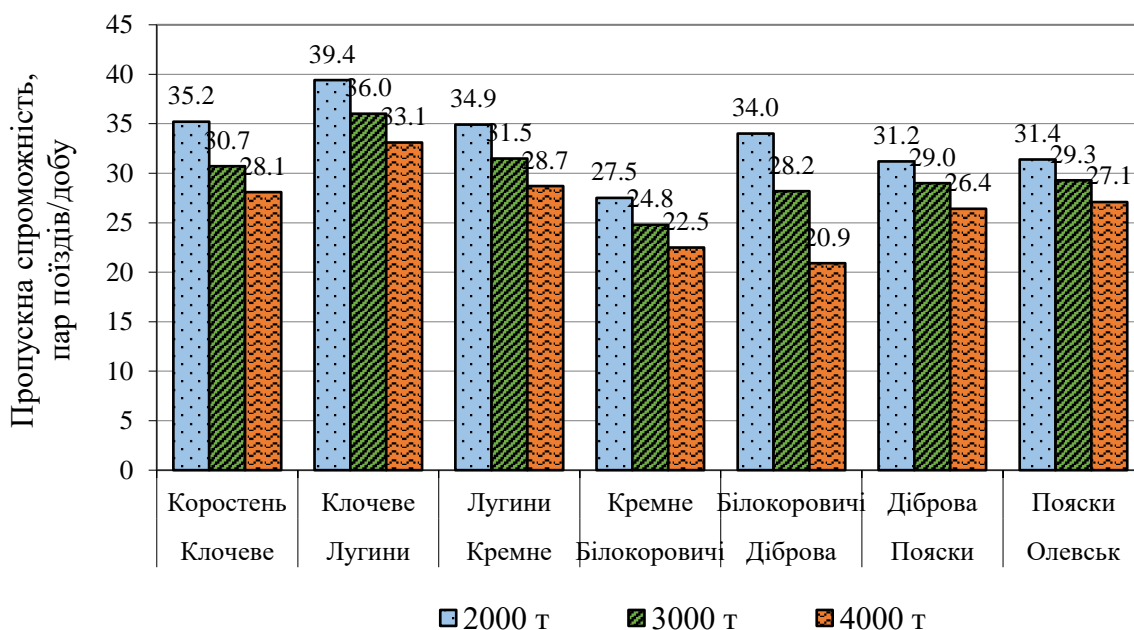


Рис. 2.7. Поперегінна пропускна спроможність на ділянці Олевськ – Коростень

2.3.2 Вплив на пропускну спроможність реконструктивних заходів

Аналіз пропускну спроможності (рис. 2.5 – 2.7) показує, що при масі поїзда 4000 т на ділянці Ковель – Сарни найменша пропускну спроможність має місце на перегоні Ковель – Поворськ – 19 пар поїздів на добу, близько до мінімального рівня перегін Антонівка – Сарни і Рафалівка – Антонівка – 20 пар поїздів на добу; на ділянці Сарни – Олевськ найменша пропускну спроможність на перегоні Остки – Олевськ – 24 пари поїздів на добу; на ділянці Олевськ – Коростень – на перегоні Білокоровичі – Кремне – 21 пара поїздів на добу. Отже, найбільш критичною є ділянка Ковель – Сарни, яка є найбільш складною як за параметрами профілю, так і за параметрами плану.

Що стосується маси поїзда 4000 т, то на напрямку Ковель – Коростень зустрічаються круті підйоми де мінімальна швидкість може бути меншою за мінімально допустиму, тобто $V_i < V_{min} = 20.0$ км/год. Наприклад, на перегоні Білокоровичі – Діброва-Олевська швидкість руху на підйом 8 - 10 км/год, що не допустимо для умов нормальної організації перевезень.

Відповідно до нормативів графіків руху поїздів на 2022 – 2023 роки в парному напрямку можуть пропускатися поїзди масою 4000 т, без зупинки по ст. Діброва Олевська та Лугини, які рухаються зі швидкістю близько 60 км/год. В непарному напрямку масою до 5100 тонн з застосуванням штовхача на перегоні Білокоровичі – Діброва-Олевська.

Програмою розвитку залізничної мережі АТ «Укрзалізниця» колії 1435 мм на 2023-2027+ роки передбачається техніко-економічні обґрунтування різних технічних, технологічних та організаційних рішень, розробка заходів з будівництва хабів/терміналів колії 1435 мм (Львів, Ужгород, Чоп, Ковель, Київ, Чернівці), капітальний ремонт колії 1435 мм на ділянці Ковель – Ягодин – держкордон, реконструкція споруд залізниці з електрифікацією напрямку Ковель – Ягодин – Держкордон з Республікою Польща.

Проект електрифікації «Ковель – Ягодин – Держкордон» матиме надзвичайно великий соціальний ефект, адже дозволить запуснути пасажирські поїзди Інтерсіті до ст. Ковель, яка має сполучення з усіма вузловими станціями України. Такий проект дозволить забезпечити пряме залізничне сполучення України з Європейським Союзом [66].

Враховуючи планові завдання і напрацювання авторів запропонована схема щодо реалізації вище перерахованих заходів (рис. 2.8).



Рис. 2.8. Реконструкція напрямку Варшава – Київ

Здійснення варіанту за напрямком Варшава – Київ дозволить організувати безпересадочний рух поїздів з Польщі до України. Необхідні заходи: будівництво другої колії на ділянці Ковель – Сарни – Коростень (300 км) шириною колії 1435 мм та електрифікація ділянки залізниці Дорогуськ – Ковель – Сарни – Коростень (360 км, колія 1435 мм). До недоліків слід віднести великі інвестиції, які будуть мати окупність тільки при великих потоках пасажирських і вантажних перевезеннях.

При реконструкції залізниці під колію 1435 року усувається обмежувача ланка – пункт перестановки на станції Ягодин. Пропускна спроможність одноколійної лінії залежить від часу ходу поїздів у парному та непарному напрямках та величини станційних інтервалів.

Враховуючи, що ділянка Київ – Коростень електрифікована, а ділянку Ковель – Ягодин планується електрифікувати згідно проекту, доцільно розглянути на перспективу перехід з тепловозної тяги на електричну ділянки Ковель – Сарни – Коростень і дослідити, як впровадження електричної тяги вплине на збільшення маси вантажного поїзда і в цілому на провізну спроможність.

При мінімальній розрахунковій швидкості електровоза 2ЕЛ5 43.5 км/год може бути прийнята маса поїзда 6700 т. Маса рухомого складу залежить також від довжини приймально-відправних колій l_{ne} і середнього погонного навантаження q , то необхідна перевірка за формулою

$$Q = q (l_{пв} - l_{лок} - 10), \quad (2.7)$$

де $l_{лок}$ – довжина локомотива, м.

При довжині прийнятно-відправних колій 850 м і середньому погонному навантаженні $q = 5.0 - 5.5$ т/вісь за формулою (2.7) $Q = 4000...4500$ тонн.

Виникає питання, чи буде ефективним уведення електричної тяги замість тепловозної. Для відповіді на це питання необхідно виконати тягові розрахунки, отримати час руху поїзда і розрахувати пропускну спроможність. Співставлення поперегиної пропускну спроможності для локомотивів 2М62 і 2ЕЛ5 при масі поїзда 4000 т наведено на рис. 2.9.

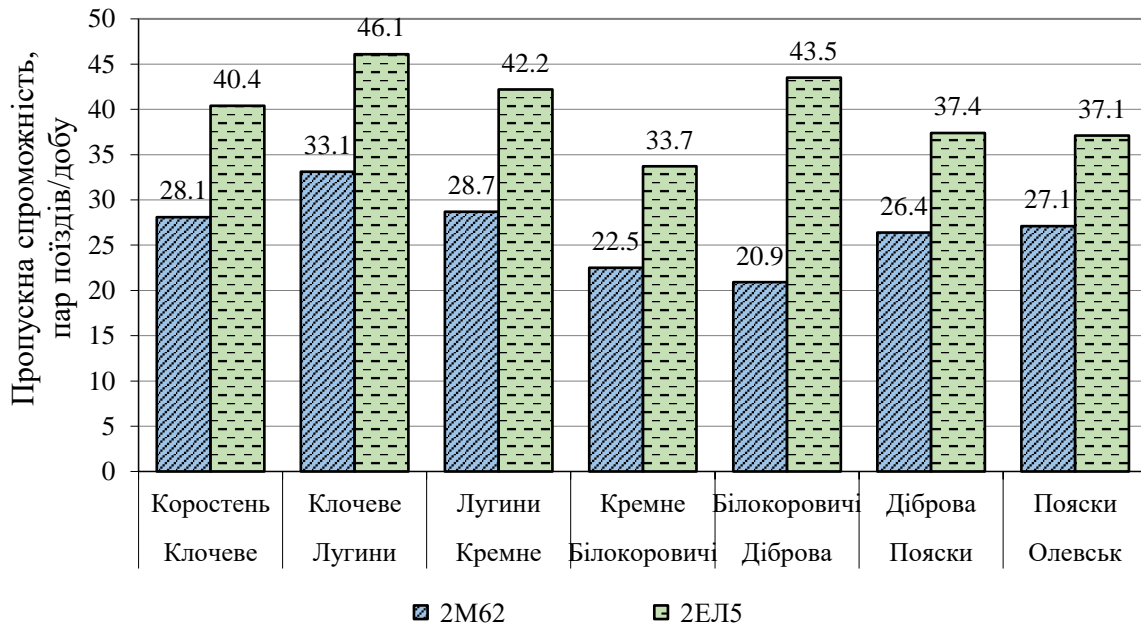


Рис. 2.9. Поперегиная пропускну спроможність при тепловозній і електричній тязі

З рис. 2.9 випливає, що обмежувачими пропускну спроможність є перегони Білокоровичі – Діброва і Кремне – Білокоровичі. При тепловозній тязі максимальна пропускну спроможність 21 пара поїздів на добу, при електричній відповідно – 43.5 і 37.5, тобто збільшується в 2.0 - 1.5 рази.

Відповідно до пропозицій [67] передбачається, що нова магістральна мережа колії 1435 мм використовуватиметься для міжнародних

пасажирських поїздів і для перевезення вантажів в контейнерах чи на платформах.

Для вирішення питання щодо можливості організації суміщеного руху на напрямку Варшава – Ковель виділимо з максимальної пропускної спроможності ту частину, що приходить на вантажний рух. Для визначення кількості вантажних поїздів, пар поїздів за добу, скористаємося формулою (2.4).

Для попередніх розрахунків прийнято коефіцієнт резерву пропускної спроможності $p = 0.15$, кількість пасажирських поїздів $n_{пас} = 2 \dots 8$, коефіцієнти зйому пасажирських $E_{пас} = 1.5$.

Результати розрахунків, отримані за формулою (2.4), представлені у вигляді графіків на рис. 2.10.

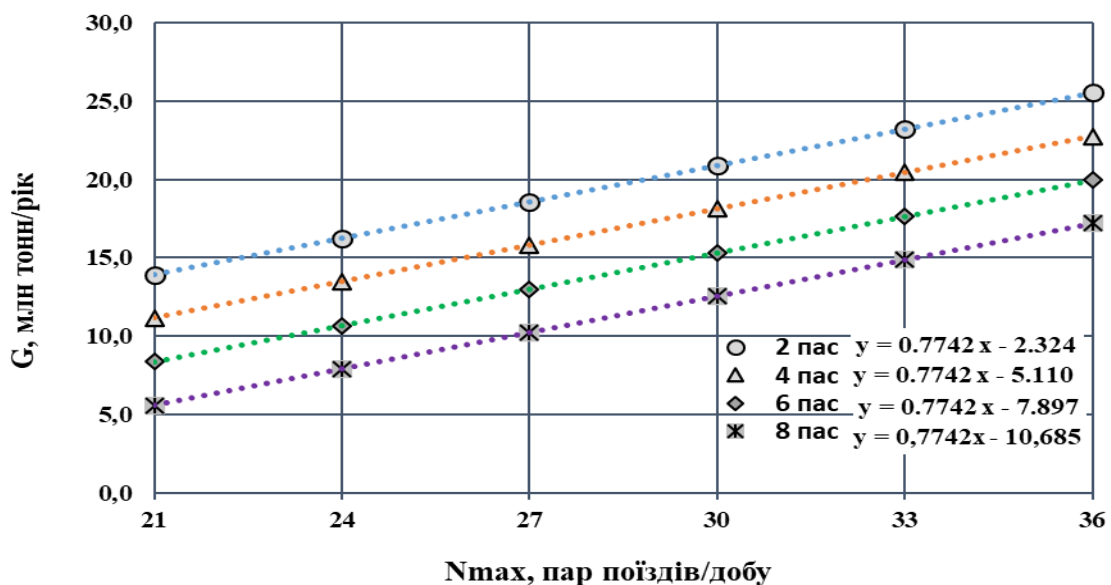


Рис. 2.10. Провізна спроможність в залежності від максимальної пропускної спроможності і кількості пасажирських поїздів

2.3.3 Модернізація залізничного напрямку Київ – Са- рни – Ковель – Держкордон з виходом до Варшави

Для порівняння варіантів в роботі прийнятий критерій «чистий дисконтований дохід» NPV (див. формулу 1.1). Наростаючий підсумок чистого дисконтованого доходу складається з доходу від пасажирських і вантажних перевезень за розрахунковий період $T = 15$ років тобто

$$\sum_{t=1}^{t=T} NPV_t = \sum_{t=1}^{t=T} NPV_t^{\text{пас}} + \sum_{t=1}^{t=T} NPV_t^{\text{ван}}. \quad (2.8)$$

Авторами розроблено модель прогнозування та оцінки ефективності перевезень залізничним транспортом з урахуванням усіх витрат за показником $NPV(t)$, який є різницею між загальним доходом $D(t)$ та всіма видами витрат з урахуванням фактору часу [68].

Розроблена модель дозволяє досліджувати й прогнозувати доходи, що отримає АТ «Укрзалізниця» від перевезень при застосуванні вищезазначених варіантів для різного рівня прогнозу і обсягів перевезень на перспективу.

Впровадження поїздів класу «Eurocity» та вантажного руху на напрямку від Варшави до Києва (ширина колії 1435 мм) потребує відповідних реконструктивних заходів (табл. 2.1).

Таблиця 2.1

Реконструктивні заходи, напрямок Дорогуськ – Ковель – Коростень – Київ

| Необхідні заходи | Обсяг, км | Вартість, млрд євро |
|---|-----------|---------------------|
| 1. Будівництво другої колії на ділянці Ковель – Сарни – Коростень шириною колії 1435 мм | 298 | 2.4...3.0 |
| 2. Електрифікація ділянки залізниці Дорогуськ – Ковель – Сарни – Коростень (колія 1435 мм) | 360 | 1.4...2.2 |
| 3. Перебудова другої колії з ширини 1520 мм на 1435 мм на ділянці Коростень – Київ або укладання суміщеної колії на одній з головних колій. | 156 | 0.5...0.6 |

При оцінці вартості варіантів були прийняті дані з відповідних проектних матеріалів «Київдіпроторанс» і «Львівтранспроєкт» з урахуванням коефіцієнтів для переходу до цін 2024 року: будівництво II головної колії – 8.0 - 10.0 млн євро/км, електрифікація – 4.0 - 6.0 млн євро/км, перебудова II колії з 1520 мм на 1435 мм – 3.0-4.0 млн євро/км.

Прийнявши максимальну пропускну спроможність напрямку на рівні 21 пари поїздів на добу і кількість пасажирських поїздів – дві пари, знаходимо з графіку (рис. 2.10) провізну спроможність 14 млн тонн на рік, що за формулою (2.4) відповідає $n_{вант} = 15 \text{ пар поїздів/добу}$.

Величина чистого дисконтованого доходу на напрямку Варшава–Ковель – Коростень – Київ для вище вказаних вихідних даних:

$$\sum_{t=1}^{t=T} NPV_t^{nac} = -21,163 \text{ млрд євро},$$

$$\sum_{t=1}^{t=T} NPV_t^{ван} = 7,329 \text{ млрд євро}.$$

Отже, наростаючий підсумок чистого дисконтованого доходу від пасажирських і вантажних перевезень за розрахунковий період $T = 15$ років від’ємний.

Прийнявши $n_{nac} = 8$ пар поїздів/добу, отримуємо також від’ємне значення – 2.957 млрд євро. При цьому обсяги вантажних перевезень зменшуються до 5.2 млн т/рік і результат також від’ємний – 15.178 млрд євро.

Можна зробити висновок, що впровадження суміщеного руху на напрямку Варшава – Київ при наявності одноколійних залізниць і тепловозної тяги обмежується пропускною спроможністю й видом тяги.

Як було встановлено (див. рис. 2.9), найменша пропускна спроможність при електричній тязі 33 пари поїздів на добу. Перевіримо, чи достатньо цієї пропускної спроможності для пропуску пасажирських і вантажних поїздів.

Результати розрахунків за формулою (2.8) наведені на рис. 2.10. Переведення залізниці на електричну тягу дозволяє підвищити пропускну спроможність і отримати позитивний ефект у вигляді чистого дисконтованого доходу при вантажопотоці 21 млн т/рік і 4-х парах пасажирських поїздів (див. рис. 2.11), тобто

$$\sum_{t=1}^{t=15} NPV_t^{пас} + \sum_{t=1}^{t=15} NPV_t^{ван} = 0.142 \text{ млрд євро}$$

З аналізу вище наведених результатів, приходимо до наступних висновків:

Модернізація залізничного напрямку Київ – Сарни – Ковель – Держкордон з виходом до Варшави має значний потенціал для покращення транспортного сполучення між Україною та Польщею, а також для стимулювання економічного розвитку регіонів, через які проходить даний маршрут.

Ґрунтуючись на результатах аналізу пропускної спроможності при тепловозній та електричній тязі для різної маси вантажного поїзда, встановлені перегони, які є найбільш складними як за параметрами

профілю, так і за параметрами плану, а отже критичними щодо встановлення провізної спроможності всього напрямку.

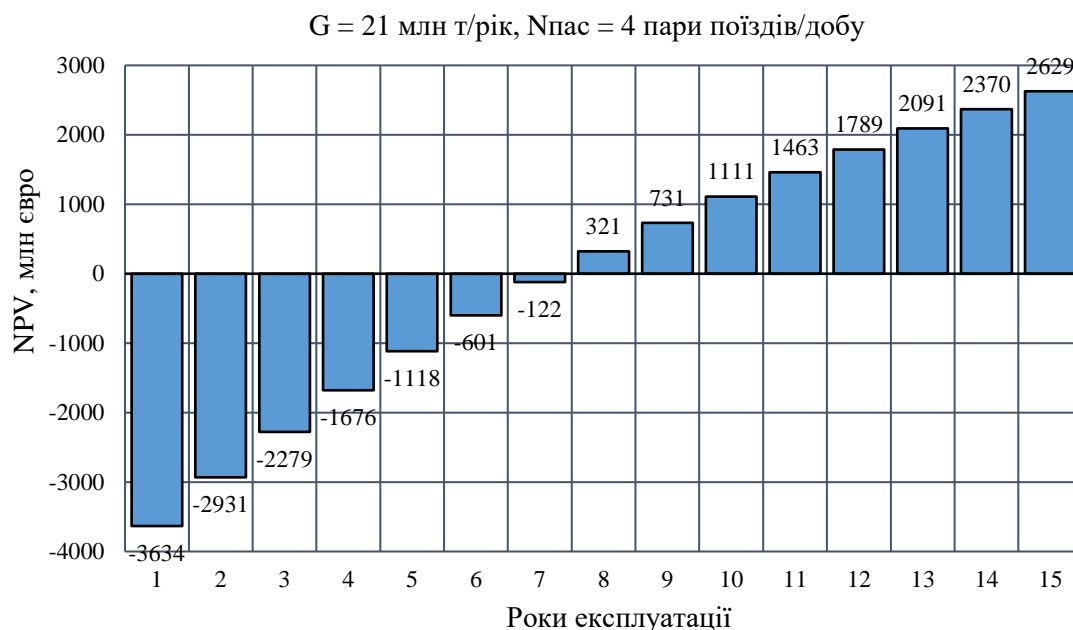


Рис. 2.11. Діаграма розподілу NPV на напрямку Варшава – Ковель – Коростень – Київ

Для збільшення пропускної й провізної спроможності при забезпеченні експлуатаційної сумісності українських і польських залізниць (колія 1435 мм) рекомендуються такі реконструктивні заходи як: будівництво другої головної колії на ділянці Ковель – Сарни – Коростень шириною колії 1435 мм та перебудова другої колії з ширини 1520 мм на 1435 мм на ділянці Коростень – Київ або укладання суміщеної колії на одній з головних колій.

Як показали попередні розрахунки реалізація даного проєкту потребує значних інвестицій. Враховуючи низьку пропускну спроможність (19-21 пара поїздів/добу) організація суто пасажирського сполучення не дозволяє отримати позитивний ефект від перевезень. Запровадження суміщеного руху (пасажирські й контейнерні вантажні перевезення) також не дозволяють отримати прибутку при тепловозній тязі.

Виходом з такого становища може бути електрифікація ділянки залізниці Дорогуськ – Ковель – Сарни – Коростень (колія 1435 мм), що дозволяє підвищити пропускну спроможність до 37 пар поїздів на добу

і отримати чистий дисконтований дохід при таких розмірах перевезень: пасажирський рух – 4 пари поїздів на добу, обсяг вантажних перевезень – 21 млн т/рік.

На основі результатів вітчизняних та зарубіжних наукових розробок намічено шляхи вирішення проблеми, що дозволить організувати безпересадочний рух поїздів за напрямком Варшава – Київ. Встановлені необхідні заходи: будівництво другої колії на ділянці Ковель – Сарни – Коростень (300 км) шириною колії 1435 мм, електрифікація ділянки залізниці Дорогуськ – Ковель – Сарни – Коростень (360 км, колія 1435 мм) та перебудова другої головної колії Коростень – Київ (150 км) під європейський стандарт.

Остаточне рішення потребує додаткових економічних вишукувань і встановлення перспективних обсягів перевезень вантажів і пасажирів.

2.4 Доцільність застосування суміщеної колії для розширення міжнародних перевезень

2.4.1 Досвід використання суміщеної колії 1435/1520 мм на Львівській залізниці

У світі існує кілька стандартів ширини колії, і коли на шляху поїзда зустрічаються ділянки з різною шириною колії, необхідно вживати спеціальних заходів – або міняти візки на вагонах, або перевантажувати вантаж чи пересаджувати пасажирів у вагони з відповідною шириною колії. Цю проблему можна також вирішити, поєднавши обидві колії, отримавши подвійну колію. Суміщена (подвійна) колія на відміну від звичайної, складається з трьох (рис. 2.12) або чотирьох рейок.

Три рейки можливо використати у ситуації, коли різниця ширини двох колій достатня, щоб вмістити рейку меншої колії у більшу колію, використовуючи одну з рейок як спільну. Наприклад, 1668 та 1435 мм в Іспанії, 1435 та 1067 мм в Австралії та Японії, 1676 та 1000 мм у Бангладеш.

Для суміщення колій, які мало відрізняються між собою, можливі лише сплетення, що використовують чотири рейки. Саме така ситуація має місце, зокрема, на більшій частині західних кордонів України: різниця між 1435 та 1520 мм становить лише 85 мм.



Рис. 2.12. Трирейкова колія поблизу станції Їндржихув – Градец в Чехії
Джерело: https://w.wiki/_pQAC

На Львівській залізниці сумарна довжина суміщеної колії (1520 і 1435 мм) становить близько 150 км. Протягом понад 170 років суміщена рейкова колія експлуатувалась з дерев'яними шпалами та костьяним проміжним скріпленням без застосування машин та механізмів для капітального ремонту. При цьому швидкість руху поїздів дорівнювала 20...40 км/год [17].

Головне управління колійного господарства сумісно з Науково-конструкторським технологічним бюро колійного господарства Укрзалізниці (НКТБ ЦП УЗ), заводами-виробниками та фахівцями служб колії Львівської залізниці виконали розробку та впровадження в виробництво нової суміщеної рейкової колії 1520 та 1435 мм із залізобетонними шпалами та проміжним пружним рейковим скріпленням [69]. Дослідна ділянка такої колії розпочинається від станцій Чоп і Д'яково до державного кордону України (рис. 2.13).

В сучасних умовах привабливим міг би стати проект зі з'єднання як мінімум двох ділянок суміщеної колії з подальшим створенням інтермодального хаба. Наприклад, можна було б поєднати європейською колією Мукачєво та Мостиську (майже 300 км), побудувавши у Львові великий перевалочний хаб. Природно, що такого роду плани вимагають залучення іноземних інвестицій.

На сьогодні Україна має такого роду термінал у Закарпатті. Ще в 1998 році в Чопі було створено термінал «Карпати», виробничі потужності якого розташовані біля вузлової станції Батьово. Однак він явно програє своєму словацькому конкуренту та вимагає подальшого розвитку.

Крім того, Україна і Польща могли б об'єднати зусилля в створенні спільного інтермодального терміналу з перевалки вантажів і забезпечити таким чином надійним вантажопотоком свої комбіновані залізничні лінії.

У жовтні 2015 року успішно завершена прокладка першої ділянки залізниці від державного кордону Литви і Польщі до Каунаса (рис. 2.14). На ділянці залізниці «Rail Baltica» довжиною 120 км була прокладена нова колія європейського стандарту (шириною 1435 мм), а поруч з нею оновлена існуюча залізнична лінія з шириною колії 1520 мм. На новій трасі укладено 233 км нових рейок для колій шириною 1435 мм і 1520 мм, включаючи парки колій на станціях, оновлено інфраструктуру залізничних інженерних мереж, реконструйовано станції. Загальна вартість будівництва залізниці «Rail Baltica» склала 765 млн. євро (близько 6,5 млн. євро/км). З 17 червня 2016 року розпочато регулярне пасажирське сполучення з Каунаса (Литва) у Білосток (Польща).

Один з пріоритетних залізничних проєктів Європи – залізниця «Rail Baltica», є частиною залізничного коридору «North Sea-Baltic», який з'єднує Фінляндію, Естонію, Латвію, Литву, Польщу, Німеччину, Голландію, Бельгію і Люксембург [70]. Довжина коридору «North Sea - Baltic» – 3200 кілометрів (рис. 2.15).

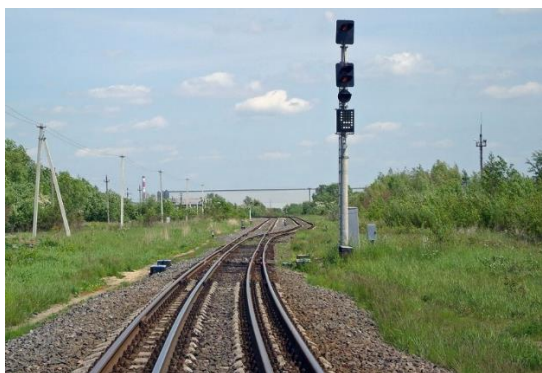


Рис. 2.13. Ділянка суміщеної рейкової колії 1520 і 1435 мм



Рис. 2.14. Суміщена колія на ділянці Шяштокай – Моцкава
Джерело: https://w.wiki/_pQA8



Рис. 2.15. Залізниця «Rail Baltica»

Джерело: https://w.wiki/_pQ9r

Rail Baltica включена в число пріоритетних проєктів ЄС і програму Європейських комунікаційних мереж (TEN-T). Реалізація проєкту на 50% співфінансується з бюджету TEN-T, і на 50% – з бюджету кожної причетної до нього країни.

Головною метою Rail Baltica є відновлення безпосереднього зв'язку країн Балтії з європейською залізничною мережею і розвиток регіональної інтеграції. Інтеграція залізниць Естонії, Латвії та Литви в транспортну систему Євросоюзу дозволить збільшити швидкість руху поїздів, зростання пасажиро- та вантажопотоків і прибутків.

Проєкт Rail Baltica, який має на меті інтегрувати країни Балтії до європейської залізничної мережі, планується завершити до 2030 року. Загальна довжина залізничної лінії Rail Baltica в країнах Балтії становитиме приблизно 870 км, з яких на території Литви 392 км, Латвії 265 км, Естонії 213 км.

У липні 2024 року проєкт отримав додаткове фінансування від Європейського Союзу в розмірі 1.2 млрд євро для прискорення будівельних робіт.

Включення Rail Baltica до мережі TEN-T сприятиме розвитку перевезень між ЄС та Україною

2.4.2 Пріоритетні проєкти суміщеної залізничної колії в Україні

В Україні є досвід використання європейської колії. Так, поїзди, що прямують зі Словаччини в Румунію, проходять по європейській колії на українській території (Чоп, Батьово, Королево, Дяково) без заміни колісних пар. Найбільша по довжині ділянка залізниці колії 1435 мм, що використовується на території України, Чоп – Дяково, 112 км. На даний момент поглиблення європейської колії на українській території є в трьох прикордонних областях. Найбільший відрізок комбінованої колії (1520 мм\1435 мм) знаходиться в Закарпатті на ділянках Чоп – Батьово – Мукачево (близько 40 км, електрифіковано) і Батьово – Королево – Дяково (близько 80 км). У Волинській області європейська колія пролягає від польського кордону до Ковеля (64 км), а у Львівській: Арламівська Воля – Мостиська – Держкордон (7 км колії 1435 мм та 11.8 км суміщеної колії) і Хирів – Старжава – Держкордон та Хирів – Нижанковичі (12.9 км колії 1435 мм та 25.7 км суміщеної колії); Рава-Руська – Гребенне (7.1 км колії 1435 мм). Зазначені ділянки входять до міжнародних транспортних коридорів (Критський №3, №5 та Гданьк – Одеса).

Україна запропонувала Словаччині і Румунії перевозити вантажі з однієї країни в іншу через Закарпатську область, використовуючи водночас комбіновану залізницю Халмеу – Дяково – Батьово – Королево – Чоп – Черна-над-Тисою.

Актуальним для України є забезпечення мобільного руху пасажирських поїздів, перш за все з Польщі в Україну. Змінити українську колію на європейську неможливо із-за необхідності вкладання великих інвестицій. Тому пропонуються варіанти реконструкції внутрішніх напрямків. Реалізувавши безперешкодне залізничне сполучення між Львовом і Варшавою, створюється можливість перевезення вантажів і подорожей українських пасажирів в будь-яку з країн Євросоюзу, Балкан або Прибалтиці.

Інфраструктурний проєкт Євроколія «Мостиська – Львів»

Одне з найбільш важливих напрямків, що з'єднують Німеччину, а через неї інші країни Західної Європи, з Україною є Критський транспортний коридор № 3. Схема ділянки цього коридору Львів – Мостиська – Краків показана на рис. 2.16.



Рис. 2.16. Схема ділянки Краків – Медика – Мостиська – Львів [17]

Одним з пріоритетних може бути інфраструктурний проєкт запропонований Міністерством інфраструктури України Євроколія «Сухий порт» [71]. Проєктом передбачається розвиток залізничної інфраструктури з будівництва суміщеної колії 1435 мм та 1520 мм на дільниці Мостиська-1 – Родатичі Львівської області. Орієнтовна вартість – 11 млн євро. Ділянка залізничної колії Мостиська-1 – Львів входить до Критського міжнародного транспортного коридору № 3 (Берлін – Вроцлав – Львів – Київ). Ця ділянка двоколійна, з шириною колії 1520 мм, парна колія суміщена із колією 1435 мм, до 90-х років до станції Родатичі (довжина 42 км), у теперішній час – до ст. Мостиська-1 (рис. 2.17)



Рис. 2.17. Проєкт ділянки суміщеної колії Держкордон – Родатичі з перспективним виходом до Львова

Ділянка Львів – Мостиська електрифікована на постійному струмі. Для обслуговування поїздів використовуються електровози ЧС7 в пасажирському русі і ВЛ10 у вантажному. На цій ділянці розташовані 11 станцій: Львів, 5 парк, Рудний, Мшана, Затока, Городок, Родатичі, Судова Вишня, Хоросниця, Мостиська-2, Мостиська-1. Максимальна швидкість для пасажирських поїздів встановлена 120 км/год, для вантажних – 80 км/год.

З аналізу профілю й плану ділянки Львів – Мостиська випливає, що найбільша кількість кривих радіусом від 700 до 1200 м, їх питома вага становить 12,1%. Питома вага кривих радіусів до 700 м становить 4,9%. Характерним для плану лінії є велика кількість обмежень по параметрам складових кривих. Керівний ухил – 8 ‰.

Ділянка залізниці відноситься до IV категорії згідно [72]. Верхня будова: рейки типу Р65, безстикова колія. Скріплення і шпали нові або старопридатні поєднані з новими. Епюра шпал: в прямих і кривих – 1840 шт/км, за винятком дерев'яних шпал на ланковій колії в кривих $R < 1200$ – 2000 шт/км. Баласт щебенекий, товщиною під шпалами 30 см.

Загальна кількість штучних споруд на ділянці – 81 шт., з них залізобетонних мостів – 16, кам'яних труб – 8, залізобетонних труб – 8, металевих мостів – 4.

Час руху вантажного поїзда від Львова до Мостиськи (без урахування стоянок на станціях) складає 70 хв, а пасажирського – близько години при середньо ходовій швидкості 70 - 75 км/год.

Відповідно до прогнозів Укрзалізниця планувала збудувати суміщену колію 1520/1435 мм від Мостиськи до Львова, що відкрило б нові можливості для пасажирів. Українці зможуть отримати пряме швидкісне сполучення зі Львова до Кракова, Праги, Відня.

Суміщена колія дозволить поїздам, що прямують з Європи, без втрати часу на заміну візків доїжджати до залізничної станції Скнилів, розташованої за 5,5 км до Львова. Цей пункт призначення був обраний, щоб уникнути перевантаження станції Львів, через яку прямують фактично усі внутрішньодержавні поїзди. А Скнилів може стати міжнародним залізничним хабом, переключивши частину пасажиропотоку Перемишля. Крім того, для комфорту пасажирів Укрзалізниця планує між Скниловом, аеропортом і центральним залізничним вокзалом міста запустити експрес.

Перевезення здійснюватимуть європейські оператори, оскільки в Україні немає відповідного рухомого складу. У загальному комплексі робіт необхідно вкласти 69.8 км суміщеної колії 1435/1520 мм, збудувати 3.1 км колії 1435 мм, виконати на 58.2 км розширення основної площадки земляного полотна, провести комплексно-оздоровчий ремонт 9.5 км існуючої суміщеної колії та реконструкцію 8 станцій, ви-

конати реконструкцію та модернізацію інфраструктури електропостачання, збудувати інфраструктуру вокзалу станції Скнилів колії 1435 мм.

Інфраструктурний проєкт «Євроколія Львів – Рава-Руська – Держкордон – Варшава»

Метою проєкту «Євроколія Варшава – Львів» є створення ефективного міжнародного залізничного сполучення між Польщею, країнами Євросоюзу та Україною в умовах активно зростаючих політичних, економічних та соціальних зв'язків. Укладання суміщеної колії дозволило б поїздам доїжджати зі Львова у міста Європи без зайвих пересадок.

Для будівництва нової суміщеної колії, зокрема на ділянці Рава-Руська – Львів до залізничної станції Брюховичі біля Львова (рис. 2.18), необхідно виконати комплекс робіт: укласти 58 км нової суміщеної залізничної колії; реконструювати 5 станцій; обладнати автоматикою 9 переїздів; реконструювати 18 штучних споруд і розширити основну площадку земляного полотна протяжністю 59.1 км.

Вибір Брюховичів у якості кінцевого пункту європейської колії не випадковий. Незважаючи на розвинену ширококоліїну інфраструктуру навколо залізничного вокзалу Львова, її перебудова потребує значних капіталовкладень. Тому простіше й дешевше прокласти європейську колію до ст. Брюховичі на околиці Львова, з якої до центру міста можна дістатися автотранспортом за 10 хвилин.



Рис. 2.18. План залізничного напрямку Львів – Рава-Руська – Держкордон – Варшава

Загальна вартість основних робіт з розвитку залізничної інфраструктури з будівництва суміщеної колії на ділянці Рава-Руська – Львів до залізничної станції Брюховичі, за попередніми оцінками, становить 50 млн євро (без урахування коштів на розробку проектно-кошторисної документації та інші види робіт).

Ділянка Львів – Рава-Руська, одноколійна, обслуговується тепловозною тягою, відноситься до залізниці VII категорії як за розмірами перевезень, так і за максимальною швидкістю руху. Вантажонапруженість лінії – 5 млн тонн бруто/км на рік. Пропущений тоннаж лінії коливається від 13 до 24 млн тонн бруто/км. Максимальна швидкість проходження по ділянці пасажирських поїздів 80 км/год, вантажних – 60 км/год.

На даній ділянці покладена ланкова колія з рейками типу Р65. Епюра шпал коливається від 1449 шт/км до 1904 шт/км, так як ділянка має криві малих радіусів від 203 до 300 і більше метрів. Залежно від величини радіусів колія покладена на залізобетонних і дерев'яних шпалах. Саме з цієї причини на ділянці експлуатується 4 види проміжних скріплень: КБ, КПП-5, СКД-Д, ДО. Загальна кількість штучних споруд на ділянці – 82 шт, з них залізобетонних мостів – 42, кам'яних труб – 5, залізобетонних труб – 28, металевих мостів – 5, металевих труб – 2.

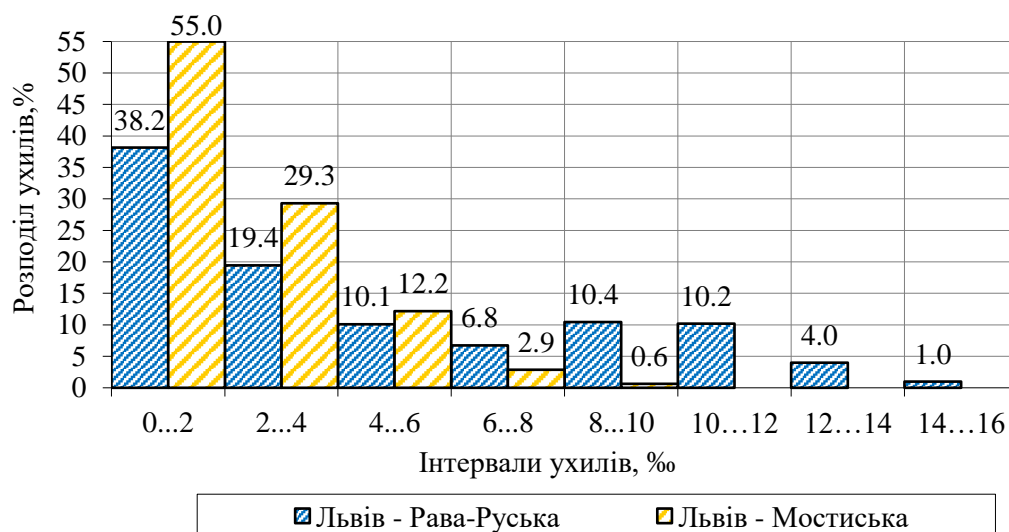


Рис. 2.19. Гістограма розподілення ухилів

Поздовжній профіль ділянки Львів – Рава-Руська довжиною 68 км являє собою переважно спуск з ухилами від 9 до 16 ‰, ухилів крутіших за 10 ‰ – 15.2 ‰ (рис. 2.19).

Істотний вплив на величину максимально допустимої швидкості має план лінії. З гістограми випливає, що питома вага кривих радіусом до 500 становить 15.9% (рис. 2.20). Характерним для плану ділянки Львів – Рава-Руська є велика кількість обмежень за параметрами складових і суміжних кривих. Через складний план лінії часто неможливим є збільшення підвищення зовнішньої рейки в кривих, що вимагає подовження перехідних кривих, яке часто неможливо виконати при коротких прямих вставках. За результатами тягових розрахунків встановлено, що при максимально дозволений швидкості до 80 км/год, середня ходова швидкість складає близько 50 км/год, а час руху 80 – 90 хв.

Ділянка Львів – Мостиська має значно кращі показники за профілем і за планом у порівнянні з ділянкою Львів – Рава-Руська. Заявлене підтверджується і рівнем середньої ходової швидкості, яка в 1.5 рази вища на першій ділянці. Крім того ділянка Львів – Мостиська двоколійна, що дозволяє забезпечити в 4-5 разів більш високу пропускну спроможність.

За проектом Львів – Мостиська – Варшава довжина варіанту в 1.6 рази більша і його вартість становить 120 млн. євро. Вартість проекту Львів – Варшава через Раву-Руську становить 50 млн євро (різниця в 58%). Час руху по більш довгому варіанту менший і складає 5.7 год, проти 6.2 год у другому випадку. Експлуатаційні витрати на пробіг пасажирського поїзда 6.0/6.5 євро/поїздо-км проти 8.0/8.5 євро/поїздо-км у другому випадку.

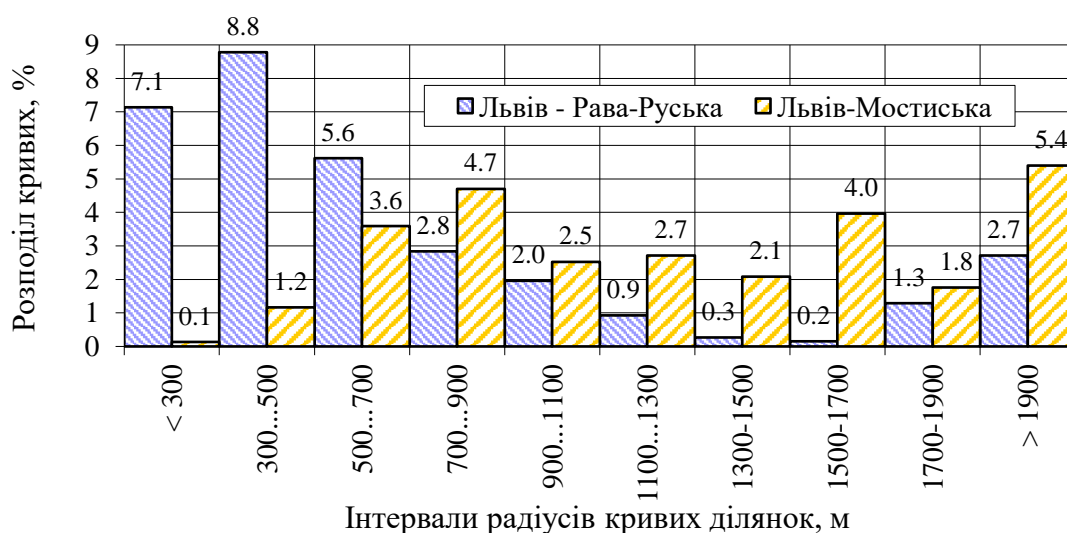


Рис. 2.20. Гістограма розподілення радіусів кривих

2.4.3. Переваги та недоліки суміщеної колії

Укладання суміщеної колії не потребує улаштування окремого земляного полотна, що можна віднести до переваг цього способу організації руху поїздів. Однак застосування суміщеної колії потребує розв'язок і обходів роздільних пунктів через необхідність укладання стрілочних переводів нормальної 1520 мм і європейської 1435 мм колій, що призводить до зниження швидкості руху поїздів при проходженні станцій.

Розв'язання цієї задачі, як і спорудження другої колії шириною 1435 мм паралельно існуючій лінії 1520 мм, приводить або до необхідності реконструкції роздільних пунктів на даному напрямку, або застосування кривих для їх обходу (див. рис. 2.21) [73].

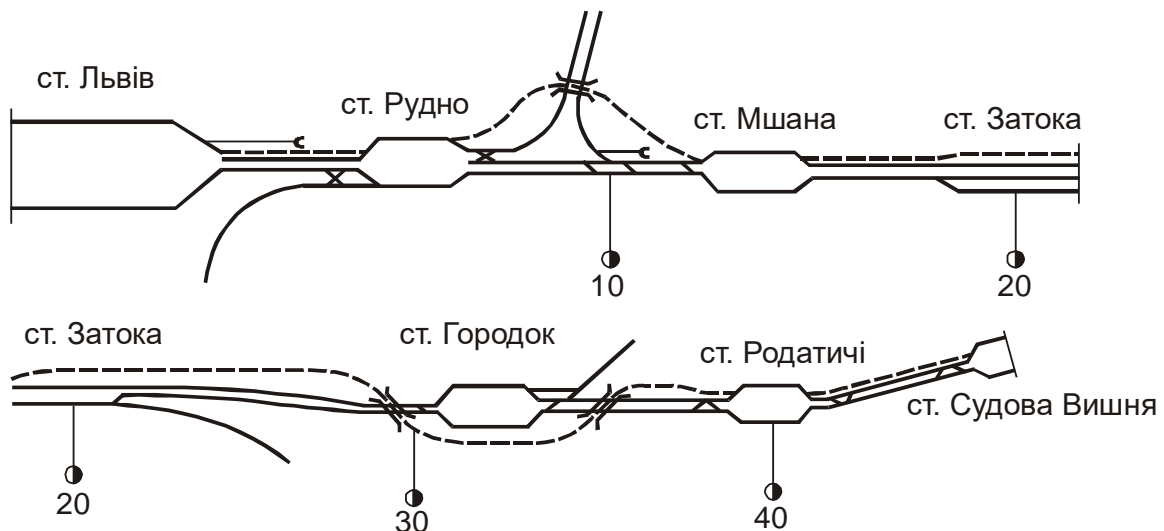


Рис. 2.21. Варіант пропуску поїздів по сполученій колії 1520 і 1435 мм на напрямку Львів – Мостиська

При цьому застосовують такі конструкції як глухі перетини, сплетіння та суміщення колії 1520 мм і західноєвропейської 1435 мм.

Згідно з визначенням ОСЗ [74] сплетіння і суміщення колій (застосовують в стиснених умовах) – це частина колій двоколіїної ділянки, де одна рейкова колія змонтована на іншу і покладена на загальних шпалах за допомогою двох хрестовин без стрілок для сплетінь (рис. 2.22) і однієї хрестовини і однієї стрілки для суміщень (рис. 2.23). Реально на ділянках сплетінь існують варіанти без зміни сторонності і зі зміною сторонності.

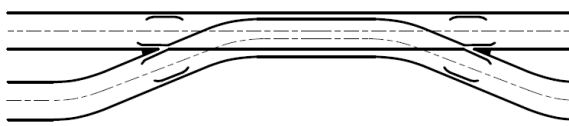


Рис. 2.22. Схема сплетіння колій



Рис. 2.23. Схема суміщення колій

На рис. 2.24 показано фрагмент сплетіння колій, де одна рейкова колія насунута на другу і вкладена на її шпалах за допомогою хрестовини без стрілок.



Рис. 2.24. Сплетіння колій

Окрім цього для забезпечення з'єднання суміщеної колії з окремо лежачими коліями 1435 та 1520 мм на Львівській залізниці експлуатуються індивідуальні конструкції з'єднань. Так, наприклад, комбінований стрілочний перевід експлуатується по Хустській дистанції колії на станціях Берегове та Виноградово, тип Р50, марка 1/11, лівої сторонності, на дерев'яних брусах, 1991 року вкладання (рис. 2.25).

Щоб зменшити в якійсь мірі недоліки суміщеної колії в Україні був розроблений спеціальний перевід призначений для руху поїздів з різною шириною колії (рис. 2.26).

Стрілочний перевід суміщений проєкту Дн410 із рейок європейського профілю типу UIC60 марки 1/11 колії 1435 мм на дерев'яних бру-

сах з хрестовиною з приварними рейковими закінченнями був укладений в травні 2005 року на першій головній колії проміжної залізничної станції Косини регіональної філії «Львівська залізниця» [75].



Рис. 2.25. Комбінований стрілочний перевід



Рис. 2.26. Стрілочний перевід суміщений

У вересні 2017 році стрілочний перевід проєкту Дн 410 було обстежено і встановлено, що пропущений тоннаж – 8.9 млн тонн бруто, швидкість руху по прямому напрямку 60 км/год, по боковому – 25 км/год.

Для аналізу особливостей напружено-деформованого стану суміщеної конструкції колії було використано розроблену авторами просторову модель динамічних деформацій залізничної колії на основі теорії пружності, яка розглянута в четвертому розділі [75, 76].

Відповідно до Інструкція з укладання та утримання суміщеної залізничної колії 1520 мм і 1435 мм [77] суміщена колія укладається на дерев'яних шпалах в прямих і кривих ділянках колії радіусом не менше ніж 300 м або залізобетонних шпалах типу СБЗС (Ш2С-1) в прямих і кривих радіусом не менше ніж 350 м. З рис. 2.19 випливає, що на ділянці Львів – Рава-Руська кривих менших за 300 метрів 7.1%. Отже, в цьому випадку суміщена колія не укладається, а для її застосування потрібно розширення земляного полотна з переходом на нову трасу або перебудова кривих, що також призведе до зміщення осі колії.

Для забезпечення рівнопружності залізничної колії необхідно перейти на укладання таких стрілочних переводів на залізобетонних брусах. У 2024 році відбулися випробування вpletіння типу Р65 марки 1/11 колії 1435 мм в колію 1520 мм на залізобетонних брусах виготовлене підприємством-виробником металокопункцій АТ «Дніпропетровський стрілочний завод». Остаточне рішення може бути прийнято після додаткових досліджень.

2.5. Перебудова однієї з колій двоколіїної ділянки на ширину 1435 мм

2.5.1. Стратегія переходу на євроколію на двоколіїній залізниці

У 2023 році Європейська комісія спільно з Україною розробила детальну стратегію переходу на євроколію. Ця стратегія включає оцінку вартості проєкту, план поетапного впровадження та визначення джерел фінансування [22]. Отже, актуальним завданням сьогодні є розробка теоретико-методологічних підходів і практичних рекомендацій щодо визначення технічних можливостей створення залізничних магістралей в Україні за європейським стандартом.

Євроколію для швидкісних перевезень планують будувати від кордону з Польщею у Мостиськах та Раві-Руській до Львова, між Львовом і Києвом та Чопом, а також від Львова до кордону з Румунією [78, 79] (див. рис. 1.16).

Виникає питання, яким способом буде збудована нова колія: якщо це двоколіїна ділянка, то одна колія залишається шириною 1520 мм,

друга перекладається на ширину 1435 мм, чи одна з колій буде суміщеною (1435/1520 мм), чи буде збудована колія 1435 мм на новій трасі [80]. Кожен з окреслених варіантів потребує різних інвестицій та забезпечує різний рівень пропускної й провізної спроможності. Розглянемо це питання на прикладі деяких проєктів.

1. На ділянці Ужгород – Чоп на даний час є тільки колія 1520 мм. До 1996 - 1998 рр. існувала колія 1435 мм яка була демонтована. Проєктом передбачається відновлення колії 1435 мм. Довжина ділянки становить 27.5 км. Реалізація проєкту запланована на 2024 - 2027 роки.

2. Напрямок Мостиська – Львів (Скнилів) перетворюється в дві однокільні ділянки, тобто непарна колія залишається 1520 мм, а парна перекладається на колію європейського стандарту 1435 мм. Довжина ділянки становить 62.5 км. Реалізація проєкту запланована на 2025-2028 роки.

3. На ділянці Львів (Брюховичі) – Рава-Руська довжиною 58 км колія 1520 мм буде замінена на колію 1435 мм, а колія 1520 мм з Рави-Руської буде капітально відремонтована до Червонограда.

Станом на 1 грудня 2023 року жодний з проєктів не розпочато. Триває пошук джерел фінансування.

2.5.2. Характеристика об'єкта дослідження

Одним з напрямків, що включений в Трансевропейську транспортну мережу (TEN-T), є Балтійсько – Адріатичний коридор. Цей коридор з'єднує Балтійське та Адріатичне моря, проходячи через Львів. Ділянка Львів – Мостиська – Держкордон є частиною цього коридору, що веде до Польщі, вона і є об'єктом дослідження (див. рис. 2.16).

На цьому напрямку залізничний транспорт відіграє головну роль, має досить хороше технічне оснащення, проте це не виключає виконання робіт з реконструкції інфраструктури з метою підвищення швидкостей руху й збільшення пропускної й провізної спроможності, з будівництва транспортно-логістичних термінальних комплексів, без яких мультимодальні перевезення й інтермодальні технології організувати не можна [17].

Крім транзитних, коридор відіграє важливу роль і у внутрішньому сполученні, оскільки перетинає промислово розвинений регіон Сілезії з великими гірничодобувними та металургійними підприємствами.

Дослідимо умови, за яких доцільно застосування проектного рішення, що полягає в перебудові двоколійної ділянки на дві одноколійні з різною шириною колії: одна колія залишається шириною 1520 мм, друга перекладається на ширину 1435 мм. Для прикладу розглядається перебудова ділянки Мостиська – Львів (Скнилів) на дві одноколійні ділянки 1520 і 1435 мм. Доцільність такого рішення буде залежати від конкретних умов та завдань. Дослідження виконано з використанням методів графоаналітичного моделювання. Методика полягає в застосуванні розробленої математичної моделі, яка дозволяє оцінювати різні сценарії пропускної спроможності напрямку, використовуючи графіки оволодіння перевезеннями.

Ділянка Львів – Мостиська-2 двоколійна, електрифікована на постійному струмі має довжину близько 84 км, обслуговується Львівською дистанцією колії та забезпечує вихід до Польщі. Для обслуговування поїздів використовуються електровози ЧС7 у пасажирському русі та ВЛ11у у вантажному. Маса вантажного поїзда у прямому та зворотному напрямках відповідно 5000/4500 тонн, пасажирського – 800 тонн. Довжина приймально-відправних колій 850 м, система СЦБ – автоблокування.

Для визначення наявної пропускної спроможності для електричної тяги, локомотив ВЛ11м були виконані тягові розрахунки за сертифікованою програмою «MoveRW». Як вихідні дані задавалися параметри поздовжнього профілю та плану лінії, обмеження в кривих, на роздільних пунктах та інших бар'єрних місцях, а також дані про рухомий склад.

При перебудові двоколійної ділянки на дві одноколійні з різною шириною колії максимальна пропускна спроможність залізниці визначається в залежності від типу графіка руху: непакетний або частково-пакетний (табл. 2.2).

Період паралельного графіка розраховується за формулою

$$T_{нар} = t_{нар} + t_{нен} + \tau_1 + \tau_2 + t_{рг} \quad (2.13)$$

де $t_{нар} + t_{нен}$ – час руху поїзда в парному й непарному напрямках, хв.;

$\tau_1 + \tau_2$ – час на виконання станційних операцій;

$t_{рг}$ – час на розгін і гальмування поїзда, приймається 2-4 хв.

Пропускна спроможність одноколієних перегонів парного частково-пакетного графіка (при двох поїздах у пакеті) і коефіцієнті паке-тності, що визначає відношення кількості поїздів, що прямують паке-тами, до загальної кількості поїздів (прийнято 50%) розраховується за формулою (2.10), а період графіка – за формулою (2.14)

$$T_{ч-пак} = 1,5T_{пар} + I \quad (2.14)$$

де I – інтервал між поїздами в пакеті; прийнято однаковим в пар-ному й непарному напрямках; $I = 8 - 10$ хв.

Таблиця 2.2

Максимальна пропускна спроможність одноколієної ділянки

| Реконструктивний захід | Формула для визначення n_{max} |
|---|---|
| Паралельний графік на одноколієній залізниці | $n_{пар} = \frac{(1440-t_{тех})\alpha_n}{T_{пар}} \quad (2.9)$ |
| Частково-пакетний графік на одноко-лієній залізниці | $n_{чпг} = \frac{(1440-t_{тех})\alpha_n k_{пак}}{T_{чпг}} \quad (2.10)$ |

Результати розрахунків для одноколієної залізниці при паралель-ному графіку наведено в табл. 2.3 і для обох графіків: паралельний (ПАГ) і частково-пакетному графіку (ЧПГ) представлено на рис. 2.27.

З аналізу даних табл. 2.2 і рис. 2.27 випливає, що пропускна спро-можність одноколієних ділянок складає 40-42 пари поїздів на добу, що в 3-4 рази менше, ніж могла забезпечити двоколієна ділянка Львів – Мостиська.

Виникає питання, чи прийнятне рішення щодо перебудови двоко-лієної ділянки на дві одноколієні 1520 мм і 1435 мм і як на цьому на-прямку можна оволодіти прогностичними обсягами перевезень?

Отже, актуальним постало питання підвищення пропускної спро-можності львівського напрямку для забезпечення вантажоперевезень від «Сухого порту» до країн Європи.

У 2017 році Укрзалізниця анонсувала створення «Сухого порту» на станції Скнилів і у 2018 було підписано меморандум про співпрацю з компанією DP World. DP World – світовий лідер у логістиці, один з найбільших світових операторів портів та логістичних комплексів. У

2019 році розроблено техніко-економічне обґрунтування проєкту, а у 2020 році проєкт затверджено наглядовою радою Укрзалізниці. Проєкт передбачає будівництво термінального комплексу з складами, перевантажувальними майданчиками, офісними приміщеннями та іншою інфраструктурою. Площа «Сухого порту» становитиме 35 га. Пропускна спроможність – до 1 млн контейнерів на рік. За даними DP World, середня маса контейнера становить приблизно 7 тонн. Отже, «Сухий порт» може забезпечити перевезення до 7 млн тонн вантажів на рік (песимістичний прогноз).

Таблиця 2.3

Наявна пропускна спроможність (локомотив ВЛ11у, 4000 т)

| № | Найменування перегону | Довжина перегону, км | Час ходу, хв | | Пропускна спроможність, пар поїздів на добу |
|----|---------------------------|----------------------|--------------|----------|---|
| | | | парний | непарний | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 1 | Львів – Рудно | 5.50 | 6.7 | 7.5 | 51 |
| 2 | Рудно – Мшана | 10.80 | 9.8 | 10.6 | 40 |
| 3 | Мшана – Затока | 7.30 | 7.6 | 8.3 | 47 |
| 4 | Затока – Городок | 9.13 | 8.5 | 9.5 | 44 |
| 5 | Городок – Родатичи | 9.35 | 9.0 | 10.3 | 42 |
| 6 | Родатичи – Судова Вишня | 9.27 | 8.7 | 9.5 | 44 |
| 7 | Судова Вишня – Хоросниця | 8.86 | 8.6 | 9.4 | 44 |
| 8 | Хоросниця – Мостиська-1 | 10.40 | 9.5 | 9.9 | 42 |
| 9 | Мостиська-1 – Мостиська-2 | 7.58 | 9.3 | 8.1 | 45 |
| 10 | Мостиська-2 – Держжордон | 5.54 | 6.0 | 7.7 | 52 |

Окрім контейнерів, «Сухий порт» може перевозити насипні вантажі (зерно, руда, вугілля), генеральні вантажі (машини, обладнання, продукти харчування), небезпечні вантажі (хімічні речовини, нафтопродукти). «Сухий порт» може бути частиною мультимодальних перевезень – залізничне й автомобільне, залізничне й морське тощо.

Очікується, що торгівля з Європою буде зростати, що призведе до збільшення попиту на перевезення (оптимістичний прогноз). Модернізація залізничної інфраструктури в Україні та Європі дозволить збільшити пропускну спроможність та зробити перевезення більш ефективними.

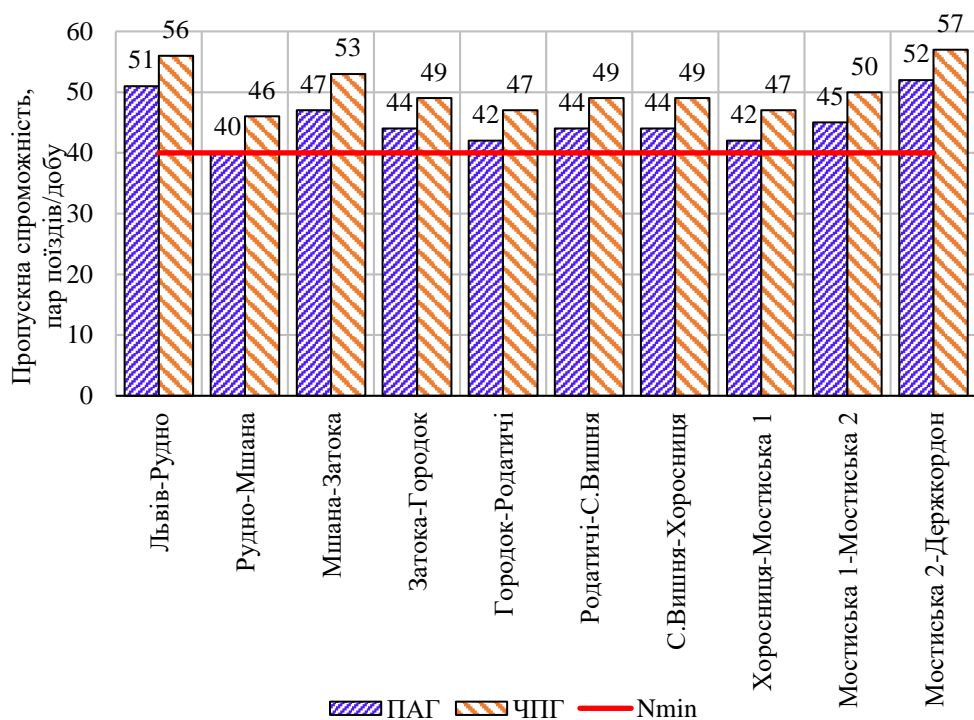


Рис. 2.27. Поперегінна пропускна спроможність: ПАГ – паралельний непакетний графік; ЧПГ – частково-пакетний графік; Nmin – мінімально допустима пропускна спроможність

Окрім контейнерів, «Сухий порт» може перевозити насипні вантажі (зерно, руда, вугілля), генеральні вантажі (машини, обладнання, продукти харчування), небезпечні вантажі (хімічні речовини, нафтопродукти). «Сухий порт» може бути частиною мультимодальних перевезень – залізничне й автомобільне, залізничне й морське тощо.

Очікується, що торгівля з Європою буде зростати, що призведе до збільшення попиту на перевезення (оптимістичний прогноз). Модернізація залізничної інфраструктури в Україні та Європі дозволить збільшити пропускну спроможність та зробити перевезення більш ефективними.

Фактори, які можуть впливати на додаткові перевезення: економічна ситуація в країні та в світі, політична ситуація, вартість перевезень, конкуренція з іншими маршрутами.

Маршрути транспортування залізничним транспортом від портів будуть залежати від ряду факторів:

– місце знаходження порту. Чорноморські порти мають з'єднання з центральними та західними регіонами України, а також з країнами Європи;

– вид та характеристики вантажу: різні види вантажів можуть перевозитися різними маршрутами;

– бюджет: вартість перевезення буде залежати від відстані, типу вагону та інших факторів;

– час доставки: час у дорозі буде залежати від маршруту, типу поїзда та інших факторів.

Ось деякі з можливих маршрутів транспортування залізничним транспортом до Львова (Скнилів) від портів Чорноморськ, Южний, Азовські порти (після визволення України від окупації) та Дунайські порти.

«Сухий порт» у Скнилові буде пов'язаний залізничною лінією з портом у Чорноморську.

Порт знаходиться на перетині важливих транспортних артерій, що сполучають Східну та Центральну Європу, Азію та Європу, Південь та Північ та ведуть через Індійський океан, Атлантику та Середземне море. Завдяки порту, Україною налагоджено міжнародні зв'язки із понад сотнею світових країн. Чорноморський порт знаходиться у 22 кілометрах на південний захід від Одеси на берегах Сухого лиману і входить до числа найбільших в Україні

Відстань від порту Чорноморський до ст. Скнилів становить близько 1000 км. Маршрут руху залізничного транспорту від порту Чорноморський до ст. Скнилів є прямим, проходить через такі міста як Чорноморськ, Одеса, Жмеринка, Львів, Мостиська. Тривалість поїздки становить близько 24 годин.

Таким чином, «Сухий порт» у Скнилові можна розглядати як логістичний термінал, який розташований всередині країни, але безпосередньо пов'язаний з морським портом. Ось як це може працювати на практиці:

1. Морське судно прибуває в порт у Чорноморську.
2. Вантажі з морського судна перевантажуються в залізничні вагони.

3. Сформований вантажний поїзд прямує до «Сухого порту» близько ст. Львів.

4. Вантажі з залізничних вагонів перевантажуються на інші залізничні вагони або вантажні автомобілі.

5. Вантажі доставляються до споживачів на Заході України.

Цей процес дозволяє уникнути витрат на перевалки вантажів із судна на судно, що може призвести до суттєвого зниження витрат на транспортування вантажів.

Переваги будівництва «Сухого порту» у Скнилові:

- зменшення витрат на транспортування вантажів.
- підвищення ефективності логістичних процесів.
- створення нових робочих місць.

«Сухий порт» у Скнилові може стати важливим логістичним хабом для Заходу України і сприяти її економічному розвитку.

Проведений аналіз основ визначення пропускної спроможності залізничної інфраструктури в межах ринково-орієнтованого підходу підтверджує недосконалість існуючих методів розрахунку пропускної спроможності на залізницях України. Необхідність знання величини пропускної спроможності більш наближеної до реальних експлуатаційних умов роботи вимагає введення додаткового поняття – практична пропускна спроможність. За таких умов потребують розвитку дослідження щодо методів розрахунку практичної пропускної спроможності, які дозволять врахувати експлуатаційну надійність системи перевезень [63].

Важливо зазначити, що остаточний перелік додаткових перевезень буде залежати від попиту на перевезення. Оскільки на сьогодні прогноз перевезень скласти практично неможливо, то в роботі зроблена спроба розглянути різці сценарії щодо перспективних обсягів перевезень, табл. 2.4.

Таблиця 2.4

Прогноз обсягів перевезень, млн тонн/рік, за формулою: $G_t = G_0 + \Delta G t^n$

| Сценарій | Початкове значення G_0 | Приріст ΔG_t | Показник n |
|---------------|--------------------------|----------------------|--------------|
| Песимістичний | 8 | 1.0 | 0.8 |
| Реалістичний | 15 | 1.0 | 1.0 |
| Оптимістичний | 22 | 1.0 | 1.2 |

Відповідно до формули $G_t = G_0 + \Delta G t^n$ був розрахований на кожний рік вантажопотік G_t і визначені кількість вантажних поїздів (формула (2.2) і провізна спроможність залізничної лінії, млн т/рік (формула 2.3). Коефіцієнти зйому та інші необхідні показники були прийняті відповідно до [65].

2.5.3. Аналіз результатів дослідження

За результатами тягових розрахунків встановлено, що перегони неідентичні за часом руху (див. табл. 2.3), а тому пропускна спроможність при непакетному паралельному графіку коливається від 40 до 52 пар поїздів/добу. За результатами розрахунків (формули 2.1-2.3) побудований графік оволодіння перевезеннями (рис. 2.28)

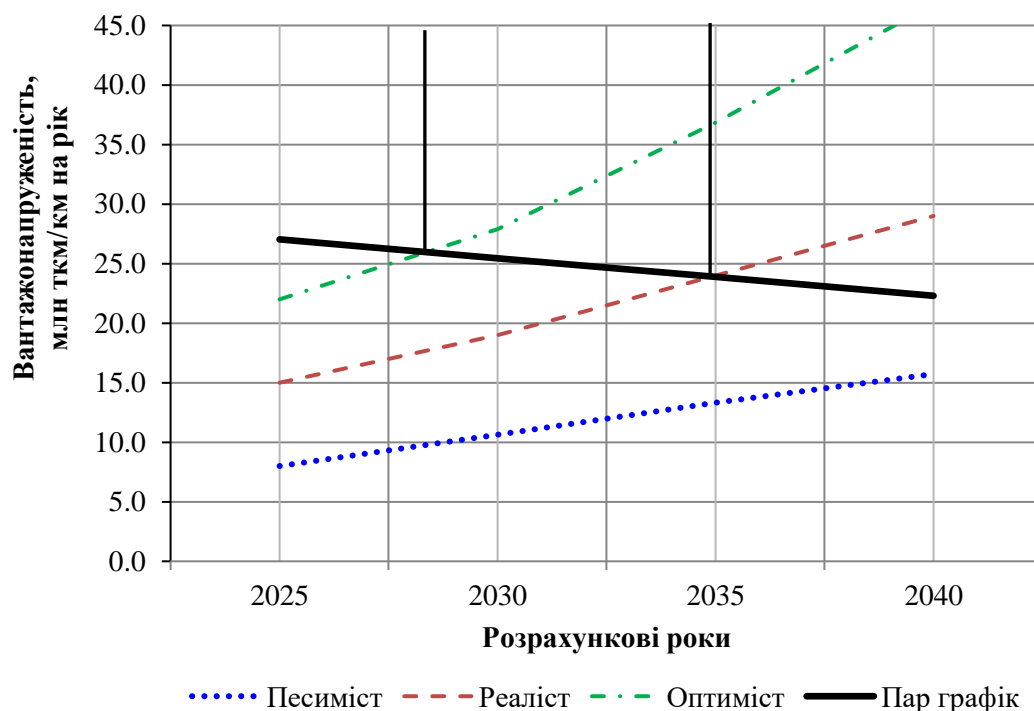


Рис. 2.28. Оволодіння перевезеннями (паралельний графік руху поїздів)

З графіка (рис. 2.28) випливає, що при песимістичному прогнозі однокільні залізниці на напрямку Львів (Скнилів) – Мостиська забезпечують потрібні обсяги перевезень 15 млн тонн на 2040 рік. При реалістичному прогнозі забезпечуються перевезення до 2035 року, при оптимістичному прогнозі – до 2027 року.

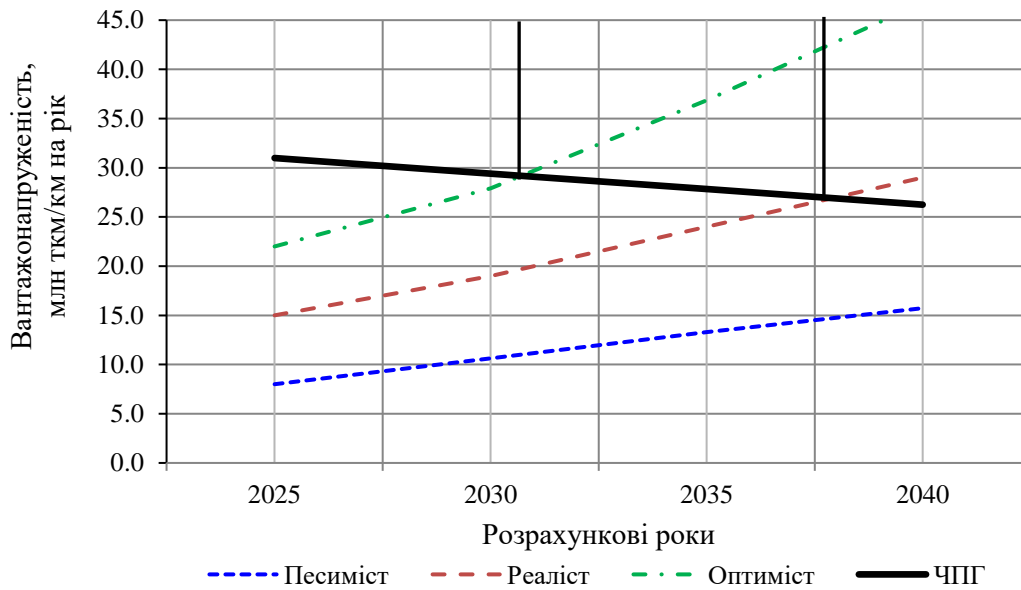


Рис. 2.29. Оволодіння перевезеннями (частково-пакетний графік)

У випадку прогнозних обсягів за оптимістичним чи реалістичним сценаріями можна запропонувати організацію перевезень за частково-пакетним графіком (рис. 2.29)

При такій організації перевезень будуть забезпечені потрібні обсяги перевезень при реалістичному прогнозі до 2038 року, при оптимістичному прогнозі – до 2031 року.

2.6. Підвищення ефективності роботи залізниць зі спеціалізацією напрямків вантажних і пасажирських перевезень

2.6.1. Огляд наукових праць з питань розподілу вантажних і пасажирських перевезень на мережі залізниць

Необхідність вирішення достатньо складної проблеми розподілу на мережі залізниць напрямків з переважно вантажним і переважно пасажирським рухом та підвищення пропускної спроможності є актуальною проблемою. Вітчизняні й закордонні дослідження показують, що при суміщеному русі поїздів порівняно з напрямками, спеціалізова-

ними для перевезень вантажів та пасажирів, різко знижується пропускна спроможність і надійність виконання графіка руху та в 1.5 – 2 рази збільшуються витрати на ремонт і утримання залізничної колії. Унаслідок цього на практиці часто застосовують передачу транзитного вантажопотоку на паралельні ходи. Як результат виникає необхідність у реконструкції таких напрямків для освоєння вантажопотоку, що передається. Актуальність дослідження визначається також зміною умов роботи залізниць у разі впровадження євроколії, що вимагає посилення існуючих залізничних ліній у випадку недостатніх резервів.

Аналіз сучасних публікацій показує, що дослідження з вибору пріоритетних напрямків міжнародних перевезень включають широкий спектр питань, основні з них такі:

- обґрунтування логістичних схем перевезень, прискорення термінів доставки вантажів;
- підвищення швидкості руху й пропускної спроможності;
- скорочення експлуатаційних витрат на поточне утримання інфраструктури;
- дослідження взаємодії рухомого складу й колії при зміні умов експлуатації.

Суміщений рух поїздів на одних і тих же коліях прямо або опосередковано впливає на проектування, будівництво, експлуатацію та технічне обслуговування залізничної системи. У цьому контексті в статті [81] якісно і кількісно оцінюється вплив деяких з перерахованих характеристик на компоненти залізничної системи і наводяться елементи витрат на будівництво залізничної інфраструктури з урахуванням різних сценаріїв експлуатації.

Вибір оптимального транспортного рішення включає обґрунтування найбільш вигідних маршрутів, вибір рухомого складу відповідно до виду вантажів, режиму перевезення вантажів, технологію роботи прикордонних станцій тощо [34, 35].

В роботі [36] представлено моделі прийняття рішень щодо оцінки ефективності транспортної системи Європа-Азія, а в роботі [82] запропонована модель розподілу транзитних вантажів на залізничній мережі.

У статті [30] представлені теоретичні основи й емпіричні результати аналізу і моделювання транспортних мереж Польщі. Описано властивості складних мереж (Scale Free і Small World) і характерні для мережі характеристики.

В роботах [37, 83] розглянуто застосування імітаційної моделі транспортної системи Польщі як інструменту сталого розвитку транспорту і обґрунтовано науково-технічне використання залізничного транспорту у міжнародних перевезеннях.

Методи дослідження та рішення поточних транспортних проблем розглядалися на Міжнародній науковій конференції Транспорт 21 століття, 9 – 12 червня 2019 р., Рин, Польща [38].

Більшість європейських країн успішно вирішують проблему національних пасажиропотоків на основі істотного збільшення швидкості руху поїздів на спеціально побудованих лініях.

У статті [84] розглянуто вплив наявних обмежень швидкості руху поїздів на величину додаткової енергії на тягу поїздів. На прикладі лінії Будапешт – Келенфельд – Хедьешхалом показано ефективність усунення обмежень швидкості на колії.

Еволюція високоякісних експрес-пасажирських поїздів у Польщі викладена в роботі [85], а в роботі [86] досліджено режим руху комбінованих різношвидкісних вантажних поїздів з розподілом пасажирського і вантажного транспорту.

При вирішенні завдань щодо підвищення пропускної й провізної спроможності залізниці розглядається як цілісна система, що складається з пристроїв та конструкцій, які через недосконалий технічний стан можуть обмежувати швидкість руху поїздів на тій чи іншій ділянці. Тому виникає необхідність по кожному бар'єрному місцю на залізниці знати швидкість руху поїздів, що допускається, а також параметри пристроїв, під які необхідно перевлаштувати залізницю, щоб реалізувати ці швидкості [87].

Для відправлень вантажів на відстань 500-1500 км найбільш ефективними є залізничні перевезення через більш дешеві транспортні витрати і більш швидкі терміни доставки. Тому поточна логістична проблема полягає в тому, як оптимізувати використання залізниць. Наприклад, в Індонезії залізнична інфраструктура використовується тільки на 56 % від загальної пропускної спроможності [88].

В роботі [89] відмічається, що у британській залізничній мережі за останні 20 років спостерігалось значне зростання вантажних і пасажирських перевезень, що викликає побоювання з приводу її спроможності абсорбувати тривале зростання. Був реалізований ряд інфраструктурних ініціатив, спрямованих на збільшення пропускної спромож-

ності і зменшення конфліктів. Досліджено вплив на експлуатаційні характеристики вантажних поїздів нової залізничної інфраструктури для розподілу пасажирських і вантажних перевезень.

На залізницях Північної Америки [43, 90] спостерігається стрімке зростання попиту на перевезення, і для їх задоволення все частіше потрібне збільшення пропускної спроможності. Неоднорідність в поєднанні характеристик різних типів поїздів призводить до більших затримок, ніж при однорідному русі. Аналіз, наведений в роботі, включав вплив на затримку різних транспортних засобів і характеристик поїздів. Розроблена авторами програма моделювання диспетчеризації використовувалася для аналізу моделі одноколіїної залізниці з характеристиками, типовими для залізниць Північної Америки. Мета полягала в тому, щоб визначити вплив різних операційних і інфраструктурних змін на скорочення затримок поїздів. Для кожного сценарію скорочення затримок вважалось перевагою проекту, в той час як будь-яке збільшення затримок призводить до необхідності задіяти додаткові локомотиви, а також до додаткової витрати палива, збільшеним витратам на утримання інфраструктури.

Північноамериканські залізниці відчують зростання попиту на перевезення і все частіше потребують збільшення пропускної спроможності своїх ліній, що потребує зміни режиму експлуатаційної роботи та модернізації інфраструктури. В роботі [91] показано, що розширення інфраструктури вимагає тривалого часу і капіталомістких операцій, а в якості альтернативи пропонується досягнути додаткової потужності шляхом зміни режиму експлуатаційної роботи, що часто дешевше і швидше в реалізації.

Реалізація масштабних інвестиційних проєктів (нове будівництво, реконструкція залізниць), які передбачають високі інвестиційні витрати та необхідність врахування великої кількості факторів, вимагає використання відповідних методів оцінки ефективності. Основою для оцінки ефективності проєкту є такі принципи: розгляд варіанту (проєкту) протягом всього розрахункового періоду, позитив і максимальний ефект, врахування фактору часу, вплив інфляції, невизначеності, ризику тощо. Попередня оцінка ґрунтується на методах [42, 92, 93].

Багаторічними дослідженнями встановлено, що найменші експлуатаційні витрати з утримання залізничної колії будуть забезпечені при відповідному співвідношенні інтенсивності навантаження колії, рівня

динамічного навантаження на колію від рухомого складу та потужності залізничної колії.

Цей принцип використано в нормативних документах Укрзалізниці. Так, наприклад, категорія залізничної колії встановлюється в залежності від вантажнапруженості та від встановленої максимальної швидкості поїздів [72]. В роботах [94, 95] також інтенсивність навантаження колії визначається вантажнапруженістю, а рівень динамічного навантаження на колію від рухомого складу – встановленою швидкістю поїздів.

Федеральна залізнична адміністрація (FRA) Сполучених Штатів Америки розробила систему класифікації якості залізничних колій. Клас ділянки колії визначає максимально можливі обмеження швидкості руху та можливість руху пасажирських поїздів. Так, найбільші максимальні швидкості в Північній Америці реалізуються на північно-східному коридорі Амтрака, де швидкість 150 миль/год (241 км/год) дозволена на двох коротких ділянках колії FRA класу 8. Одночасна експлуатація вантажних та пасажирських поїздів заборонена на коліях FRA 8 та 9, де встановлені максимальні швидкості 160 і 200 миль/год (відповідно 258 і 322 км/год) [96]. В цій науковій праці надана оцінка витрат на утримання змішаних високошвидкісних пасажирських і вантажних залізничних коридорів. Відмічається, що експлуатація у змішаному русі (тобто з вантажними та приміськими поїздами) зазвичай відбувається значно нижче максимальної швидкості. Більшість залізниць – це колії класу 7 FRA (125 миль/год або 200 км/год), які пасажирські поїзди поділяють з вантажними та приміськими поїздами.

В роботі [97] представлено результати взаємодії залізничної колії та рухомого складу в умовах прискореного й швидкісного руху поїздів. В роботі [76] запропонована модель поведінки напружено-деформованого стану залізничної колії на основі спільного використання рівнянь поширення пружної хвилі для опису топографії частини системи, яка бере участь у взаємодії в даний момент часу, та рівнянь динамічної рівноваги її деформації. Це дає можливість врахувати динаміку при русі поїздів на великій швидкості.

2.6.2. Мета роботи і методика дослідження

Завдяки своєму географічному розташуванню та розвиненій транспортній інфраструктурі Україна має значний потенціал у розвитку

міжнародних перевезень, зокрема як країна-транзитер у логістичному ланцюгу торгівлі між Азією та Європою [98]. Перешкодою до переходу на інноваційний шлях розвитку в Україні стала класична форма організації руху, яка полягає у використанні інфраструктури в перевезенні як пасажирів, так і вантажів (суміщений рух). Недоліки організації такого руху – недостатній комфорт пасажирів та неможливість застосування нового прогресивного рухомого складу. Можливим варіантом вирішення цієї проблеми є відокремлення вантажного руху від пасажирського.

Проблеми експлуатаційного і технічного характеру, що виникають при сумісному русі, пов'язані перш за все з розладами верхньої будови колії. При переключенні поїздопотоків на паралельні ходи, змінюється інтенсивність руху вантажних і пасажирських поїздів та інші експлуатаційні показники, що впливають на напружено-деформований стан колії, а отже на витрати, пов'язані з ремонтом і утриманням колії.

При відокремленні вантажних і пасажирських перевезень (навіть частково) на пасажирських і вантажних напрямках значно скорочується кількість обгонів поїздів, що призводить до зменшення експлуатаційних витрат, пов'язаних з гальмуванням, зупинками і розгоном поїздів.

Перші кроки в цьому напрямку зроблені й в Україні: розроблена програма, відповідно до якої вантажопотоки повинні рівномірно розподілятися по всім напрямкам, а не зосереджуватися на найбільш вантажонапружених залізничних лініях, наприклад, таких, як Київ – Дніпро. З цією метою приводяться в належний стан другорядні, поки що мало задіяні ходи, на які можна буде переключати вантажопотоки. Одночасно виникає ряд проблем експлуатаційного і технічного характеру, зв'язаних із співвідношенням швидкостей вантажних і пасажирських поїздів, зменшенням провізної спроможності залізниць.

З метою забезпечення мінімуму показника: пробігу (поїздо-км), часу руху (поїздо-год), енергоємності (механічної роботи локомотивів, ткм, чи витрат електроенергії, кВт-год), інших техніко-економічних показників розроблена математичних моделей раціонального розподілу вантажо- і пасажиропотоків на основі векторної оптимізації.

Для вирішення задачі оптимального розподілу поїздопотоків між початковим і кінцевим пунктами, мережа залізниць була представлена у вигляді графа $G(V, E)$, де станції – це вершини графа (множина V), а ділянки між ними – ребра графа (множина E). Потік поїздів задається

у вигляді матриці P_{ij} , $i, j = \overline{1, n}$, де n – кількість станцій, а P_{ij} – кількість поїздів з пункту i в пункт j [99].

Враховуючи те, що від однієї станції до іншої можна потрапити різними шляхами, відповідно до графа між пунктами i й j існує W_{ij} простих шляхів. Кожне ребро $e \in E$ буде характеризуватися трьома параметрами:

$d(e)$ – довжина ребра e ;

$t(e)$ – час руху поїзда по ребру e ;

$m(e)$ – механічна робота при русі поїзда по ребру e .

Позначимо через $X_{i,j,w}$ кількість поїздів, що рухаються із пункту i в пункт j по w -му простому шляху з переліку W_{ij} .

Тоді

$$P_r = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \sum_{w \in W_{ij}} P(w) X_{i,j,w} \rightarrow \min \quad (2.15)$$

де $P(w)$ – сумарне значення показника простого шляху w з переліку W_{ij} .

Мінімальне значення P_r визначаємо з урахуванням поїздопотоків, тобто

$$\sum_{w \in W_{ij}} X_{i,j,w} = P_{ij}; \quad i = \overline{1, n-1}; \quad i+1 \leq j \leq n \quad (2.16)$$

До даних обмежень додається обмеження за пропускною спроможністю кожного ребра:

$$\sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \sum_{w \in W_{ij}} I_w(e) X_{i,j,w} \leq N(e); \quad e \in E, \quad (2.17)$$

де $I_w(e)$ – індикатор ребра e для шляху w ,

$$\begin{cases} I_w(e) = 1, & e \in w; \\ I_w(e) = 0, & e \notin w, \end{cases} \quad (2.18)$$

$N(e)$ – пропускна спроможність ребра e .

Можна розглядати різні показники оптимізації: поїздо-кілометри (P_1), поїздо-години (P_2), механічну роботу локомотива (P_3). Так, поїздо-кілометри і тонно-кілометри (брутто) відображають технічну і ва-

нтажну роботу залізниць, поїздо-години – середню швидкість руху поїздів, а механічна робота локомотива – витрати електроенергії чи дизельного палива.

Для прикладу на рис. 2.30 наведено результати оптимізації за різними показниками.



Рис. 2.30 Розподілення поїздів між пунктами Київ – Львів за різними показниками оптимізації

Остаточне рішення слід приймати з урахуванням експлуатаційних витрат на пропуск вантажних і пасажирських поїздів, капітальних вкладень на підсилення паралельних ходів і наявної можливості інвестування проєктів.

Тому подальше удосконалення перевізного процесу буде ефективно при одночасній спеціалізації залізничних напрямків.

2.6.3. Моделювання руху потоку поїздів

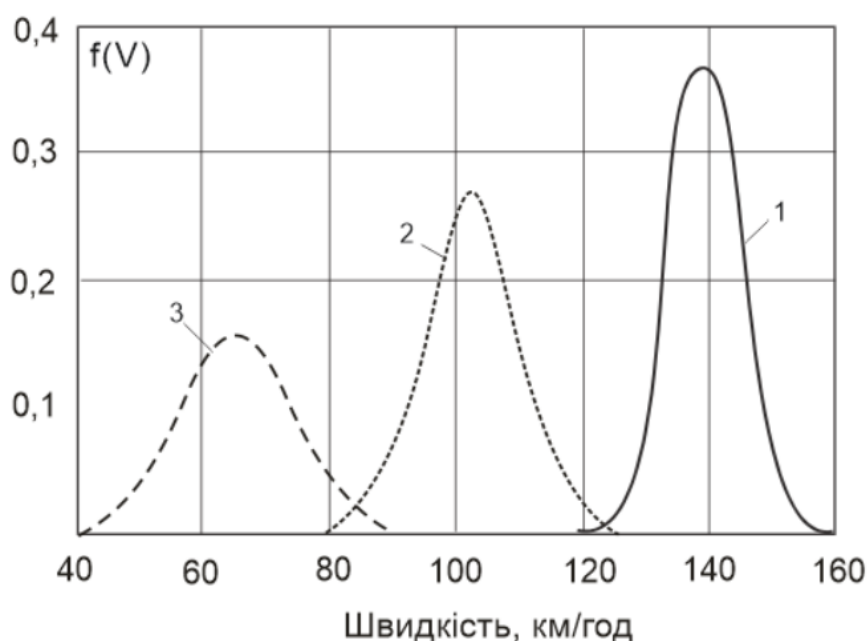
Запропонований авторами підхід оснований на ймовірному моделюванні руху потоку поїздів. Потік поїздів N_i подається у вигляді тривимірної поверхні, що є апроксимуючою для реального розподілу мас Q_i і швидкостей руху поїздів V_i .

Аналіз статистичних даних показав, що розподіл швидкостей руху в одному перетині колії для всіх поїздів даного типу наближається до

нормального закону. При оцінці відхилень емпіричного розподілу від нормального за критеріями згоди встановлено, що в більшості вибірок ці відхилення незначимі, і в подальших розрахунках можна використовувати теоретичні криві розподілу фактично реалізованих швидкостей. Фрагмент такого розподілу для пасажирських, приміських і вантажних поїздів наведено в на рис. 2.31.

При моделюванні потоку поїздів середньоквадратичне відхилення можна приймати приблизно таким, як до реконструкції залізниці за результатами статистичної обробки швидкісних стрічок. Розрахунки показують, що в більшості випадків величина середньоквадратичного відхилення складає $\sigma_v=5-20$ км/год.

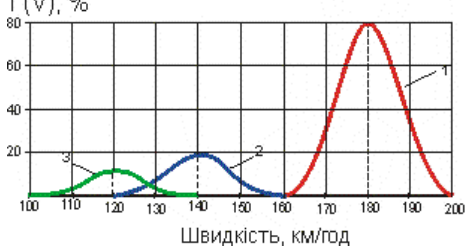
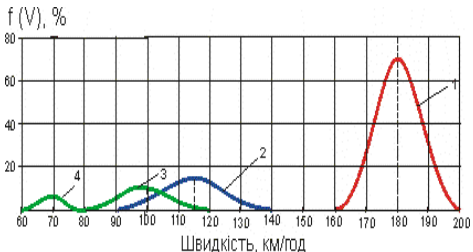
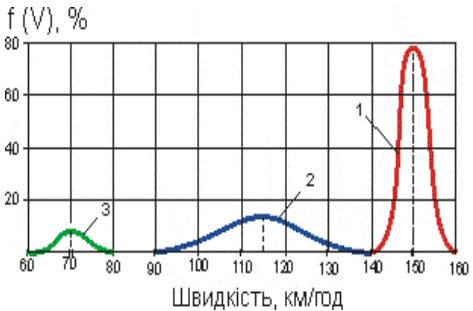
При розділенні вантажного й пасажирського руху напрямки будуть встановлюватися залежно від структури поїздопотоків: категорій і маси поїздів, що обертаються, та швидкостей руху (табл. 2.5).

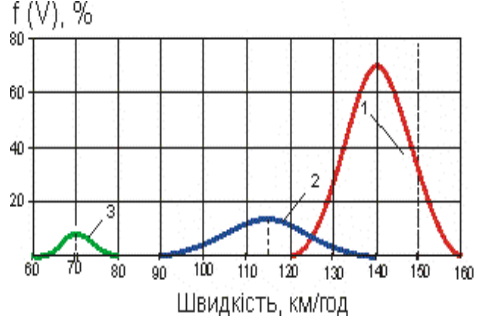
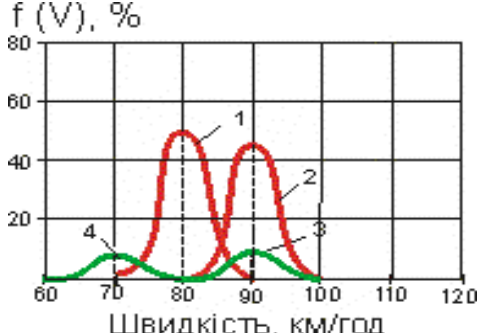


1 – пасажирські, 2 – приміські, 3 – вантажні

Рис. 2.31. Варіанти розподілу прогнозованої швидкості руху за нормальним законом для різних категорій поїздів

Класифікація напрямків за категоріями поїздів

| Характеристика напрямку | Максимальна швидкість, км/год | Графіки розподілу швидкостей руху поїздів |
|---|---|--|
| 1 | 2 | 3 |
| <p>Швидкісний пасажирський рух:</p> <p>1 – денні експреси</p> <p>2 – пасажирські прискорені поїзди</p> <p>3 – приміські прискорені поїзди</p> | $161 < V_{\text{експрес}}^{\text{пас}} \leq 200$ $120 < V_{\text{приск}}^{\text{пас}} \leq 160$ $100 < V_{\text{приск}}^{\text{прим}} \leq 140$ |  |
| <p>Суміщений рух швидкісних пасажирських з вантажними збірними і приміськими поїздами:</p> <p>1 – денні експреси</p> <p>2 – пасажирські прискорені поїзди</p> <p>3 – приміські прискорені поїзди</p> <p>4 – збірні поїзди</p> | $160 < V_{\text{приск}}^{\text{шв}} \leq 200$ $V_{\text{приск}}^{\text{пас}} = 90-140$ $V_{\text{приск}}^{\text{прим}} = 80-120$ $V_{\text{збір}}^{\text{вант}} = 60-80$ |  |
| <p>Прискорений пасажирський рух поїздів суміщений з прискореним рухом приміських поїздів:</p> <p>1 – пасажирські прискорені;</p> <p>2 – приміські прискорені;</p> <p>3 – вантажні збірні поїзди</p> | $140 \leq V_{\text{приск}}^{\text{пас}} \leq 160$ $V_{\text{приск}}^{\text{прим}} = 90-140$ $V_{\text{збір}}^{\text{вант}} = 60-80$ |  |

| 1 | 2 | 3 |
|--|---|---|
| <p>Суміщений рух прискорених пасажирських з вантажними збірними і приміськими:</p> <p>1 – пасажирські прискорені поїзди;</p> <p>2 – приміські прискорені поїзди;</p> <p>3 – вантажні збірні поїзди</p> | $120 \leq V_{\text{приск}}^{\text{пас}} \leq 160$ $V_{\text{приск}}^{\text{прим}} = 90 - 140$ $V_{\text{збір}}^{\text{вант}} = 60 - 80$ |  |
| <p>Вантажний рух:</p> <p>1 – вантажні повновісні поїзди</p> <p>2 – вантажні повноскладові</p> <p>3 – приміські поїзди</p> <p>4 – вантажні збірні поїзди</p> | $70 \leq V_{\text{повноваг}}^{\text{вант}} \leq 90$ $80 \leq V_{\text{повноскл}}^{\text{вант}} \leq 100$ $V^{\text{прим}} \leq 100$ $V_{\text{збір}}^{\text{вант}} = 60 - 80$ |  |

На ділянках пасажирського й вантажного руху умови роботи колії покращуються за рахунок рівномірного навантаження обох рейкових ниток оскільки підвищення зовнішньої рейки в кривих встановлюється відповідно по швидкості пасажирських і вантажних поїздів, що приводить до зменшення зносу колії і рухомого складу. В статті [100] представлено результати аналізу вимірів параметрів рейкової колії і співвідношення величин вертикального й бічного зносу рейок в кривих різних радіусів при різних умовах експлуатації. Показано, що встановлені підвищення зовнішньої рейки не відповідають сучасним вимогам підвищення працездатності рейкової колії за умови мінімізації зносу рейок, а тому нагальною проблемою є розділення вантажного й пасажирського руху.

2.6.4. Передача вантажних поїздів на паралельний хід

При дослідженні паралельних ходів необхідно враховувати технічний стан обох залізничних напрямків. Так, наприклад, пасажирський хід може представляти собою одноколіїну ділянку або одноколіїну з двоколіїними вставками чи двоколіїну залізницю. При цьому вантажний (паралельний) хід також може знаходитись в одному з цих технічних станів. Тому виникає щонайменше дев'ять можливих сполучень.

Необхідно дослідити умови, за яких передача частини вантажних перевезень на рівнобіжний хід може бути ефективною. Аналіз показав, що при наявності паралельних напрямків, що мають дві головні колії, проблем з передачі поїздопотоків майже не існує. Значно складнішим є питання, коли один з напрямків є одноколіїним або ж з двоколіїними вставками. Нижче наведено результати розрахунків для паралельних напрямків, що представлені ділянками з двоколіїними вставками. Основою такого аналізу може бути прийнята Укрзалізницею Програма щодо збільшення пропускної спроможності ділянок з двоколіїними вставками Полтава – Кременчук – Бурти – Користівка – Долинська – Миколаїв за рахунок будівництва другої головної колії.

Було прийнято, що паралельний вантажний хід має такий же технічний стан, що й пасажирський, а потрібна вантажонапруженість змінюється за лінійним законом $\Gamma_t = \Gamma_0 + \Delta\Gamma_t \cdot t$. При цьому розглядалися три варіанти, коли на паралельному ході зростання вантажонапруженості відбувається з різними темпами, а саме $\Delta\Gamma_t = 2t, 3t$ і $3,5t$, при $\Gamma_0 = 5.0$ млн ткм/км.

З графіків оволодіння перевезеннями (рис. 2.32 і 2.33) встановлено, що при наявному технічному оснащенні і $\Gamma_t = 5,0 + 4,5 \cdot t$ залізнична лінія забезпечить перевезення до 6-го року експлуатації з наступним переходом до більш потужного технічного стану – будівництво другої колії.

У випадку переключення частини вантажопотоку $\Delta\Gamma_i$ на паралельний хід досягається віддалення капіталовкладень. Термін віддалення будівництва другої колії залежить перш за все від величини $\Delta\Gamma_i$. Так, наприклад, при передачі на паралельний хід 10 млн т/рік будівництво другої колії віддаляється до 9-го року експлуатації, при передачі 20 млн т/рік відстрочка будівництва можлива до 11-го року (рис. 2.32).

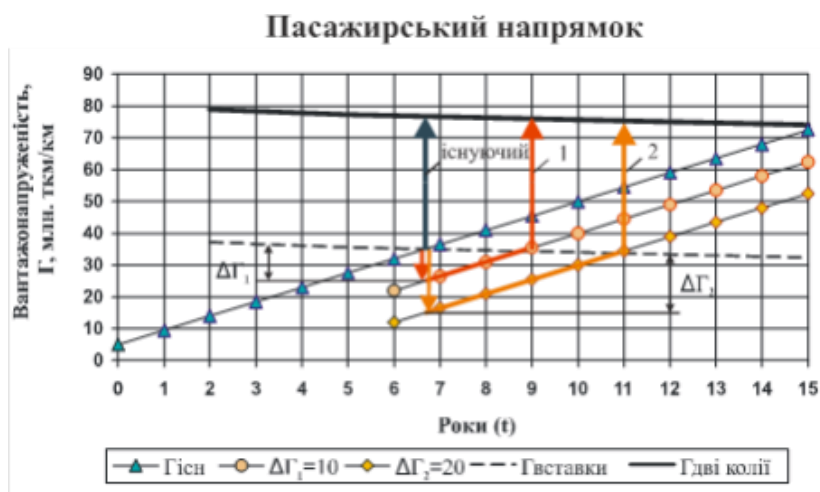


Рис. 2.32 Графік оволодіння перевезеннями на пасажирському напрямку при передачі 10 та 20 млн т/рік на паралельний хід

При зростанні вантажонапруженості за законом $G_t = 5,0 + 2,0 \cdot t$ (1-й варіант) паралельний хід може забезпечити потрібні обсяги перевезень до 13-го року. При передачі вантажопотоку в 6-й рік у об'ємі 10 млн т/рік підсилення лінії необхідно буде виконати вже у 9-й рік, при передачі 20 млн т/рік – лінія вже у рік передачі вантажопотоку повинна бути двоколійною (рис. 2.33).

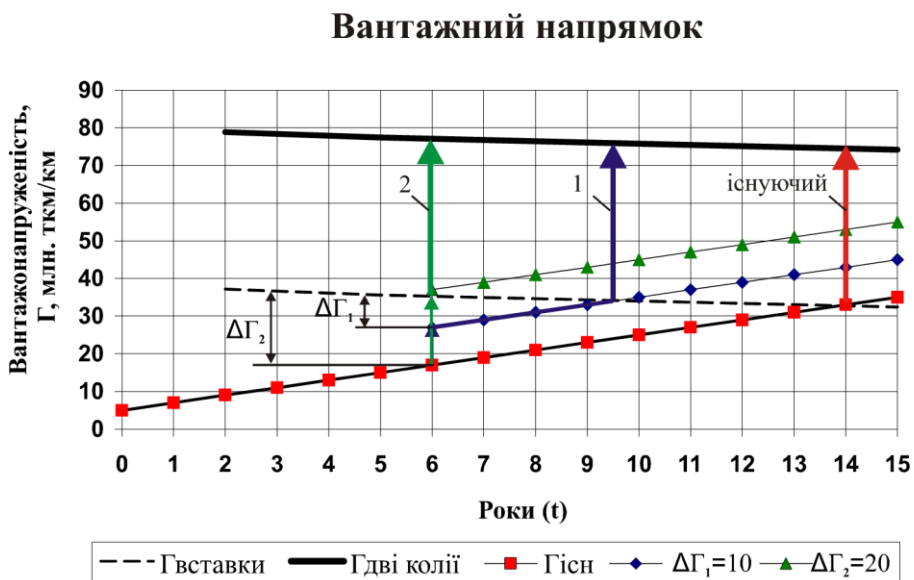


Рис. 2.33 Графік оволодіння перевезеннями на паралельному ході $G_t = 5,0 + 2 \cdot t$

При менших темпах зростання вантажонапруженості (2-й і 3-й варіанти) потужності паралельного ходу недостатньо, і тому вже в 6-й рік лінія потребує підсилення шляхом будівництва другої головної колії.

Висновки до розділу 2

На основі результатів вітчизняних та зарубіжних наукових розробок намічено шляхи вирішення проблеми, що стосується будівництва залізниць європейського стандарту на території України з урахуванням існуючої інфраструктури, геополітичних, топографічних та інших умов.

Запропоновано науковий підхід, що дозволяє оцінювати різні сценарії пропускної спроможності двох одноколійних ділянок з шириною колій 1520 мм (існуюча) і 1435 мм (перебудована), використовуючи методи графоаналітичного моделювання.

Аналіз технічного оснащення та параметрів траси основних напрямків міжнародних транспортних коридорів, які проходять територією України, показав, що без розмежування вантажного й пасажирського руху й перебудови плану лінії дотриматись європейських вимог, насамперед щодо максимальної швидкості руху, неможливо. Результати аналізу підтверджують актуальність проведеного дослідження.

Уточнена й деталізована класифікація напрямків залізниць за категоріями поїздів і структурою поїздопотоків. Запропоновано п'ять видів напрямків: суто пасажирський, переважно пасажирський, прискорений, суміщений і вантажний рух, що відповідає критеріям безпеки, плавності й комфортабельності їзди.

Проблеми експлуатаційного і технічного характеру, що виникають при сумісному русі, пов'язані перш за все з розладами верхньої будови колії. Так, при переключенні поїздопотоків на паралельні ходи, змінюється інтенсивність руху вантажних і пасажирських поїздів та інші експлуатаційні параметри, що впливають на напружено-деформований стан колії, а отже на витрати, пов'язані з ремонтом і утриманням колії.

При розмежуванні вантажного й пасажирського руху слід визначати сумарний ефект по кожному напрямку окремо. На ділянках пасажирського й вантажного руху умови роботи колії покращуються за рахунок рівномірного навантаження обох рейкових ниток остаточно підвищення зовнішньої рейки в кривих встановлюється відповідно по

швидкості пасажирських і вантажних поїздів, що приводить до зменшення зносу колії і рухомого складу.

На пасажирських і вантажних напрямках значно скорочується кількість обгонів поїздів, що призводить до зменшення експлуатаційних витрат, пов'язаних з гальмуванням, зупинками і розгоном поїздів, що дозволяє отримувати додатковий прибуток за рахунок зменшення розладу колії.

Запропонований підхід дозволяє враховувати можливість переключення частки поїздів на паралельні ходи і оцінити прибуток за рахунок розмежування вантажного й пасажирського руху. Математична модель сумісного формування схеми етапного оволодіння перевезеннями для паралельних залізничних ліній дає можливість враховувати специфіку кожного з паралельних напрямів (пасажирський, вантажний, суміщений рух) і отримувати розв'язки задачі при мінімальних експлуатаційних витратах і раціональних інвестиціях, у тому числі на перебудову залізниці для підвищення швидкості пасажирських поїздів.

Міжнародний досвід та передумови проєктування високошвидкісних магістралей в Україні

3.1. Основні вимоги до високошвидкісних магістралей (HSR)

Високошвидкісна залізниця (HSR) – це тип залізничної транспортної мережі, що використовує поїзди, які рухаються значно швидше, ніж на традиційній залізниці, використовуючи інтегровану систему спеціалізованого рухомого складу та виділені колії. Хоча немає єдиного стандарту, який би застосовувався в усьому світі, лінії, побудовані для роботи зі швидкостями понад 250 км/год (155 миль/год), або модернізовані лінії понад 200 км/год (125 миль/год) вважаються високошвидкісними [101].

Міжнародний союз залізниць (UIC) визначає три категорії високошвидкісних залізниць [101]:

I категорія: нові залізниці, спеціально збудовані для високих швидкостей, що дозволяють розвивати максимальну швидкість щонайменше 250 км/год (155 миль/год).

II категорія: існуючі траси, спеціально модернізовані для високих швидкостей, що дозволяють розвивати максимальну швидкість щонайменше 200 км/год (124 миль/год).

III категорія: існуючі колії, спеціально модернізовані для високих швидкостей, що дозволяють максимальну швидкість руху не менше 200 км/год, але на деяких ділянках дозволена швидкість нижча (наприклад, через топографічні обмеження або проїзд через міські райони).

UIC вважає за краще використовувати «визначення» (у множині), оскільки не існує ні єдиного стандартного визначення високошвидкісної залізниці, ні навіть стандартного використання термінів («висока швидкість» або «дуже висока швидкість»). Вони використовують європейську Директиву ЄС 96/48, в якій зазначено, що висока швидкість – це сукупність усіх елементів, які складають систему: інфраструктури, рухомого складу та умов експлуатації [102].

Міжнародний союз залізниць стверджує, що високошвидкісна залізниця – це набір унікальних особливостей, а не просто поїзд, який рухається з певною швидкістю. Багато поїздів звичайної тяги можуть розвивати швидкість 200 км/год (124 милі/год) у комерційному сполученні, але не вважаються високошвидкісними. Серед них французька SNCF Intercités і німецька DB IC.

Критерій 200 км/год (124 милі/год) вибрано з кількох причин: вище цієї швидкості вплив геометричних дефектів колії посилюється, зчеплення з коліями зменшується, аеродинамічний опір значно збільшується, коливання тиску в тунелях викликають дискомфорт пасажирів, і машиністам стає важко розпізнавати колійну сигналізацію [101].

Стандартне сигнальне обладнання часто обмежується швидкістю нижче 200 км/год (124 милі/год), з традиційними обмеженнями 127 км/год (79 миль/год) у США, 160 км/год (99 миль/год) у Німеччині та 125 миль/год (201 км/год) у Великобританії. Понад ці швидкості позитивний контроль руху поїздів або Європейська система контролю руху поїздів стає необхідною або юридично обов'язковою.

Відповідно до рішення 4-го Світового Форуму «EurailSpeed 2002» основним напрямком розвитку сучасного залізничного транспорту в Європі є збільшення швидкості перевезення пасажирів і вантажів. Країни Європейського Союзу планують створити систему високошвидкісного руху від Гельсінкі до Мадрида, Лондона до Варшави на базі єдиних технічних стандартів.

Основні вимоги до високошвидкісних магістралей:

- рівень максимальної швидкості 300-500 км/год;
- дотримання екологічних європейських стандартів;
- час перебування у дорозі трохи більше 3 годин;
- комфорт під час поїздки.

Проекти та плани будівництва ВШМ мають багато країн. Однак, кожна країна при виборі технічних засобів, все ж таки йде своїм шляхом, враховуючи свої можливості та місцеві умови.

Створення міжнародних мереж на базі потенціалів окремих країн призводить до необхідності встановлення таких експлуатаційно-технічних параметрів вітчизняних високошвидкісних магістралей, які мали б експлуатаційну сумісність з Транс'європейською мережею ВШМ.

В офіційній доповіді МСЗ на Конгресі в Пекіні в грудні 2010 року констатувалось, що високошвидкісний рух – це рух зі швидкістю 250 км/год і вище.

Сьогодні у світі введені в експлуатацію швидкісні магістралі, на яких поїзди розвивають швидкість до 350 км/год.

Важливо зазначити, що протяжність ВШМ постійно зростає як у Китаї, так і в Європі. Найінтенсивніше розвиваються високошвидкісні перевезення в Іспанії та Китаї. Загальна довжина ВШМ Китаю на кінець 2023 р. становила близько 45 тис. км (рис. 3.1), а полігон, де об'єднюються високошвидкісні поїзди у Європі з урахуванням реконструйованих залізниць, – близько 25 тис. км. Найбільшу довжину ВШМ в Європі мають Іспанія (3100 км), Франція (2947 км), Німеччина (1645 км), Італія (1037 км).

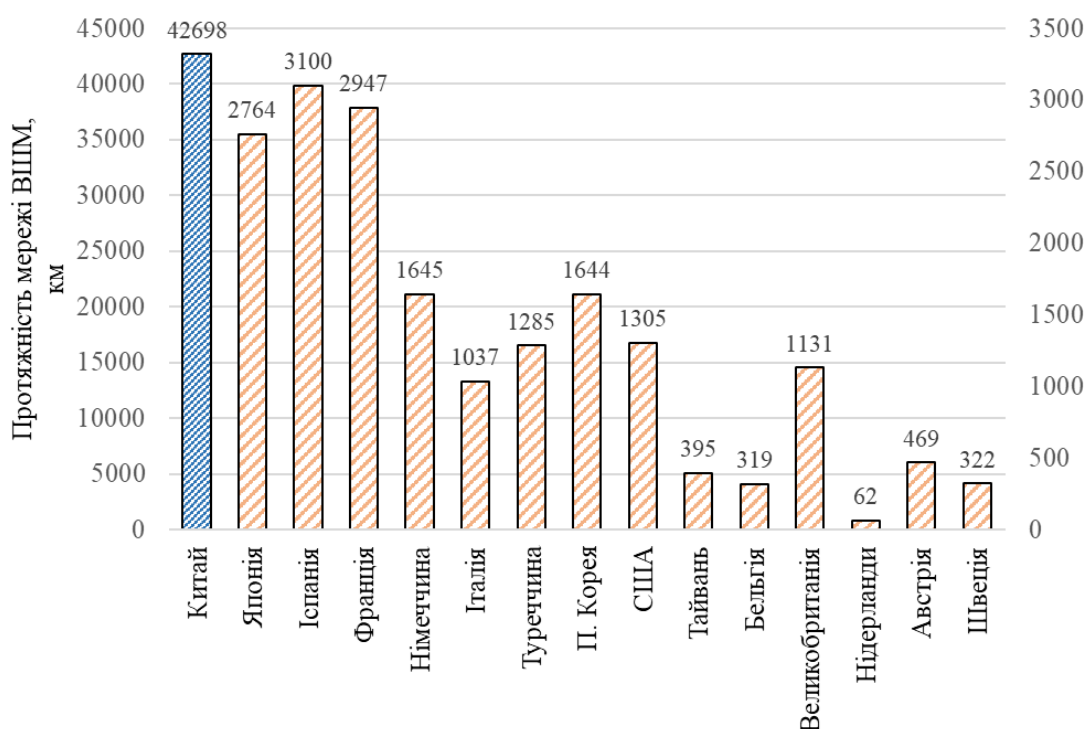


Рис. 3.1. Довжина високошвидкісних магістралей у світі (у Китаї близько 42698 км з урахуванням тих, що у стадії будівництва)

В Іспанії, Італії і Німеччині, а також у Південній Кореї, Великобританії, США, Китаї та інших країнах активно велися відповідні наукові дослідження, йшов пошук, відбір, перевірка практикою основних інженерно-технічних рішень, необхідних для спорудження ВШМ і виробництва високошвидкісного рухомого складу.

Стабільно реалізовані швидкості 250...300 км/год спонукали залізничні компанії і державні транспортні організації звернути увагу на

здатність залізниць в обґрунтованих межах конкурувати з авіаційним і автомобільним транспортом [103].

При низькій частці ВШМ у загальній довжині магістральних залізниць (Іспанія – 15.4 %, Китай – 27.5 %, Японія – 9.9 %, Франція – 9.6 %) обсяг виконуваної ними пасажирської роботи у багато разів перевищує загальний обсяг пасажирських перевезень, що свідчить про високу конкурентоспроможність і затребуваність цього виду транспорту (рис. 3.2).

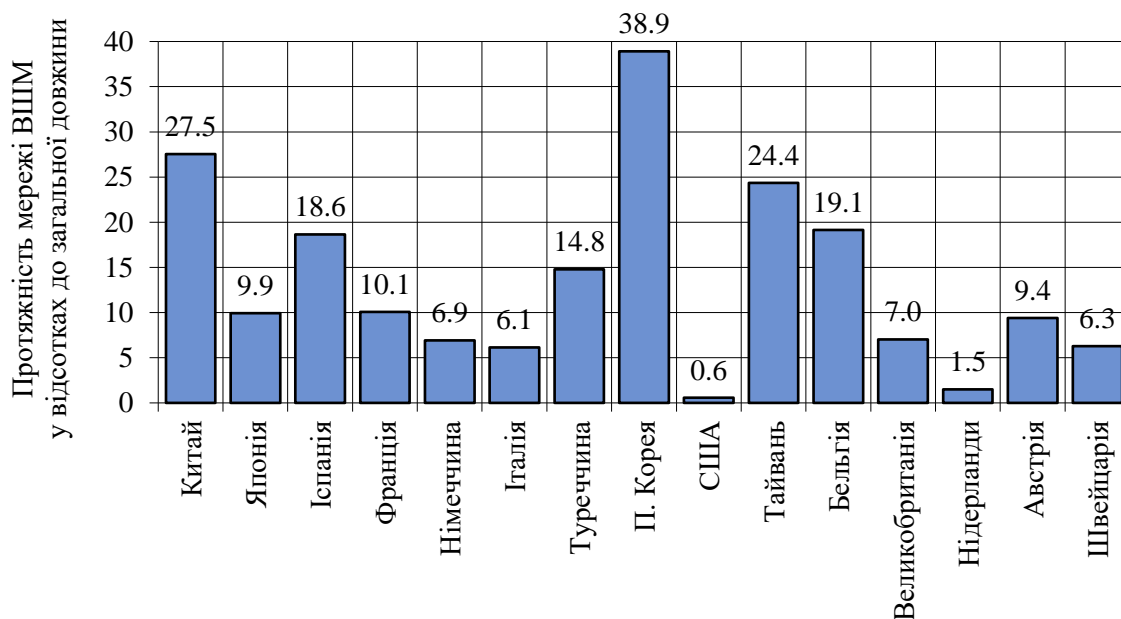


Рис. 3.2. Питома вага високошвидкісних магістралей

В табл. 3.1 наведено обсяги пасажирських перевезень високошвидкісними поїздами на 2019 рік. Включено лише країни з понад 5 мільйонами пасажирів на рік. На жаль, надання точних даних про кількість перевезених пасажирів та пасажиро-км високошвидкісними залізницями після 2019 року є досить складним завданням з кількох причин: пандемія COVID-19 суттєво вплинула на обсяги пасажирських перевезень у всьому світі; обмеження на подорожі, карантинні заходи та зміни в поведінці споживачів призвели до значного скорочення пасажиропотоку на високошвидкісних залізницях.

Високошвидкісні залізничні перевезення у світі у 2019 р.

| Країна/територія | Кількість пасажирів (мільйони) | Пасажиро-км (млрд) |
|------------------|-----------------------------------|--------------------|
| Китай | 2357,7 | 774,7 |
| Японія | 354.6 | 99.3 |
| Франція | 125.9 | 60,0 |
| Німеччина | 99.2 | 33.2 |
| Тайвань | 67.4 | 12.0 |
| Південна Корея | 66.1 | 16.0 |
| Італія | 59.7 | 21.1 |
| Іспанія | 41.2 | 16.1 |
| Сполучені Штати | 12.7 | 3.4 |
| Швеція | 11.6 | 3.9 |
| Туреччина | 8.3 | 2.7 |

У липні 2012 року у Філадельфії (США) проходив VIII Всесвітній конгрес з високошвидкісного залізничного транспорту UIC HIGHSPEED 2012 [104]. У дні роботи конгресу демонструвалися успішні проекти в галузі високошвидкісного залізничного сполучення. З представлених на VIII конгресі матеріалів випливало, що прискорення будівництва високошвидкісних залізничних магістралей у світі відбулося після 2004 року, коли почали здійснюватися програми будівництва ВШМ у КНР і Туреччині, розширення будівництва ВШМ в Іспанії та інших країнах. З доповідей і виступів на конгресі представників різних країн можна зробити висновок, що, незважаючи на світову економічну кризу, істотного скорочення планів розвитку високошвидкісного залізничного транспорту не очікується.

Дотепер сформувалися три центри високошвидкісного сполучення – Японія, Китай і Європа, що зумовлено великим значенням для цих регіонів залізничного транспорту, густотою населеності території і високим розвитком науки і техніки, зокрема залізничних технологій [105].

Приклад Японії наслідували кілька європейських країн, спочатку в Італії з лінією «Діреттісіма», а згодом Франція, Німеччина та Іспанія.

Лінія «Діреттісіма» має довжину 684,5 км – найдовша швидкісна залізнична лінія в Італії, яка з'єднує Мілан, місто розташоване в північній частині країни, та Неаполь, розташований на півдні країни. Діреттісіма була побудована в 2009 році, є частиною Транс'європейської швидкісної залізничної мережі (TEN-T).

Сьогодні велика частина Європи має розгалужену мережу з численними міжнародними зв'язками. Багато країн розвинули високошвидкісну залізничну інфраструктуру для сполучення великих міст, зокрема Австрія, Бельгія, Данія, Фінляндія, Греція, Індонезія, Японія, Марокко, Нідерланди, Норвегія, Польща, Португалія, Саудівська Аравія, Сербія, Південна Корея, Швеція, Швейцарія, Тайвань, Туреччина, Великої, США та Узбекистан. Тільки в континентальній Європі та Азії високошвидкісна залізниця перетинає міжнародні кордони [122].

У варіантах організації високошвидкісного руху на новозбудованих лініях слід розрізняти японсько-іспанський варіант, поява якого була зумовлена різницею в ширині колії на ВШМ і на іншій мережі залізниць, і французький варіант, де ВШМ і основна мережа залізниць країни мають одну колію.

Організація високошвидкісного руху на модернізованих діючих лініях зі змішаним рухом характерна для Німеччини, але використовується також в Англії, Італії, Бельгії, Голландії, Швейцарії та інших країнах. Однак і в цих країнах останніми роками будують спеціалізовані ВШМ. Змішана експлуатація високошвидкісних та інших категорій поїздів утруднена, зокрема через різні вимоги до плану та профілю ліній для вантажних та пасажирських поїздів.

3.2. Досвід проєктування й експлуатації ВШМ у передових країнах

3.2.1. Японія

Тільки через 50 років після закінчення Другої світової війни на залізничному транспорті почалася нова ера, й увага фахівців сконцентрувалася більше на інфраструктурі, ніж на рухомому складі. У першу

чергу ситуація радикально змінилася в Японії. Національна мережа залізниць вузьких колій була перевантажена швидко зростаючими пасажирськими перевезеннями й абсолютно не задовольняла країну з більше ніж 100 млн жителів і густотою населення, що втричі перевищує європейську. У цій країні в середині 1950-х років різко загострилася транспортна ситуація уздовж східного узбережжя острова Хонсю, що було пов'язано з високою інтенсивністю пасажирських перевезень між найбільшими містами країни, особливо між Токіо і Осакою. Тому був розроблений план будівництва нових ліній нормальної колії загальною довжиною понад 2000 км з планом і профілем, що дозволяють забезпечити рух зі швидкістю понад 200 км/год. Використовуючи в основному іноземний досвід (особливо досвід США), Адміністрація японських залізниць досить швидко (1956–1958 рр.) створила проєкт високошвидкісної залізниці між цими двома містами. Будівництво дороги почалося 20 квітня 1959 р., а 1 жовтня 1964 р. перша в світі ВШМ була запущена в експлуатацію [106]. Їй присвоїли назву «Токайдо», довжина траси становила 515.4 км, а максимальна допустима швидкість поїздів 210 км/год. Через 7 років витрати на будівництво повністю окупилися. Високошвидкісний транспорт швидко став популярним серед населення, про що свідчить будівництво нових ділянок ВШМ і приріст обсягу виконаних на лініях пасажирських перевезень (рис. 3.3).



Рис.3.3. Перші високошвидкісні магістралі в Японії [106]

Життєвий цикл проекту Токіо – Осака (515 км): умови створення. Термін розробки проекту – 2 роки, термін будівництва – 1.5 роки, окупність капітальних витрат – 7 років. ВШМ має високу затребуваність, є однією з найнадійніших та найефективніших ВШМ у світі.

На 2023 рік в Японії діє 29 ліній ВШМ загальною протяжністю 2764 км (табл. 3.2). Ці лінії обслуговуються такими компаніями, як JR East, JR Central, JR West, JR Kyushu, JR Shikoku та приватними перевізниками.

Уряд Японії планує продовжувати розвивати свою мережу ВШМ в найближчі роки. Планується будівництво нових ліній ВШМ, які з'єднають Токіо з такими містами, як Хоккайдо, Сендай та Кіото. Існуючі лінії ВШМ будуть модернізовані для збільшення швидкості та пропускної спроможності. В ВШМ будуть впроваджуватися нові технології, такі як магнітна левітація та надпровідність.

Таблиця 3.2

Основні параметри ВШМ Японії

| Магістраль | Довжина, км | Вартість | | Пасажиропотік, млн/рік | Тунель | Загальна протяжність, км |
|----------------------|-------------|----------|------------|------------------------|-----------|--------------------------|
| | | млрд єн | млрд єн/км | | | |
| Токайдо – Санкансен | 715 | 10000 | 13986.0 | 270 | Таннума | 16,9 |
| Тохоку – Санкансен | 674 | 5000 | 7418.4 | 130 | Сейкан | 53,85 |
| Джоецу – Санкансен | 367 | 2000 | 5449.6 | 50 | Накаго | 11,2 |
| Хокурику – Санкансен | 560 | 4000 | 7142.9 | 40 | Тетто | 10,4 |
| Кюсю – Санкансен | 1287 | 12000 | 9324.0 | 120 | Ку-мамото | 7,8 |

На всіх високошвидкісних залізничних лініях (HSR) Японії є тунелі. Їх кількість та загальна протяжність на кожній магістралі варіюються, але загалом це найбільша мережа залізничних тунелів у світі.

Загальна протяжність тунелів HSR Японії становить понад 7 000 км (близько 20% від загальної довжини мережі HSR). Найдовший тунель

на HSR Японії – це тунель Сейкан, який має довжину 53.85 км з підводним фрагментом завдовжки 23.3 км. Тунель опускається на глибину близько 240 метрів, на 140 метрів нижче за рівень морського дна. Це найдовший тунель у світі. Він пролягає під Сангарською протокою, з'єднуючи префектуру Аоморі на японському острові Хонсю і острів Хоккайдо як частина лінії Каікуб залізничної компанії Хоккайдо (рис. 3.4, 3.5). Він розташований на магістралі Тохоку – Санкансен.

Інші значні тунелі на HSR Японії включають:

- тунель Таннума (магістраль Токайдо – Санкансен) – 16.9 км;
- тунель Хакодате (магістраль Тохоку – Санкансен) – 23.1 км;
- тунель Аоморі (магістраль Тохоку – Санкансен) – 26.8 км;
- тунель Йокогама (магістраль Токайдо – Санкансен) – 27.5 км.

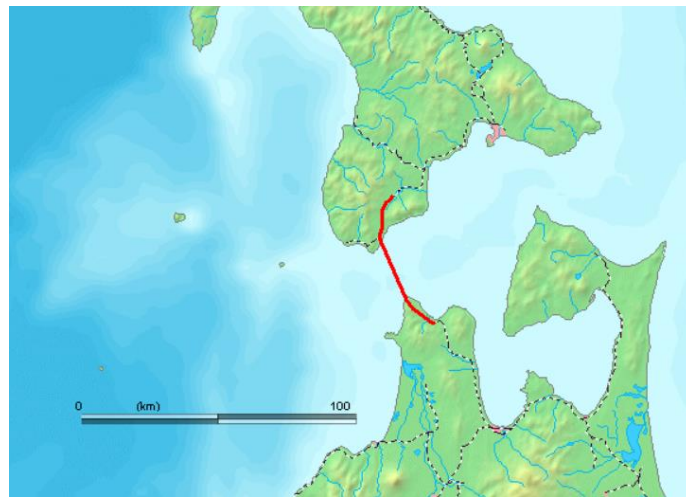


Рис. 3.4. Карта найдовшого тунелю Сейкан в Японії [107]



Рис. 3.5. Вхід в тунель з боку Хонсю, двоколійна ділянка [108]

Тунелі відіграють важливу роль у мережі HSR Японії, дозволяючи поїздам розвивати високу швидкість на складних ділянках маршруту, таких як гори та густонаселені райони. Вони також допомагають скоротити час у дорозі та зменшити вплив залізниці на навколишнє середовище.

Японія є лідером у технологіях будівництва тунелів, і її досвід використовується для будівництва тунелів на HSR в інших країнах світу.

Досвід Японії – важливий для повоєнної України, якій також доведеться виробити свої рішення для досягнення високого рівня безпеки на залізничному транспорті, особливо у сфері швидкісних і з перспективою високошвидкісних перевезень [109].

3.2.2. Франція

Ідеологом високошвидкісних залізничних систем у Європі є Франція. Товариство залізниць Франції (SNCF) в 1966 р. приступило до створення концепції високошвидкісного руху. На основі отриманих результатів у 1976 році був розроблений проєкт першої французької ВШМ «Південь – Схід» Париж – Ліон (410 км), який ґрунтувався на таких трьох основних принципах: нова лінія призначена тільки для пасажирського руху; сумісність з існуючою мережею; експлуатація базується на великій частоті поїздів й зменшенні кількості пересадок. Проєктування системи TGV велось таким чином, щоб поїзди могли курсувати по новій лінії зі швидкістю 270 км/год і переходити на звичайну залізничну мережу. У вересні 1981 року був відкритий рух високошвидкісного поїзда TGV. Зараз поїзди TGV південно-східного напрямку обслуговують понад 50 населених пунктів, у яких проживає 56 % населення країни. Різко зросла маршрутна швидкість руху. У сполученні Париж – Ліон вона становила 213 км/год, а час у дорозі між цими містами скоротився до 2 годин.

Магістраль TGV «Південь – Схід» – це високошвидкісна залізнична лінія, яка з'єднує Париж з південно-східними містами країни, такими як Ліон, Марсель і Монпельє. Загальна довжина магістралі становить 1250 км. Поїзди TGV на цій лінії можуть розвивати швидкість до 320 км/год.

Базуючись на перших успіхах, уряд прийняв рішення про будівництво нової високошвидкісної лінії TGV – Атлантик. Для атлантичної

лінії створено нове покоління високошвидкісних поїздів TGV – Атлантик, максимальна швидкість яких при експлуатації на новозбудованих ділянках становить 300, а на звичайних залізничних лініях – 220 км/год [110].

У кінці 1987 року було прийнято рішення про будівництво Північної магістралі TGV, яка являє собою французьку частину північно-європейського проекту. З'єднує Париж з північними містами Франції, такими як Лілль, Арас, Дуе, Кале та Дюнкерк. Загальна довжина становить 312 км.

Всі ці лінії були введені в експлуатацію в 1993 році до відкриття тунелю під Ла-Маншем.

Залізничний тунель під Ла-Маншем був відкритий 6 травня 1994 року, з'єднавши Англію з Францією. Його довжина становить 50.5 км, з них 38 км проходять під дном моря. Тунель використовується для курсування поїздів Eurostar, Eurotunnel Le Shuttle та вантажних поїздів.

Вирішено також продовжити магістраль TGV «Південь – Схід» до Балансу як першу чергу майбутньої середземноморської ВШМ TGV, яка дозволить дістатися з Парижа до Марселя за 3 год (рис. 3.6). Крім того, східна лінія TGV буде продовжена на Бельгію і далі в Німеччину і Нідерланди, а також на Страсбург, Женеву й Турин.

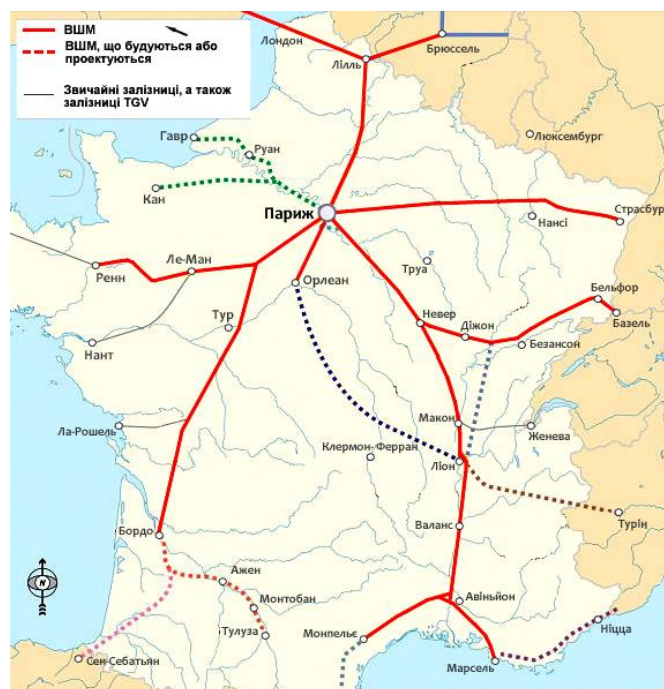


Рис. 3.6. Створення перших ВШМ у Франції [111]

Середземноморська ВШМ TGV (LGV Méditerranée) – це високошвидкісна залізнична лінія, яка ще не побудована у Франції. Планується, що вона з'єднає Марсель з Ніццою та Монако. Очікується, що будівництво лінії розпочнеться в 2028 році та буде завершено в 2036 році. Основні параметри:

- маршрут: Марсель – Ніцца – Монако;
- довжина: 260 км;
- швидкість: 320 км/год;
- вартість: 10 мільярдів євро;
- очікуваний пасажиропотік: 15 мільйонів пасажирів на рік.

На 2023 рік в країні діє 2947 км ВШМ, які об'єднують більшість великих міст (табл. 3.3). Ці лінії обслуговуються національною залізничною компанією SNCF. Найвідомішою лінією ВШМ у Франції є TGV «Південь – Схід» яка з'єднує Париж з Ліоном, Марселем, Бордо та іншими містами. TGV відомий своєю швидкістю (до 320 км/год) та комфортом.

Найдовший тунель на TGV розташований на магістралі Рона – Альпи. Це тунель Saint-Marcel-lès-Valence, довжина якого становить 7.6 км.

Інші значні тунелі на магістралях TGV включають:

- Tunnel du Fréjus (TGV–Атлантик) – 5.4 км;
- Tunnel du Mont d'Or (TGV «Південь – Схід») – 6.4 км;
- Tunnel de Saverne (Східна магістраль TGV) – 4.8 км;
- Tunnel de la Croix-Rousse (Рона – Альпи TGV) – 1.7 км.

Тунелі відіграють важливу роль у мережі TGV, дозволяючи поїздам розвивати високу швидкість на складних ділянках маршруту.

Уряд Франції планує продовжувати розвивати свою мережу ВШМ в найближчі роки. Планується будівництво нових ліній ВШМ, які з'єднають Париж з такими містами, як Бордо, Нант та Страсбург. В ВШМ будуть впроваджуватися нові технології, існуючі лінії ВШМ будуть модернізовані для збільшення швидкості та пропускної спроможності.

Крім цих 6 основних магістралей (табл. 3.3), у Франції також є кілька менших високошвидкісних ліній TGV. Загальна довжина мережі TGV у Франції становить близько 3000 км.

TGV – це одна з найуспішніших високошвидкісних залізничних систем у світі. Вона перевозить мільйони пасажирів щороку та відіграє важливу роль у транспортній системі Франції.

Основні параметри ВШМ Франції

| Магістраль | Довжина, км | Вартість | | Пасажиропотік, млн/рік | Кількість тунелів, шт. | Загальна протяжність, км |
|---------------------------------|----------------|-----------|---------------|---------------------------|---------------------------|-----------------------------|
| | | млрд євро | млрд євро/ км | | | |
| TGV «Південь–Схід» | 1250 | 25 | 20.0 | 15 | 21 | 70 |
| TGV–Атлантик | 1170 | 18 | 15.4 | 12 | 17 | 55 |
| Північна магістраль TGV | 312 | 9 | 28.8 | 5 | 10 | 30 |
| Східна магістраль TGV | 250 | 5 | 20.0 | 4 | 12 | 40 |
| Рона – Альпи TGV | 340 | 7 | 20.6 | 3 | 25 | 85 |
| Південно-західна магістраль TGV | 415 | 10 | 24.1 | 6 | 15 | 50 |

3.2.3. Німеччина

Перші проекти створення високошвидкісної залізничної мережі в Німеччині запропоновані німецьким вченим Августом Шерлі на початку ХХ століття. Перші ВШМ Мангейм – Штутгарт (99 км) і Ганновер – Варцбург (326 км) були введені в експлуатацію в 1991 р. У 1998 р. розпочато рух на лінії Ганновер – Берлін (265 км), на якій функціонує високошвидкісна ділянка (170 км).

У серпні 2002 р. відкрита високошвидкісна лінія Кельн – Франкфурт-на-Майні. Довжина траси була зменшена з 222 до 177 км, а час руху з 2 год 15 хв до 1 год 15 хв. Пізніше були збудовані лінії Нюрнберг – Мюнхен, Карлсруе – Оффенбург, Кельн – Ахен (рис. 3.7).

Німецькі високошвидкісні лінії в нічний час використовуються для вантажного руху. Винятком є лінія Кельн – Франкфурт-на-Майні, де через круті ухили (до 40 %) здійснюється лише високошвидкісний пасажирський рух.



Рис. 3.7. Розвиток ВШМ в Німеччині [112]

Географія Німеччини така, що великі агломерації часто розташовані на невеликій відстані одна від одної. Зони заселення сильно відрізняються від французьких, і високошвидкісні поїзди в Німеччині зупиняються набагато частіше.

На 2023 рік в країні діє 1645 км ВШМ, які з'єднують більшість великих міст (табл. 3.4). Ці лінії обслуговуються національною залізничною компанією Deutsche Bahn (DB). Найвідомішою лінією ВШМ у Німеччині є ICE (Intercity Express), яка з'єднує Берлін з Мюнхеном, Франкфуртом та іншими містами. ICE відомий своєю швидкістю (до 320 км/год) та комфортом.

Уряд Німеччини планує продовжувати розвивати свою мережу ВШМ в найближчі роки. Передбачається будівництво нових ліній ВШМ, які з'єднають Берлін з Гамбургом, Бременом та Нюрнбергом. Існуючі лінії ВШМ будуть модернізовані для збільшення швидкості та пропускної спроможності. Будуть впроваджуватися нові технології, такі як цифрова сигналізація ETCS та автоматизація управління поїздами.

Основні параметри ВІМ Німеччини

| Магістраль | Довжина, км | Вартість | | Пасажиропотік, млн/рік | Кількість тунелів, шт. | Загальна протяжність, км |
|------------------------|----------------|--------------|------------------|---------------------------|---------------------------|-----------------------------|
| | | млрд євро | млрд євро/ км | | | |
| Кельн – Франкфурт | 300 | 10 | 33.3 | 18 | 25 | 50 |
| Мангейм – Штутгарт | 160 | 7 | 43.8 | 12 | 20 | 40 |
| Нюрнберг – Інгольштадт | 80 | 4 | 50.0 | 6 | 10 | 20 |
| Берлін – Гамбург | 280 | 12 | 42.9 | 20 | 35 | 70 |
| Лейпциг – Ерфурт | 120 | 5 | 41.7 | 8 | 15 | 30 |
| Роттенбург – Мюнхен | 640 | 18 | 28.1 | 24 | 60 | 120 |
| Штутгарт – Мюнхен | 340 | 12 | 35.3 | 16 | 45 | 90 |
| Франкфурт – Базель | 220 | 9 | 40.9 | 14 | 30 | 60 |
| Берлін – Лейпциг | 120 | 6 | 50.0 | 10 | 12 | 24 |

Корисним для України може стати досвід Німеччини, яка розвинула регіональні перевезення чи не найкраще серед усіх країн ЄС. У німецьких регіональних перевезеннях керівну роль відіграє співпраця залізничного оператора та регіональної влади, оскільки вона є основним замовником послуг. Водночас центральна влада визначає доцільність і способи компенсації (дотації) для збиткових залізничних перевезень, якщо їх неможливо замінити іншими видами транспорту або така заміна матиме істотні негативні наслідки, як-от збільшення трафіку, погіршення екології тощо.

Для України досвід німецьких залізниць є важливим, оскільки вона має схожі проблеми: надмірний персонал, надлишкову інфраструктуру та відсутність доступу приватного капіталу.

3.2.4. Італія

У 1962 р. був прийнятий план розвитку залізничного транспорту, у якому, зокрема, передбачалося спорудження ВШМ між Римом і Флоренцією лінії, розрахованої на максимальну швидкість руху 250 км/год.

У січні 1987 році уряд Італії затвердив будівництво швидкісної магістралі від Рима до Неаполя протяжністю 277 кілометрів, а також проєктні роботи для продовження лінії «Діреттісіма» на півночі до Мілана і в напрямку Турина і Венеції.

Відповідно до плану «Альта Велочіта» були споруджені високошвидкісні магістралі Венеція – Мілан – Турин і Мілан – Болонья – Рим – Неаполь. На нових ВШМ передбачено рух поїздів зі швидкістю до 300 км/год. Основні ВШМ за цим планом: Рим – Неаполь (220 км); Флоренція – Болонья – Мілан (273 км); Мілан – Венеція (262 км).

У грудні 2009 р. відбувся помітний прорив у розвитку національної високошвидкісної залізничної мережі Італії – завершено будівництво коридору від Турина й Мілана до Риму й Неаполя. Це дозволило значно скоротити тривалість поїздок і поширити нові транспортні послуги на більшу частину території країни.

Після здачі в експлуатацію час руху між Міланом і Римом складає 2 год 50 хв, а між Римом і Неаполем – всього 1 год 05 хв. У перспективі італійська високошвидкісна мережа «Альта Велочіта» матиме протяжність 2200 км (рис. 3.8).

Станом на 2023 рік в Італії експлуатується 1037 км ВШМ, з них 314 км – це лінії першого покоління, збудовані в 1980-х роках; 723 км – це лінії другого покоління, збудовані в 2000-х та 2010-х роках (табл. 3.5).

Італійський уряд має амбітні плани щодо розширення мережі ВШМ. До 2030 року планується збудувати 1800 км нових ВШМ. Найбільші проєкти будівництва ВШМ в Італії:

– лінія Турин – Мілан: ця лінія довжиною 450 км з'єднає два найбільших міста Італії. Її будівництво розпочалося в 2011 році і планується завершити до 2025 року;

– лінія Неаполь – Бари: ця лінія довжиною 300 км з'єднає два найбільших міста Південної Італії. Її будівництво розпочалося в 2015 році і планується завершити до 2028 року.

– лінія Венеція – Мілан: ця лінія довжиною 250 км з'єднає два найважливіших економічних центри Італії. Її будівництво розпочалося в 2019 році і планується завершити до 2030 року.

Будівництво нових ВШМ, допоможе скоротити час у дорозі, зменшити викиди парникових газів та стимулювати економічне зростання країни.



Рис. 3.8. Схема існуючих і перспективних ВШМ в Італії [113]

Основні параметри ВШМ Італії

| Магістраль | Довжина, км | Вартість | | Пасажиро- потік, млн/рік | Кіль- кість тунелів, шт. | Загальна протяж- ність, км |
|------------------------|----------------|--------------|-----------------|--------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|
| | | млрд євро | млрд євро/км | | | |
| Мілан – Турин | 160 | 7 | 43.8 | 18 | 30 | 60 |
| Турин – Болонья | 300 | 12 | 40.0 | 25 | 50 | 100 |
| Болонья – Флоренція | 78 | 4 | 51.3 | 12 | 25 | 50 |
| Флоренція – Рим | 270 | 8 | 29.6 | 20 | 40 | 80 |
| Рим – Неаполь | 200 | 6 | 30.0 | 15 | 35 | 70 |
| Неаполь – Салерно | 50 | 2 | 40.0 | 8 | 15 | 30 |
| Турин – Мілан | 164 | 7 | 42.7 | 16 | 25 | 50 |
| Мілан – Венеція | 270 | 10 | 37.0 | 22 | 40 | 80 |

3.2.5. Іспанія

Урядом Іспанії затверджений план розвитку залізничного транспорту до кінця століття, яким передбачається спорудження нових ліній для руху пасажирських поїздів зі швидкістю 250 км/год. План створення високошвидкісних ліній в Іспанії був висунутий на початку 1970-х років, однак на початку 1980-х років послідовність його реалізації змінилася. Першим для ВШМ був прийнятий напрямок Мадрид – Севілья (471 км), і за три роки (1989-1992 рр.) було розроблено проєкт будівництва високошвидкісної магістралі.

Перша високошвидкісна лінія в Іспанії AVE («Іспанська високошвидкісна») була пущена в експлуатацію у квітні 1992 р. Час поїздки від Мадрида до Севільї було скорочено з 6 год до 2 год 15 хв. Популяр-

ність пасажирського швидкісного руху зростала. Згідно з даними Національного інституту статистики (INE), попит на користування високошвидкісними поїздами зріс майже до 25 млн пасажирів за рік

Особливість іспанської мережі – це наявність двох стандартів ширини колії – 1668 мм на звичайних лініях і 1435 мм для нових ліній ВШМ. На рис. 3.9 показано міжміські й високошвидкісні (суцільна товста лінія) маршрути.



Рис. 3.9. Високошвидкісні залізниці в Іспанії

Джерело: <https://bg.aroundtravels.com/articles-about-spain/iron-road-spain-map-website-photo.html>

Високошвидкісні лінії в Іспанії призначені тільки для високошвидкісних поїздів, однак у разі використання поїздів Talgo з розсувними колісними парами з'являється можливість руху цими лініями і звичайних пасажирських поїздів.

Станом на 2023 рік в Іспанії експлуатується 3100 км ВШМ, що робить її другою за довжиною мережею ВШМ у світі після Китаю. З них 2500 км – це лінії першого покоління, збудовані в 1990-х роках;

600 км – це лінії другого покоління, збудовані в 2000-х та 2010-х роках (табл. 3.6).

Таблиця 3.6

Основні параметри ВШМ Іспанії

| Магістраль | Довжина, км | Вартість | | Пасажиропотік, млн/рік | Кількість тунелів, шт. | Загальна протяжність, км |
|-------------------------------|-------------|-----------|---------------|------------------------|------------------------|--------------------------|
| | | млрд євро | млрд євро/ км | | | |
| Мадрид – Барселона – Валенсія | 684 | 11 | 16.1 | 30 | 45 | 80 |
| Мадрид – Севілья | 471 | 9 | 19.1 | 25 | 30 | 60 |
| Мадрид – Вальядолід – Леон | 350 | 6 | 17.1 | 15 | 25 | 50 |
| Кордова – Малага | 500 | 8 | 16.0 | 12 | 35 | 70 |
| Барселона – Жирона – Фігерас | 160 | 3 | 18.8 | 8 | 20 | 40 |

Іспанський уряд має амбітні плани щодо розширення мережі ВШМ. До 2030 року планується збудувати 1500 км нових ВШМ, що збільшить загальну довжину мережі ВШМ до 4600 км.

Найбільші проекти будівництва ВШМ в Іспанії:

Лінія Мадрид – Барселона – Севілья: ця лінія довжиною 684 км є найдовшою ВШМ в Іспанії. Її будівництво розпочалося в 1988 році і було завершено в 2013 році [114].

Лінія Мадрид – Валенсія – Аліканте: ця лінія довжиною 500 км з'єднує столицю Іспанії з трьома найбільшими містами на сході країни. Її будівництво розпочалося в 1998 році і було завершено в 2010 році.

Лінія Кордова – Малага – Севілья: ця лінія довжиною 400 км з'єднує три найбільших міста Андалусії. Лінія Кордова – Малага була введена в експлуатацію у грудні 2007 року і з того часу функціонує як частина мережі високошвидкісних залізниць Іспанії. Вона забезпечує швидкісне сполучення між Мадридом і Малагою через Кордову, що значно

скорочує час у дорозі. Лінія Мадрид – Севілья через Кордову була введена ще раніше, в 1992 році, і також є частиною високошвидкісної інфраструктури Іспанії. Таким чином, для повного сполучення між Кордовою, Малагою та Севільєю діють дві окремі високошвидкісні лінії, які разом забезпечують зручні пересадки та високу швидкість пересування між цими великими містами Андалусії.

3.2.6. Великобританія

У Великобританії найбільш активно ведеться розробка проєкту швидкісної лінії, що сполучає столицю Великобританії з континентом через тунель під Ла-Маншем (див. рис. 3.10). Спорудження тунелю, що є найважливішою ланкою високошвидкісний європейської мережі, почалося в 1987 році. Відкриття тунелю під Ла-Маншем 6 травня 1994 р. дозволило встановити пряме залізничне сполучення Великобританії з континентальною Європою. Загальна довжина тунелю 49 км. Половину обсягу руху по тунелю складають рейси пасажирських поїздів французьких і британських залізниць. З французької сторони це поїзди TGV, які рухаються зі швидкістю до 300 км/год. Однак при проходженні тунелю максимальна швидкість обмежена до 160 км/год. Другу половину потоку складають спеціальні вантажні поїзди, у яких перевозять легкові й вантажні автомобілі. Передбачається, що в годину пік розміри руху будуть доведені до 10 пар пасажирських поїздів на годину і 6 пар вантажних. Час руху від Лондона до Парижа скоротився до 3 год.

З 28 жовтня 2003 р. швидкісні поїзди «Eurostar», що зв'язують Лондон з Парижем і Брюсселем, почали рухатися ще швидше, тому що на британській частині траси введена нова ділянка довжиною 46 миль між Фолкстоном і Грейвсендом, якою поїзди «Eurostar» можуть рухатися із швидкістю до 300 км/год. Друга ВШМ довжиною 39 км до лондонського вокзалу Сент-Панкрас набагато складніша в будівельному відношенні, оскільки велика частина залізниці прокладалась у тунелях, по мостах і шляхопроводах.

Регулярний рух швидкісних поїздів внутрішніх сполучень у Великобританії розпочався 29 червня 2009 р. пуском на першій у країні високошвидкісної магістралі HS 1 (рис. 3.10) трьох пар поїздів на добу по маршруту Лондон – Сент – Панкрас – Ашфорд і поїздів з інтервалом 30 хв в години пік за маршрутом Лондон – Сент-Панкрас – Еббсфліт.

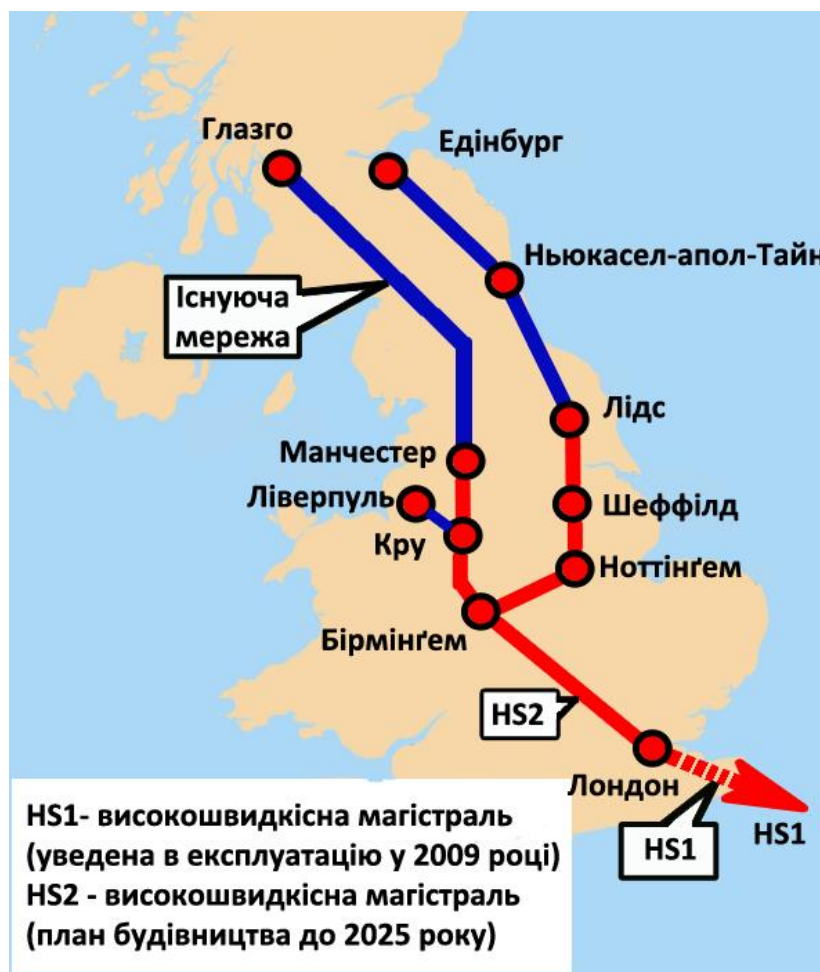


Рис. 3.10. Високошвидкісні залізниці Великобританії [115]

На залізницях Великобританії віддається перевага підвищенню частоти руху поїздів, а не швидкості, що, безумовно, може бути ефективним з позиції зменшення часу поїздки і впливу на вибір пасажирями виду транспорту.

Станом на 2023 рік у Великобританії експлуатується 1131 км ВШМ, що робить її 10-ою за довжиною мережею ВШМ у світі (табл. 3.7). З них 700 км – це лінія HS1, збудована в 1990-х роках, 400 км – це лінія HS2, будівництво якої розпочалося в 2017 році і планується завершити до 2030 року.

Основні параметри ВШМ Великобританії

| Магістраль | Довжина, км | Вартість | | Пасажиропотік, млн/рік | Кількість тунелів, шт. | Загальна протяжність, км |
|-------------------|-------------|--------------------|-----------------------|------------------------|------------------------|--------------------------|
| | | млрд фунтів стерл. | млрд фунтів стерл./км | | | |
| HS1 | 684 | 6.5 | 60.2 | 10 | 10 | 50 |
| HS2 (перший етап) | 471 | 23.0 | 88.5 | 7 | 10 | 32 |

Уряд Великобританії має плани щодо подальшого розширення мережі ВШМ. До 2040 року планується збудувати 1700 км нових ВШМ. Найбільші проекти будівництва ВШМ у Великобританії наступні.

Лінія HS2: ця лінія довжиною 500 км з'єднає Лондон з Манчестером і Бірмінгемом. Її будівництво розпочалося в 2017 році і планується завершити до 2030 року.

Лінія Great Western Main Line (GWML): планується модернізувати цю існуючу лінію, щоб вона відповідала стандартам ВШМ. Це додасть 500 км до мережі ВШМ.

Лінія Northern Powerhouse Rail (NPR): ця нова лінія довжиною 300 км з'єднає Манчестер з Ліверпулем, Лідсом і Шеффідом. Її будівництво планувалося розпочати в 2020-х роках. Станом на липень 2024 року будівництво основної частини NPR ще не розпочалося. Однак ведуться деякі підготовчі роботи: проведення геодезичних вишукувань, викуп земель. За словами уряду Великобританії, перший етап NPR, який з'єднає Манчестер з Ліверпулем, буде завершено до 2030 року. Повне завершення будівництва NPR згідно з планами, заплановано на 2040 рік.

3.2.7. Китай

На початку 90-х років залізниці у Китаї були слабо розвинені, а середня швидкість поїздів становила лише 48 км/год. Сьогодні ж Китай має найбільшу в світі мережу високошвидкісних ліній залізничного руху. До 2004 року Китай реалізував проекти з покращення інфраструктури і підвищення максимальної швидкості поїздів до 160 км/год. Фактично, це відповідає рівню розвитку української залізничної мережі

сьогодні. У 2004 році уряд прийняв стратегічне рішення розділення руху в Китаї на пасажирський та вантажний, а також виділив лінії швидкісного руху (300–350 км/год).

Китай скористався досвідом провідних країн, які також надали доступ до технологій. З огляду на перспективи ринку Китаю допомогти з технологіями зголосилися компанії Alstom, Siemens, Bombardier Transportation та японський консорціум на чолі з Kawasaki.

Швидке економічне зростання Китаю протягом останніх двох десятиліть особливо яскраво проявилось у розширенні мережі залізниць (рис. 3.11), темпи якого стали найвищими у світі й нагадують темпи епохи залізничного будівництва у Європі і США другої половини ХІХ ст. Якщо ці темпи в найближче десятиліття збержуться, мережа залізниць Китаю стане за своїми розмірами другою у світі після США [116].

Недавнє будівництво, починаючи з ХХІ-го століття, призвело до того, що Китай взяв на себе провідну роль у розвитку високошвидкісної залізниці. Станом на 2023 рік його мережа становила понад дві третини світової мережі. На сьогодні всі магістральні та регіональні залізниці Китаю мають стандартну європейську колію 1435 мм.

Ще в середині 90-х років був складений проєкт мережі високошвидкісних залізниць, який включав лінії Пекін – Шеньян – Харбін, Пекін – Шанхай, Пекін – Чженчжоу – Ухань – Чанша – Гуанчжоу, Хайчжоу – Чженчжоу – Сіань – Ланьчжоу. Пріоритетним напрямком цього проєкту вважалася високошвидкісна лінія Пекін – Шанхай («Цзіньху») довжиною 1330 км. Її траса йде паралельно існуючій магістралі Пекін – Тяньцзінь – Цзинань – Сючжоу – Бенбу – Нанкін – Шанхай з невеликими відхиленнями (див. рис. 3.11). За попереднім проєктом швидкісні вантажні і пасажирські поїзди повинні долати цю відстань за 6 год 30 хв, рухаючись зі швидкістю 250 км/год. На всій лінії намічалось спорудження 24 станцій. Проєкт був складений у 1993 р., але через відсутність коштів його реалізація була відкладена. У 1998 р. було вирішено побудувати спочатку експериментальну ділянку Пекін – Тяньцзінь. На ній з 2007 року високошвидкісні поїзди розвивають швидкість до 350 км/год.

Безпілотні «поїзди-кулі», що з'єднують Пекін і Чжанцзякоу в північній провінції Хебей, здатні розвивати швидкість до 350 км/год, що робить їх найшвидшими автономними поїздами у світі.

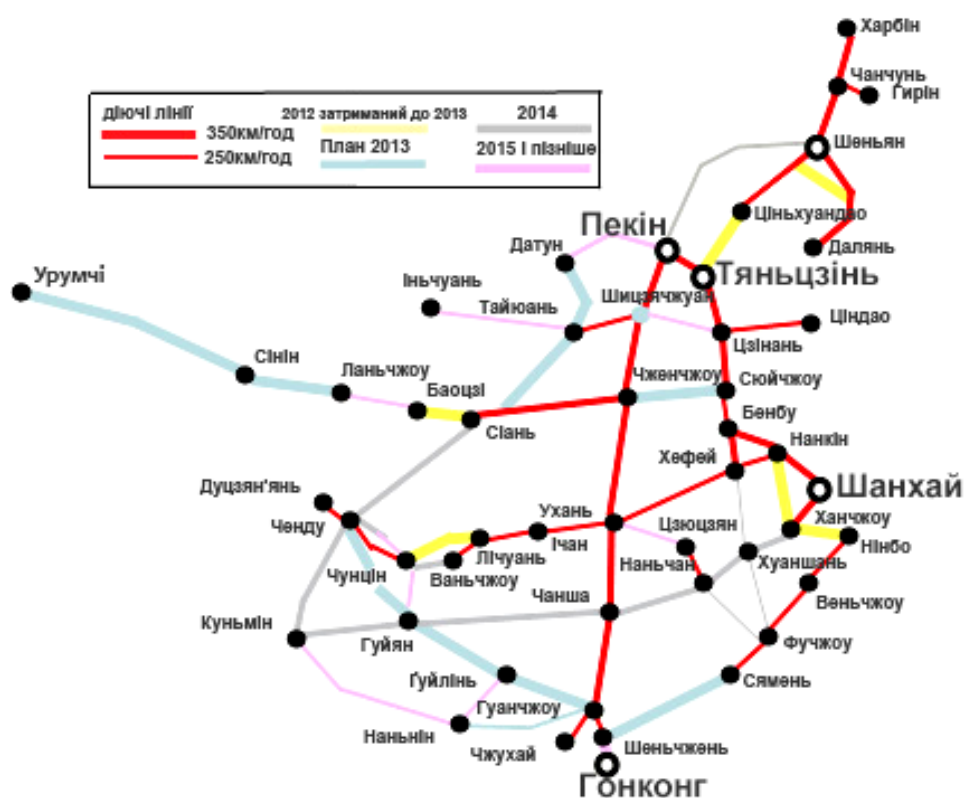


Рис. 3.11. Схема високошвидкісних залізниць Китаю [117]

Паралельно з введенням високошвидкісного руху на китайських залізницях проведено реконструкцію головних магістралей зі збільшенням швидкості руху пасажирських і вантажних поїздів. Спорудження першої швидкісної залізниці виключно для руху пасажирських поїздів Циньхуандао – Шеньян почалося в серпні 1999 р. Лінія проходить паралельно існуючій залізниці, та є головною магістраллю, що зв'язує північ і північний схід Китаю. Спеціально побудовані пасажирські поїзди з 2003 р. почали курсувати зі швидкістю 200 км/год. Ця залізниця стала випробувальним полігоном для високошвидкісної лінії Пекин – Шанхай.

Заслуговує уваги швидкість реалізації проєктів. Так, високошвидкісна лінія між найбільшими китайськими містами Пекин – Шанхай (1318 км) була побудована всього за два роки.

У 2022 році Китай прийняв стратегія розвитку високошвидкісних залізниць – це план «4x4». Він має на меті:

– збудувати до 2025 року ще 4 000 кілометрів високошвидкісних залізниць, що збільшить загальну протяжність мережі до 49 000 кілометрів;

– сформувати чотири високошвидкісні залізничні коридори в напрямку схід-захід, північ-південь, північ-схід та північ-захід;

– з'єднати всі провінційні столиці Китаю високошвидкісними залізницями;

– збільшити обсяг пасажирських перевезень на високошвидкісних залізницях до 8 мільярдів пасажиро-кілометрів на рік.

План «4х4» є важливою частиною стратегії Китаю щодо розвитку інфраструктури та стимулювання економічного зростання. Очікується, що завдяки її реалізації буде створено мільйони нових робочих місць та покращиться зв'язок між регіонами країни.

Ось деякі з ключових проєктів, які будуються в рамках плану «4х4»:

– високошвидкісна залізниця Пекін – Ченду, яка з'єднає дві столиці країни та скоротить час у дорозі з 13 до 8 годин;

– високошвидкісна залізниця Шанхай – Чунцин, яка з'єднає два найбільших фінансових центри Китаю та скоротить час у дорозі з 13 до 8 годин.

Високошвидкісна залізниця Ханой – Хайфон, яка з'єднає столицю В'єтнаму з портовим містом Хайфон.

План «4х4» є амбітним проєктом, який допоможе Китаю зміцнити свою позицію як лідера в галузі високошвидкісних залізниць.

У 2023 році в Китаї було збудовано 2776 кілометрів нових високошвидкісних залізниць (табл. 3.8). Це стало частиною загальної мережі, яка до кінця року сягнула 45 000 кілометрів, що робить її найдовшою у світі.

Крім цих 5 основних магістралей, в Китаї є інші HSR, що з'єднують міста по всій країні. На всіх високошвидкісних залізничних лініях (HSR) Китаю є тунелі. Їх кількість та загальна протяжність на кожній магістралі варіюються, але загалом це найбільша мережа залізничних тунелів у світі (див. табл. 3.8).

Ось деякі факти про тунелі на HSR Китаю: загальна протяжність тунелів HSR Китаю становить понад 5 000 км (близько 17% від загальної довжини мережі HSR). Найдовший тунель на HSR Китаю – це тунель Гуйлінь – Ланькай, який має довжину 50.79 км, він розташований на магістралі Пекін – Гуанчжоу. Інші значні тунелі на HSR Китаю включають:

– тунель Сюйгуань (магістраль Шанхай - Гуанчжоу) – 44.57 км;

- тунель Ланькай – Шанхай (магістраль Шанхай – Гуанчжоу) – 44.48 км;
- тунель Ціндао – Цзяочжоу (магістраль Цзінань – Ціндао) – 33.68 км;
- тунель Фошань – Хечжоу (магістраль Гуанчжоу – Шеньчжень) – 25.33 км.

Таблиця 3.8

Основні параметри ВШМ Китаю

| Магістраль | Довжина, км | Вартість | | Пасажиропотік, млн/рік | Кількість тунелів, шт. | Загальна протяжність, км |
|-------------------|-------------|------------|---------------|------------------------|------------------------|--------------------------|
| | | млрд юаней | млрд юаней/км | | | |
| Пекін – Шанхай | 1318 | 220 | 166.9 | 550 | 102 | 1 445 |
| Пекін – Гуанчжоу | 2302 | 260 | 112.9 | 400 | 65 | 2 302 |
| Шанхай – Гуанчжоу | 2264 | 240 | 106.0 | 350 | 88 | 1 531 |
| Ухань – Гуанчжоу | 1138 | 110 | 96.7 | 200 | 89 | 1 118 |
| Цзінань – Ціндао | 306 | 50 | 163.4 | 100 | 36 | 304 |

Тунелі відіграють важливу роль у мережі HSR Китаю, що дозволяють поїздам розвивати високу швидкість на складних ділянках маршруту, таких як гори та густонаселені райони.

Досвід Китаю доводить доцільність приватних інвестицій у високошвидкісний залізничний рух за рахунок вищої реальної окупності порівняно з іншими видами пасажирських залізничних перевезень.

3.2.8. Сполучені Штати Америки

На відміну від Італії, Китаю та інших країн, США не мають наразі справжньої мережі високошвидкісних залізниць (HSR). Є лише одна пасажирська HSR лінія в США: Acela Express. Ця лінія, що зв'язує Бостон, Нью-Йорк, Вашингтон, Філадельфію та Балтімор, має довжину

756 км і була відкрита в 2000 році. Ось деякі дані про довжину, вартість та пасажиропотік Acela Express: довжиною – 756 км, вартість – 7.3 млрд доларів США, пасажиропотік – 4.5 млн (2022).

Важливо зазначити, що лінія Acela Express не вважається справжньою HSR, оскільки її максимальна швидкість (240 км/год) значно нижча, ніж у інших HSR у світі (до 350 км/год).

Існують плани щодо будівництва нових HSR ліній у США, але жодного з них ще не завершено. Вартість будівництва HSR у США дуже висока, тому ймовірно, що мережа HSR розвиватиметься повільно.

Розвиток ВШМ в США стикається з певними викликами: висока вартість будівництва, фінансування, політична підтримка. В той же час, США мають великі плани щодо будівництва ВШМ (рис. 3.12).



Рис. 3.12. Реалізація проектів нових швидкісних та високошвидкісних залізниць у США [118]

У Сполучених Штатах Америки є кілька ключових проектів високошвидкісних залізниць, які знаходяться на різних стадіях розвитку, табл. 3.9.

Таблиця 3.9

**Основні параметри та вартість проєктів високошвидкісних
магістралей у США**

| Назва проєкту | Протяжність, км | Швидкість, км/год | Вартість, млрд. до- ларів | Етапи будівництва (рік) |
|---------------------------------|--------------------|----------------------|---------------------------------|--|
| Каліфорнійська мережа ВШЗ | 1 160 | до 320 | \$64-77 | Сан-Хосе – Мерсед (2029) Мерсед – Бейкерсфілд (2035) Бейкерсфілд – Пасадена (2037) Пасадена – Лос-Андже- лес (2042) Лос-Анджелес – Сан-Ді- его (2047) |
| Північно-схід- ний коридор | 735 | до 250 | \$60-70 | Бостон – Нью-Йорк (2023) Нью-Йорк – Балтімор (2025) Балтімор – Вашингтон, округ Колумбія (2027) |
| Техаський екс- прес | 390 | до 320 | \$20-25 | Х'юстон – Даллас (2026) |
| ВШМ Флориди | 560 | до 240 | \$17-22 | Майамі – Орlando (2026) |
| ВШМ Великих озер | 800 | до 240 | \$40-50 | Чикаго – Детройт – Мі- луокі (середина 2020) |

Примітка: наведені в табл. 3.9 параметри та вартість є орієнтовними та можуть змінюватися.

За різними оцінками, до 2050 року загальна протяжність ВШМ у США може досягти від 8 000 до 16 000 км. Більшість нових ВШМ будуватимуться на нових маршрутах, а не модернізуватимуться існуючі залізничні лінії. Це дозволить їм мати більш високі швидкості та кращу пропускну спроможність.

3.3. Плани організації високошвидкісного руху в країнах Європи, що межують з Україною

3.3.1. Польща

Наразі в Польщі немає жодних ліній, які б офіційно вважалися високошвидкісними залізницями. Однак існує кілька ліній, які можуть розвивати швидкість до 200 км/год або більше. До них належать:

- лінія E30: Варшава – Ченстохова – Катовице – Вроцлав – Зельона Гура – Гожинець (640 км);
- лінія E65: Варшава – Лодзь – Познань – Вроцлав (560 км);
- лінія E30: Краків – Жешув – Ряшів – Люблін – Варшава (700 км);
- лінія E30: Гданськ – Сопот – Гдиня – Щецин (350 км).

Ці лінії були модернізовані в останні роки для збільшення їхньої пропускної спроможності та максимальної швидкості. Однак вони все ще не відповідають всім вимогам, які висуваються до високошвидкісних залізниць. Зокрема, на цих лініях немає спеціальних високошвидкісних колій, які б дозволяли поїздам розвивати швидкість до 320 км/год або більше.

Уряд Польщі планує в майбутньому збудувати кілька справжніх високошвидкісних залізничних ліній (рис. 3.13).



Рис. 3.13. Топологія мережі високошвидкісних залізниць у Польщі [119]

До них належать:

- лінія СМК: Варшава – Лодзь – Познань – Вроцлав (640 км);
- лінія Y: Варшава – Лодзь – Краків (350 км);
- лінія E30: Гданськ – Щецин (400 км);
- лінія E30: Варшава – Білосток – Люблін (450 км).

Будівництво цих ліній повинно початися в найближчі роки та завершитися до 2040 року. Очікується, що ці лінії зроблять подорожі по Польщі більш швидкими та комфортними, а також стимулюють розвиток економіки країни.

Польща буде мати одну з найрозвиненіших мереж високошвидкісних залізниць у Центральній та Східній Європі. ЕРК (Express Pasażerski Kolejowy) – це польська національна компанія, яка керує мережею високошвидкісних поїздів Pendolino, які курсують між основними містами Польщі, а також до границі Німеччини (рис. 3.14).



Рис. 3.14. Поїзд Pendolino в Польщі

Наразі остаточно не визначено, чи будуть лінії СМК, Y, E30 (Гданськ – Щецин) та E30 (Варшава – Білосток – Люблін) використовуватися лише для пасажирських перевезень, чи й для вантажних. Уряд Польщі веде переговори з потенційними інвесторами та операторами щодо майбутнього використання цих ліній. Можливі варіанти:

- лише пасажирські перевезення: це дозволить забезпечити найвищу швидкість та комфорт для пасажирів;
- пасажирські та вантажні перевезення: це дозволить максимально використовувати пропускну здатність ліній та отримати додатковий дохід від вантажних перевезень;

– комбінований варіант: деякі поїзди на цих лініях будуть використовуватися лише для пасажирських перевезень, а інші – для вантажних.

Рішення про те, чи будуть ці лінії використовуватися лише для пасажирських перевезень, чи й для вантажних, буде прийнято пізніше.

Що стосується розробки проєктів та будівництва цих ліній:

– проєкти цих ліній розроблялися польськими та міжнародними проєктувальними компаніями;

– будівництво цих ліній буде здійснюватися польськими та міжнародними будівельними компаніями;

– уряд Польщі планує залучити до будівництва цих ліній приватні інвестиції.

Наразі неможливо сказати точно, які компанії будуть будувати ці лінії. Це буде залежати від результатів тендерів, які будуть проведені урядом Польщі. Важливо зазначити, що будівництво цих ліній є дуже дорогим проєктом. За оцінками експертів, його вартість може скласти до 30 мільярдів євро.

Незважаючи на високу вартість, будівництво цих ліній вважається важливим проєктом для Польщі. Воно дозволить країні інтегруватися до європейської мережі високошвидкісних залізниць, збільшити обсяги торгівлі та подорожей та покращити життя своїх громадян.

На лініях СМК, Y, E30 (Гданськ – Щецин) та E30 (Варшава – Білосток – Люблін) будуть Обертатися такі типи рухомого складу:

Пасажирські поїзди:

– швидкісні поїзди: Ці поїзди будуть розвивати швидкість до 320 км/год і використовуватимуться для експрес-перевезень між основними містами Польщі;

– регіональні поїзди: Ці поїзди будуть розвивати швидкість до 200 км/год і використовуватимуться для перевезень на менші відстані та в менших містах;

Вантажні поїзди:

– контейнерні поїзди: ці поїзди будуть використовуватися для перевезення контейнерів на великі відстані;

– вантажні поїзди для сипучих вантажів: ці поїзди будуть використовуватися для перевезення сипучих вантажів, таких як вугілля, руда та зерно.

Тип рухомого складу, який буде використовуватися на цих лініях, буде залежати від таких факторів як попит на пасажирські та вантажні

перевезення, дальність перевезень, інфраструктура ліній, вартість рухомого складу.

Наразі неможливо сказати точно, які конкретні типи поїздів будуть використовуватися на цих лініях. Це буде залежати від рішень, які будуть прийняті урядом Польщі та операторами цих ліній. Важливо зазначити, що для обслуговування цих ліній буде потребуватися сучасний рухомий склад, який відповідає найвищим міжнародним стандартам. Уряд Польщі планує закупити новий рухомий склад для цих ліній у міжнародних компаній. Це дозволить забезпечити високий рівень комфорту та безпеки для пасажирів та вантажів.

3.3.2. Словаччина

У Словаччині є одна лінія високошвидкісної залізниці, яка з'єднає Братиславу з Кошице. Ця лінія експлуатується компанією RegioJet, яка використовує поїзди Railjet. Високошвидкісна залізнична лінія Братислава – Кошице (370 км) була побудована в рамках проєкту «Нова залізнична магістраль Братислава – Кошице» та відкрита в 2003 році. Максимальна швидкість 320 км/год (на деяких ділянках), час у дорозі 3 години 20 хвилин (при максимальній швидкості). Інші показники:

- кількість колій: 2;
- електрифікація: 25 кВ змінного струму;
- тип поїздів: Railjet;
- перевізник: RegioJet;
- кількість станцій: 22.

Уведення в експлуатацію цієї лінії дозволило значно скоротити час в дорозі між двома найбільшими містами Словаччини, зробивши поїзди більш комфортними та привабливими. Лінія також відіграє важливу роль в розвитку економіки Словаччини, стимулюючи торгівлю та інвестиції.

Ось деякі цікаві факти про лінію Братислава – Кошице:

- це найдовша електрифікована залізнична лінія в Словаччині;
- на лінії використовуються найсучасніші системи сигналізації та керування поїздами;
- лінія проходить через мальовничі місця Словаччини, включаючи Карпатські гори.

Високошвидкісна залізнична лінія Братислава – Кошице є одним з найважливіших інфраструктурних проєктів в Словаччині. Вона відіграє важливу роль в розвитку країни та зближує її з Європейським Союзом.

3.3.3. Угорщина

В Угорщині є одна лінія високошвидкісної залізниці, яка з'єднує Будапешт з Віднем. Ця лінія експлуатується компанією MÁV (Magyar Államvasutak), яка використовує поїзди Railjet. Схема (рис. 3.15) показує маршрут руху високошвидкісних поїздів Railjet, які курсують між Будапештом і Віднем. Поїзди Railjet – це сучасні зручні поїзди, які можуть розвивати швидкість до 230 км/год. Подорож з Будапешта до Відня на Railjet займає близько 2 годин 30 хвилин.

У 2002 році була відкрита перша ділянка довжиною 62 км між Будапештом та Дьєром, у 2006 році відкриття другої ділянки довжиною 96 км між Дьєром та Хедьєшхаломом, у 2009 році відкриття третьої й останньої ділянки довжиною 67 км між Хедьєшхаломом та Віднем.



Рис. 3.15. Схема залізниць Угорщини. Маршрут руху високошвидкісних поїздів Railjet між Будапештом і Віднем [120]

Довжина ділянки 225 км, кількість колій – 2, кількість станцій – 17, електрифікована на змінному струмі 25 кВ, тип поїздів Railjet, перевізники MÁV (Magyar Államvasutak) та ÖBB (Österreichische Bundesbahnen).

Це найдовша електрифікована залізнична лінія в Угорщині. На лінії використовуються найсучасніші системи сигналізації та керування поїздами. Лінія проходить через мальовничі місця Угорщини, включаючи Балатонське озеро.

Високошвидкісна залізнична лінія Будапешт – Відень є одним з найважливіших інфраструктурних проєктів в Угорщині. Вона відіграє важливу роль в розвитку країни та зближує її з Європейським Союзом.

3.3.4. Румунія

Румунія може першою з країн Східної та Центральної Європи отримати швидкісну залізничну лінію, побудовану із застосуванням китайських технологій. Середня ціна будівництва швидкісної залізниці, на якій поїзд може розвивати швидкість 350 км/год, становить 20 млн доларів за 1 км. Експерти вважають, що оскільки немає великих відстаней для перевезень у межах країни, може розглядатися швидкість руху 200 – 250 км/год.

Головною проблемою проєкту є його фінансування. Можливий варіант фінансування проєкту Китаєм, а також закупівлі швидкісних поїздів в цій країні.

Проєкти високошвидкісних залізничних ліній, що з'єднають Бухарест з Клуж-Напокою та Яссами (рис. 3.16):

1. Бухарест – Клуж-Напока:

- Довжина: 550 км
- Максимальна швидкість: 200 км/год
- Тип колії: євроколія (1435 мм)
- Очікувана дата відкриття: 2030 рік (перша черга), 2040 рік (повне відкриття)
- Вартість проєкту: €7 мільярдів

2. Бухарест – Ясси:

- Довжина: 350 км
- Максимальна швидкість: 200 км/год
- Тип колії: євроколія (1435 мм)

- Очікувана дата відкриття: 2030 рік (перша черга), 2040 рік (повне відкриття)
- Вартість проєкту: €5 мільярдів



Рис. 3.16. Схема залізниць Румунії. Проєкти високошвидкісних залізничних ліній, що з'єднують Бухарест з Клуж-Напокою та Яссами [121]

Важливо зазначити, що ці плани наразі є попередніми. Остаточні параметри проєктів та терміни їх реалізації можуть бути змінені. Обидві лінії будуватимуться в рамках стратегії Європейської Комісії з інтеграції залізничних систем України, Молдови та Європейського Союзу. Ця стратегія передбачає перехід на євроколію (1435 мм) на всіх основних напрямках в Україні. Реалізація цих проєктів буде мати значний вплив на розвиток України та її інтеграцію до Європейського Союзу.

3.4 Передумови створення високошвидкісних магістралей в Україні

3.4.1 Дослідження організації високошвидкісного руху поїздів в Україні

Проблемою створення в Україні високошвидкісного транспорту більше 50 років займається Дніпропетровський національний універси-

тет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна (зараз Український державний університет науки і технологій). Це спільні роботи з проєктними інститутами Дніпродіпротранс, Київдіпротранс, з Інститутом технічної механіки НАН України.

Співробітниками університету написані монографії й наукові статті з питань ефективності спорудження ВШМ, вибору параметрів та обґрунтування окремих проєктних рішень. Це монографії [103, 105, 122], опубліковані статті та інші праці.

Експериментальні дослідження щодо реалізації високих швидкостей в Україні розпочато в 70-х роках. У 1972-1973 рр. вчені Дніпропетровського відділення інституту механіки Академії наук України та Дніпропетровського інституту інженерів залізничного транспорту провели на ділянці Балівка – Березанівка Придніпровської залізниці дослідні поїздки вагона-лабораторії з реактивною тягою зі швидкістю до 250 км/год. Більшої швидкості розвинути не вдалося через обмеження сили тяги двигунів і довжини прямої ділянки [103].

Мета випробувань полягала не у встановленні рекорду швидкості, а у вивченні взаємодій в системі «колесо-рейка». Результати цих дослідів дозволили перевірити й уточнити методи дослідження стійкості руху рухомого складу й дати науково обґрунтовані рекомендації, спрямовані на вдосконалення ходових частин локомотивів і вагонів з метою збільшення швидкості їх руху і зменшення динамічних навантажень.

У монографії [103] наведені результати європейського досвіду розвитку високошвидкісного залізничного транспорту, проаналізовано транспортні проблеми міських зон. Показана провідна роль залізничного транспорту в ХХІ столітті, його економічні та технічні переваги.

Монографія [122] присвячена розробці теоретико-методологічних підходів і практичних рекомендацій щодо визначення технічних можливостей створення високошвидкісних магістралей (ВШМ) в Україні. Для вирішення цього завдання застосовано системний підхід, який включає аналіз світового досвіду, дослідження передумов до організації високошвидкісного руху поїздів в Україні, проєктування траси ВШМ, що передбачає розробку способів стикування вітчизняної мережі залізниць з європейською, вибір моделі експлуатації ВШМ, проєктування траси ВШМ, розробку вимог і нормативів з проєктування

плану та поздовжнього профілю колії, обґрунтування конструкції залізничної колії, умов взаємодії колії з рухомих складом тощо. Взаємозв'язок між окремими блоками цієї системи наведено на рис. 3.17.

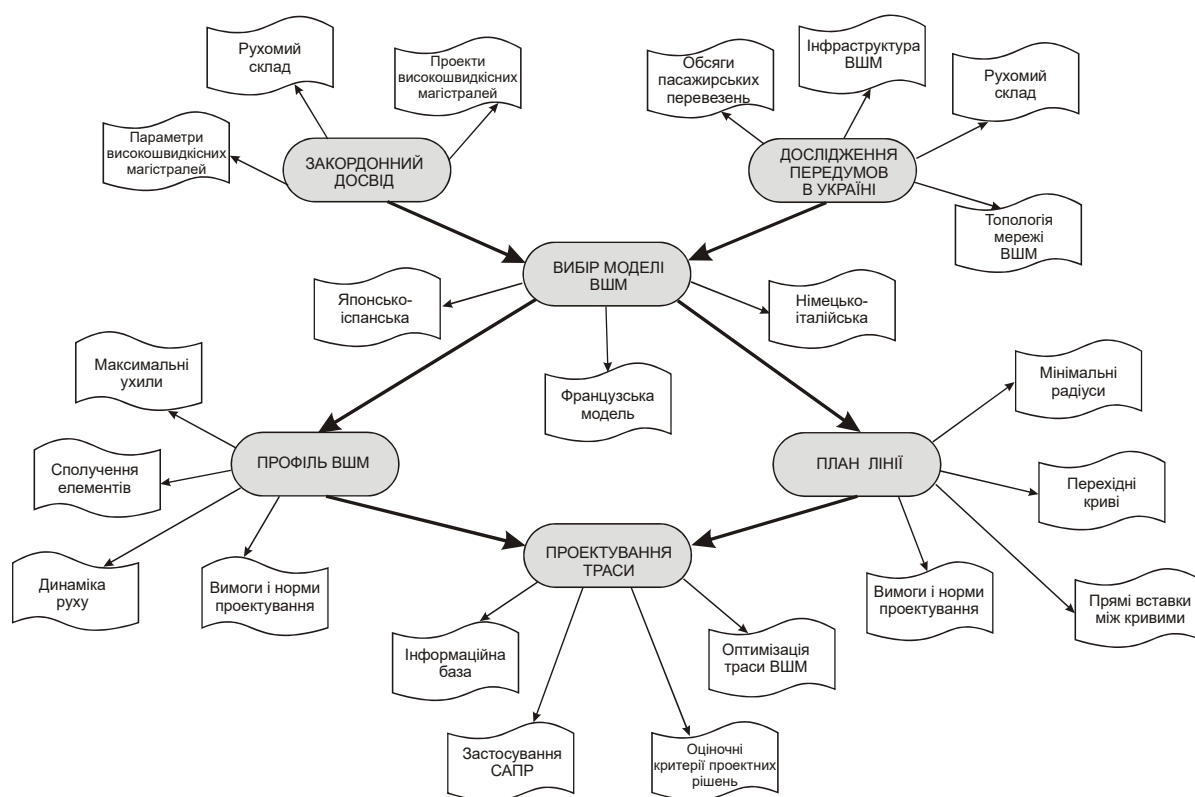


Рис. 3.17. Технологічна схема дослідження організації високошвидкісного руху поїздів в Україні

Ґрунтуючись на результатах вітчизняних і зарубіжних наукових розробок, намічені шляхи вирішення проблеми, що стосуються проектування траси ВШМ і створення високошвидкісної мережі в Україні з урахуванням геополітичних, топографічних та інших умов.

Залізнична мережа України органічно вписується в європейську через Польщу, Словаччину, Угорщину, Румунію, Молдову. Однак вигідне з позиції транспортних перевезень геополітичне розташування України не використовується повною мірою.

Завдання введення в Україні високошвидкісного руху поїздів надзвичайно складні, враховуючи, що в Україні відсутній високошвидкісний рухомий склад, немає відповідної інфраструктури та полігону для дослідницьких випробувань, відсутні відповідні кадри.

Розвиток високошвидкісних магістралей окремих європейських країн, а потім створення загальноєвропейської високошвидкісної залізничної мережі, поставили питання про сумісність технічних пристроїв окремих національних ВШМ між собою (рухомого складу і стаціонарних пристроїв). В Україні ці питання знаходяться в стадії досліджень, оскільки потребують удосконалення закордонні методики розрахунку перспективної мобільності населення України з урахуванням транзиту, організаційні й технічні передумови впровадження високошвидкісного руху (вибір основних концептуальних підходів до інфраструктури, системи електропостачання, габаритів рухомого складу й наближення споруд, пристроїв управління й організації високошвидкісного руху тощо) [122].

Актуальним завданням сьогодні є розробка теоретико-методологічних підходів і практичних рекомендацій щодо визначення технічних можливостей створення високошвидкісних магістралей в Україні за європейським стандартом. Перехід на європейську колію довготермінова перспектива, тому вже сьогодні слід зробити його одним із пріоритетних напрямів та максимально залучати іноземних інвесторів і, зокрема, Європейський Союз, який усе більше демонструє зацікавленість в інтеграції України у свою економіку та логістичну інфраструктуру [78]. Впровадження високошвидкісного руху дозволило б знизити екологічне навантаження від транспорту на довкілля, підвищити мобільність населення України, покращити транспортні зв'язки між регіонами України, інтегрувати до мережі залізниць Європи, створити конкурентне середовище на ринку транспортних послуг, стимулювати науково-технічний прогрес на вітчизняних підприємствах зі створення зразків техніки світового рівня.

У червні 2017 року на рівні Міністерства інфраструктури України почалося обговорення створення прямого пасажирського залізничного сполучення між Львовом та Варшавою через Раву-Руську. Зазначимо, саме через Раву-Руську у 1920-1930 рр. курсували швидкі поїзди Львів – Варшава. Загальна довжина цього маршруту становить близько 330 км. Для реалізації проєкту запуску пасажирських поїздів Львів – Варшава необхідно перебудувати під європейський стандарт (1435 мм) малодіючу залізницю Рава-Руська – Львів (Брюховичі) довжиною 58 кілометрів. Початково цю колію прокладали не як магістральну, а як локальну, тому від Львова до Жовкви зустрічаються ділянки

із кривими малого радіуса, які поїзди мають проходити на малих швидкостях.

Під час XX Міжнародного економічного форуму у Львові було повідомлено, що в Україні працюють над реалізацією проєкту швидкісного сполучення між Києвом та Варшавою шириною колії 1435 мм. А на початку липня 2022 р. під час конференції в Лугано Укрзалізниця представила міжнародним інвесторам ідею побудови високошвидкісної магістралі (ВШМ) за маршрутом Київ – Варшава, яка має забезпечувати швидкість 250-350 км/год.

Ініціативу створення Транспортного вузлу «Солідарність» (STH) поблизу Варшави взяла на себе польська компанія «Центральний комунікаційний порт Польщі (Centralny Port Komunikacyjny, СРК)», що дозволить дістатися до столиці Польщі з 10 напрямків країни менш ніж за 2.5 години [27]. Польська сторона вже проєктує високошвидкісну залізницю «спиця № 5» між Травниками та Белжецем, що проходитьиме найближче до українського кордону та дозволить продовжити її до Львова, якщо таке рішення буде прийнято на міжурядовому рівні. На даний момент компанія СРК готує техніко-економічне обґрунтування (ТЕО) для «спицевої» ділянки №5: Травники – Замостя – Томашув Любельський – Белжець. Згідно з графіком, будівельні роботи між Травниками та Замостям мають завершитися до кінця 2027 року. Стосовно ділянки від Замостя до Белжеця, введення в експлуатацію заплановано на 2032 рік [79].

У СРК припускають, що підготовлена компанією ділянка «спиця №5» буде готова до продовження у бік Львова й Києва (рис. 3.18). Ця лінія також дозволить обслуговувати на своєму маршруті й такі міста України як Тернопіль, Хмельницький і Вінниця.

Продовження ділянки ВШМ, що проєктується у бік Львова, узгоджується з представленим Єврокомісією планом реконструкції України та концепцією розширення коридорів TEN-T на території України. З точки зору STH, найбільш вигідним на даний момент є будівництво нової ВШМ європейського стандарту 1435 мм на ділянці Рава-Руська – Львів – Київ, яка б дозволила експлуатувати рухомий склад без зміни ширини колії.

Польська компанія «Центральний комунікаційний порт Польщі (СРК) 19 січня 2023 р. підписала з «Укрзалізницею» угоду про спів-

працю, що передбачає більш тісне співробітництво у сфері будівництва нової залізничної інфраструктури, у тому числі високошвидкісної залізниці [79].

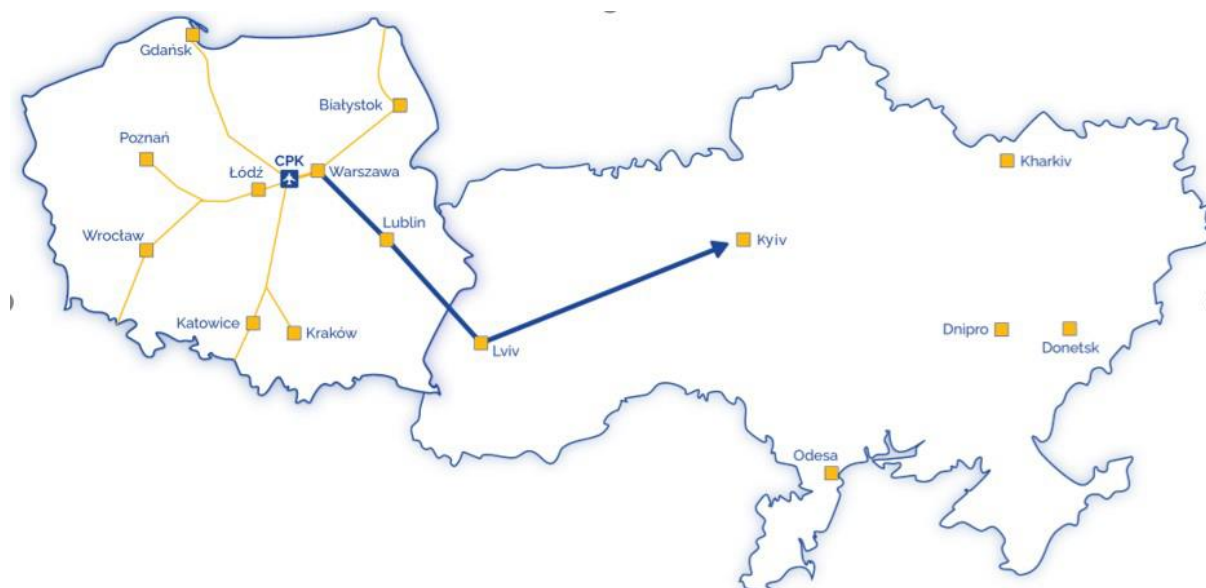


Рис. 3.18. Графіка СРК: ВШМ до Львова

Однією з найважливіших цілей підписаної угоди є розвиток нових транскордонних сполучень з європейською колією 1435 мм, зокрема будівництво лінії високошвидкісної залізниці (HSR). Документ передбачає спільну підготовку техніко-економічного обґрунтування запланованої нової залізничної лінії між Польщею та Україною. Угода вказує на необхідність будівництва високошвидкісної лінії за маршрутом Варшава – Львів – Київ з передбачуваною максимальною робочою швидкістю 250 км/год. У довгостроковій перспективі розвиток транспортної інфраструктури буде дуже важливим елементом відбудови України. Угода спрямована на покращення залізничного сполучення між Україною, Польщею та ЄС, полегшення пасажирських перевезень, покращення економічного обміну та посилення безпеки транспортних коридорів. Зазначається, що компанія СРК та УЗ спільно шукатимуть можливості отримати кошти ЄС для запланованих ліній. У рамках співпраці планується впровадження стандартів ЄС у сфері проектування, будівництва та обслуговування залізничної інфраструктури, включаючи автоматизацію та телекомунікації [26].

Метою дослідження є аналіз різних сценаріїв організації високошвидкісного руху в найбільш розвинених країнах і на цій основі оцінка

можливостей України в підготовці до проектування і будівництва високошвидкісних магістралей. Дослідження базується на аналізі наукових розробок з проблеми проектування високошвидкісних магістралей, узагальнення початкового досвіду проектних інститутів і навчальних закладів з визначення першочергових напрямків трас і розробці так званих «пілотних» проектів високошвидкісних магістралей в Україні.

Впровадження високошвидкісного залізничного сполучення має на меті вихід транспортної системи України на світовий рівень за технічними параметрами та якістю послуг. Для цього потрібно, перш за все, розробити технічні вимоги і норми проектування траси високошвидкісної магістралі, обґрунтувати максимально допустиму швидкість, раціональні конструкції колійної інфраструктури та дослідити динамічні процеси взаємодії залізничної колії з високошвидкісним рухомим складом.

Забезпечення мобільного руху поїздів, перш за все з країн ЄС, є актуальним завданням для України. 1 грудня 2022 року в будівлі Сенату Республіки Польща відбулася конференція «Україна в системі залізничної інфраструктури Європейського Союзу». Фахівці Українського державного університету науки і технологій висвітлили програму науково-технічного супроводження реалізації проекту, що передбачає впровадження європейської колії (1435 мм) на території України. Таке рішення дозволяє поетапний перехід України на європейський стандарт, щоб поєднати українські залізниці з ЄС.

Євроколію для швидкісних перевезень планують будувати від кордону з Польщею у Мостиськах та Раві-Руській до Львова, між Львовом і Києвом та Чопом, а також від Львова до кордону з Румунією. Це частина стратегії з інтеграції залізничних мереж України, яку розробили Європейська комісія і Європейський інвестиційний банк [22].

Як впливає з пропозицій Європейської комісії і Європейського інвестиційного банку, нова магістральна мережа колії 1435 мм працюватиме паралельно з існуючою – 1520 мм. При будівництві колії європейського стандарту можливі різні сценарії, а саме:

1. На головній колії укладається суміщена колія –1435/1520 мм (див. розділ 2, п. 2.4)

2. Існуюча двоколійна ділянка перебудовується на дві одноколійні з шириною колії 1435 і 1520 мм (див. розділ 2, п. 2.5)

3. Проектується залізнична колія європейського стандарту на новій трасі (поточний розділ).

Для порівняння варіантів: перебудова існуючої залізниці, укладання суміщеної колії, будівництво європейської колії для впровадження в Україні високошвидкісного руху поїздів авторами розроблена модель прогнозування й оцінки ефективності здійснення залізничних перевезень з урахуванням усіх витрат за показником NPV [17].

При дослідженні полігона майбутньої мережі ВШМ доцільно розглядати напрямки, які вже мають залізничні лінії. Транспортні потоки на таких напрямках найбільш інтенсивні. Таким чином, наявність залізниці – один з важливих критеріїв визначення напрямків, перспективних для організації високошвидкісного руху поїздів.

Розглянемо більш докладно сценарій проектується залізничної колії європейського стандарту на новій трасі на прикладі напрямків Варшава – Ягодин – Київ (північний хід) і Варшава – Львів – Київ (південний хід).

3.4.2 Проектування залізничної колії європейського стандарту на новій трасі (північний хід)

Північний хід. За пропозицією урядів Польщі й України коридор Гданськ – Варшава – Люботин – Ягодин – Ковель – Здолбунів – Шепетівка – Козятин – Одеса в 1997 році одержав статус загальноєвропейського. Відгалуження від цього коридору до Києва дозволило б з'єднати столицю України через Варшаву з Берліном та іншими європейськими столицями.

Будівництво євроколії Київ – Варшава дасть змогу об'єднати дві європейські столиці швидкісним транспортом. Вважалося, що напрямок нової траси максимально повторить контури існуючої залізничної магістралі Київ – Коростень – Сарни – Ковель – Ягодин. Ця магістраль, яка спершу мала назву Поліська, споруджувалася наприкінці XIX – початку XX століть саме як стратегічна і мала скоротити шлях між Києвом і Варшавою.

В роботі розглянуто варіант нової траси ВШМ запропонований науково-дослідним та проектно-вишукувальним інститутом транспортного будівництва «Київдипроторанс» в напрямку Держкордон – Ягодин – Ковель – Київ (493 км), як найбільш прийнятний для подальшого

проектування (рис. 3.19). Надана загальна інвестиційна оцінка проекту, орієнтовна вартість будівництва ВШМ Держкордон – Ягодин – Київ, а також міркування стосовно її будівництва. Загальна довжина Київ – Ягодин – Варшава становить 730 км.

Траса високошвидкісної магістралі прокладена по освоєній території з розвинутим сільським господарством, тому смуга відведення прийнята мінімальною з урахуванням розміщення конструктивних елементів земляного полотна, водовідвідних споруд, снігозахисту, лінії електропередачі ЛЕП 10 кВ, постійної огорожі з обох боків магістралі та притрасової автодороги. Середня ширина смуги відведення орієнтовно прийнята 70 м. Грошова оцінка земель сільськогосподарського призначення проводиться окремо по орних землях, землям під багаторічній насадження, природним косовицям і пасовищам, відповідно до Методики грошової оцінки земель сільськогосподарського призначення і населених пунктів.

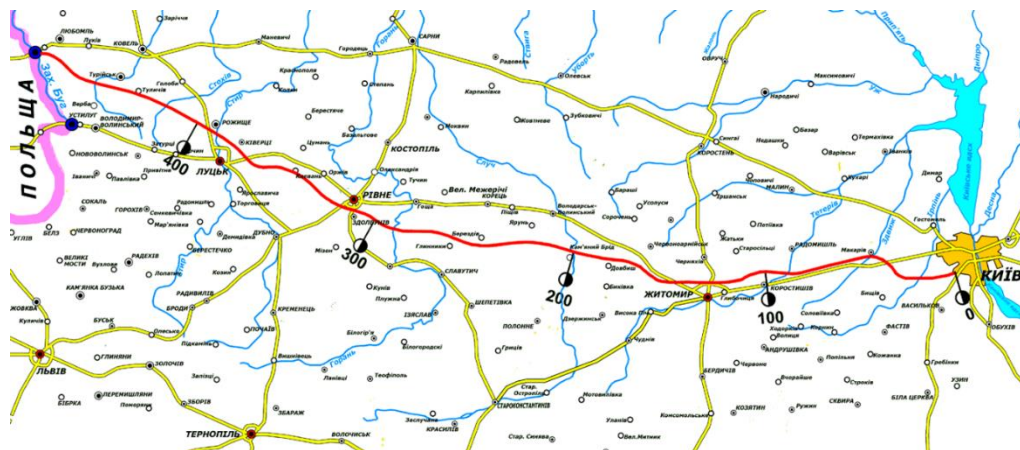


Рис. 3.19. План траси Держкордон – Ягодин – Ковель – Київ

Враховуючи високу цінність сільгоспугідь, по яким проходить траса ВШМ, відкриття притрасових кар'єрів ґрунту обмежено. При цьому, основною транспортною схемою доставки ґрунтів буде поїзна по існуючій мережі залізниць від кар'єру до найближчої станції, перевантаження на автотранспорт і доставка до місця відсіпання насипу.

При оцінці ефективності варіантів в програму вводяться прогнозні інвестиції для будівництва нової ВШМ європейського стандарту. Згідно проекту «Київдіпроторанс» Держкордон – Ягодин – Ковель – Київ загальна кошторисна вартість у 2008 р. склала 41.9 млрд грн, тобто на 1 км колії 83.8 млн грн або 12.0 млн євро; напрямок Київ – Конотоп –

Держкордон загальна вартість у 2011 р. склала 68.6 млрд грн, на 1 км – 218.5 млн грн або 19.3 млн євро. Для порівняння, лінія Ухань – Гуанчжоу (Китай), довжина якої становить 1069 км, коштувала 116.6 млрд юанів або 14.2 млн євро. Отже, можна прийняти прогнозну вартість будівництва 1 км ВШМ 15-20 млн євро на 1 км, що відповідає досвіду зарубіжного будівництва.

За розрахунками будівельна вартість улаштування земляного полотна ВШМ складає близько 20% (рис. 3.20)

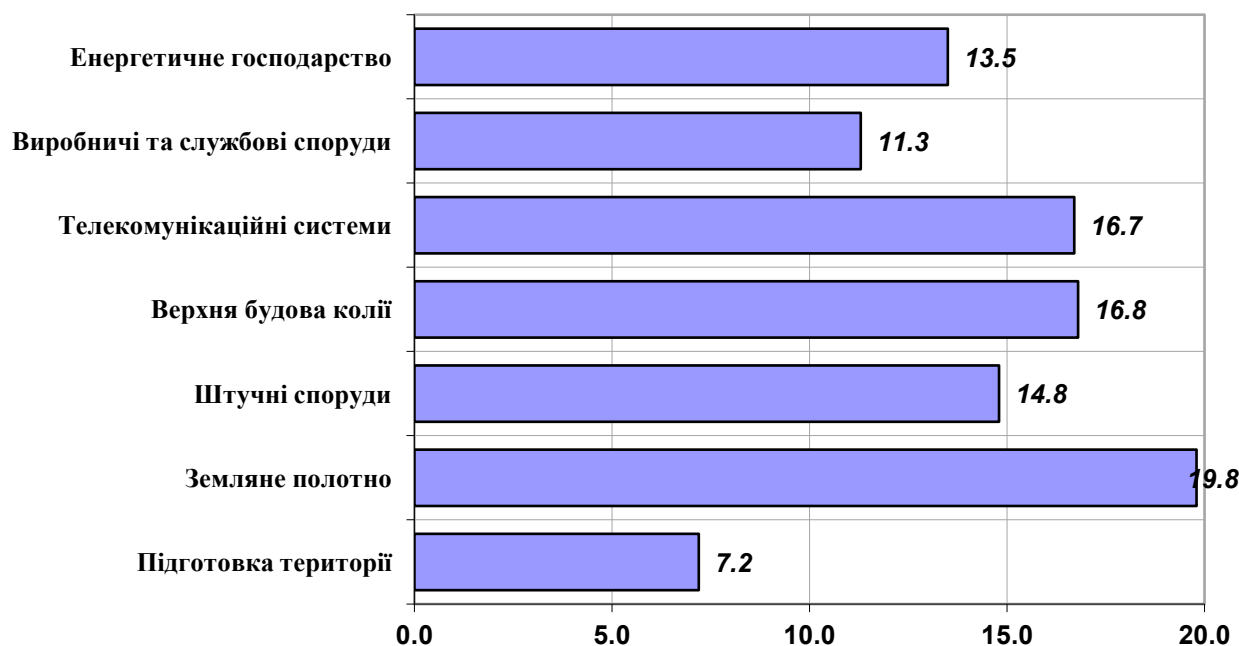


Рис. 3.20. Складові вартості будівництва ВШМ, %

За прогнозом перспективних розмірів пасажирських перевезень у сполученні Києва з Варшавою встановлено відсутність обсягів, достатніх для окупності проекту для реалізації суто пасажирського руху. Подальше дослідження проведено з метою визначення умов, за яких буде ефективним використовувати ВШМ європейської колії 1435 мм для міжнародних пасажирських перевезень і прискорених перевезень вантажів в контейнерах чи на платформах. З цією метою були виконані розрахунки за методикою [17] для різних значень обсягів пасажирських перевезень N , пар поїздів/добу і прискорених вантажних перевезень G , млн тонн/рік напрямку Варшава – Ягодин – Київ (північний хід) і Варшава – Львів – Київ (південний хід).

Позначимо множини значень N і G як $N = \{5, 10, 15, 20, 25\}$ і $G = \{20, 25, 30, 35, 40\}$. Тоді можливі комбінації можна записати як декартовий добуток (перетин множин) між N і G . У загальному вигляді це буде виглядати так

$$(N, G) = \{(x, y) \mid x \in N, y \in G\} \quad (3.1)$$

Тепер, підставивши значення N і G , отримаємо всі можливі комбінації. Для наведеного прикладу це такі комбінації: N і $G = \{(5, 20), (5, 25), (5, 30), (5, 35), (5, 40), (10, 20), (10, 25), (10, 30), \dots\}$. Отже, є 25 можливих комбінацій (пар) значень N і G , в яких N може бути одним з чисел 5, 10, 15, 20 або 25, а G може бути одним з чисел 20, 25, 30, 35, 40.

Результати дослідження для північного ходу наведені в табл. 3.10.

Таблиця 3.10

Наростаючий підсумок чистого дисконтованого доходу $\sum_{t=1}^{t=T} NPV_t$ (напрямок Варшава – Ягодин – Київ)

| Вартість, млн євро/км | Число пар пасажирських поїздів на добу | | | | |
|-----------------------------|--|------|------|------|------|
| | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 |
| 20 | -1427 | 191 | 1799 | 3417 | 5033 |
| 15 | -666 | 952 | 2560 | 4178 | 5794 |
| | Обсяги вантажних перевезень, млн тонн на рік | | | | |
| | 20 | 25 | 30 | 35 | 40 |
| 20 | -743 | 565 | 1883 | 3191 | 4499 |
| 15 | 779 | 2087 | 3405 | 4713 | 6021 |

За даними табл. 3.10 при різних комбінаціях (формула 3.1) побудовані графіки (рис. 3.21), аналіз яких дає можливість встановити орієнтовні обсяги перевезень, при яких буде забезпечена окупність північної ВШМ.

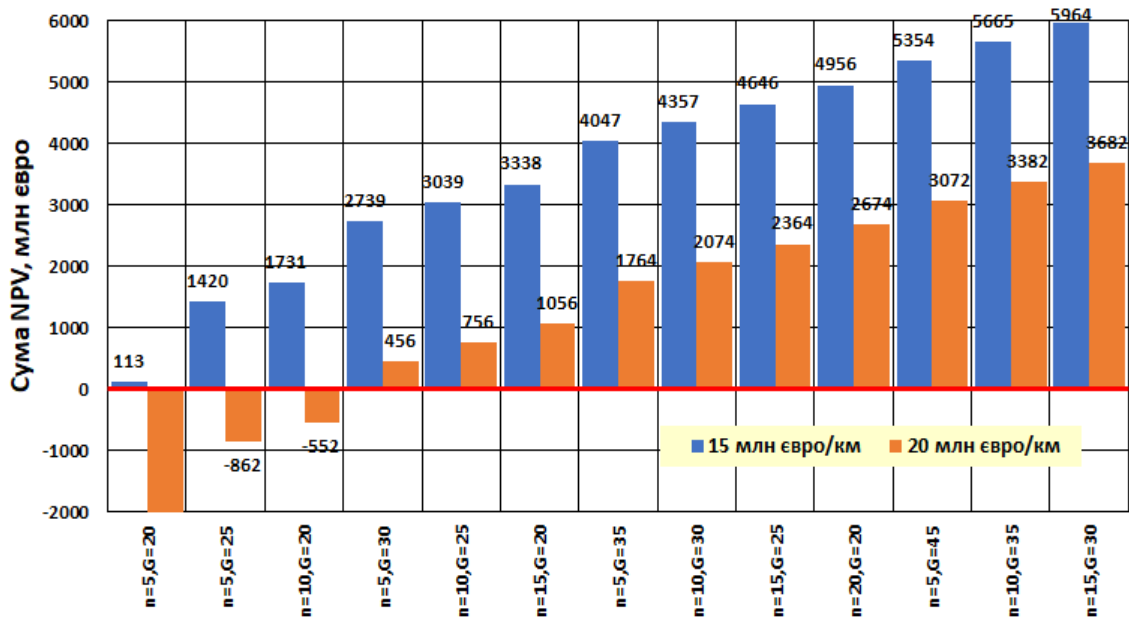


Рис. 3.21. Залежність $\sum_{t=1}^{t=T} NPV_t$ NPV від обсягів перевезень і вартості будівництва на напрямку Варшава – Ягодин – Київ

Так, ефективність будівництва ВШМ на новій трасі буде забезпечена при вартості будівництва 15 млн євро/км за таких обсягів перевезень: 5 пар пасажирських поїздів і 20 млн тонн вантажних перевезень; при вартості 20 млн євро/км відповідно – 5 пар пасажирських і 30 млн тонн вантажів на рік. Можуть бути й інші комбінації, наприклад, при вартості будівництва 20 млн євро/км обсяг пасажирських перевезень 10 пар поїздів на добу і 25 млн тонн рік вантажних перевезень.

3.4.3 Проектування залізничної колії європейського стандарту на новій трасі (південний хід)

Південний хід. Завдання на розробку Концепції організації високошвидкісного руху поїздів в Україні було поставлено Академією наук України і Укрзалізницею ще в 90-ті роки ХХ століття. У 1992-1993 рр. Дніпропетровський державний проектно-вишукувальний інститут «Дніпродіпротранс» зробив вибір напрямку траси високошвидкісної магістралі (рис. 3.22). Зазначимо, що траса прокладалася під колію шириною 1520 мм і максимальну швидкість 220 км/год з відхилен-

ням від найкоротшого напрямку лише у важких топографічних умовах, а також для обходу населених пунктів, історичних заповідників, великих водойм та ін.



Рис. 3.22. Варіант ВШМ Київ – Шепетівка – Львів – Західний кордон

Ці розробки були включені в топологію мережі швидкісних і високошвидкісних залізниць Східної Європи.

Траса ВШМ Київ – Львів перетинає 4 області: Київську, Житомирську, Хмельницьку й Львівську. Будівельна довжина – 477 км, що надає скорочення відносно існуючої залізниці на 114 км. При цьому загальну потребу у відведенні земель під ВШМ на ділянці Київ – Львів визначено у 2610 га. Загальна довжина Київ – Львів – Варшава становить 806 км.

Прийнята така схема розміщення роздільних пунктів: Київ – головна пасажирська станція, Житомир, Шепетівка, Львів – дільничні станції, а проміжні станції розташовуються між дільничними і слугують для посадки-висадки пасажирів.

Окрім звичайних пасажирів необхідно враховувати й транзитних, але надати точний прогноз транзитних пасажирів для конкретних напрямків дуже складно, оскільки це залежить від багатьох факторів, які можуть змінюватися з часом. Напрямок Київ – Львів проходить через центральні та західні регіони України, тому його можуть обирати транзитні пасажирів, які пересуваються між містами цих регіонів. Напрямок Київ – Варшава зв'язує дві столиці, що може збільшити кількість пасажирів, які мандрують в бізнес-цілях або для туризму. Залежно від економічної активності в кожному місті, транзитні пасажирів можуть складати велику частку пасажиропотоку. Наявність добре розвинутої

транспортної інфраструктури та зручних зв'язків на кожному напрямку може залучати більше транзитних пасажирів. Політична та соціальна ситуація у країнах і містах, через які проходять напрямки, також може впливати на транзитний рух. Окреслене питання потребує додаткових досліджень, результати яких можуть суттєво впливати на ефективність проекту ВШМ.

Автори в роботі [28] показали, що врахування кількості населення, що тяжіє до ВШМ, і обсягів перевезень транзитних пасажирів недостатньо, щоб отримати нормативну окупність інвестицій. виправити таке положення може тільки, як було зазначено вище, впровадження суміщеного руху швидкісних пасажирських і прискорених вантажних поїздів.

Результати дослідження для південного напрямку ВШМ наведені в табл. 3.11.

За даними табл. 3.11 побудовані графіки (рис. 3.23), аналіз яких дає можливість встановити орієнтовні обсяги перевезень, при яких буде забезпечена окупність південної високошвидкісної магістралі.

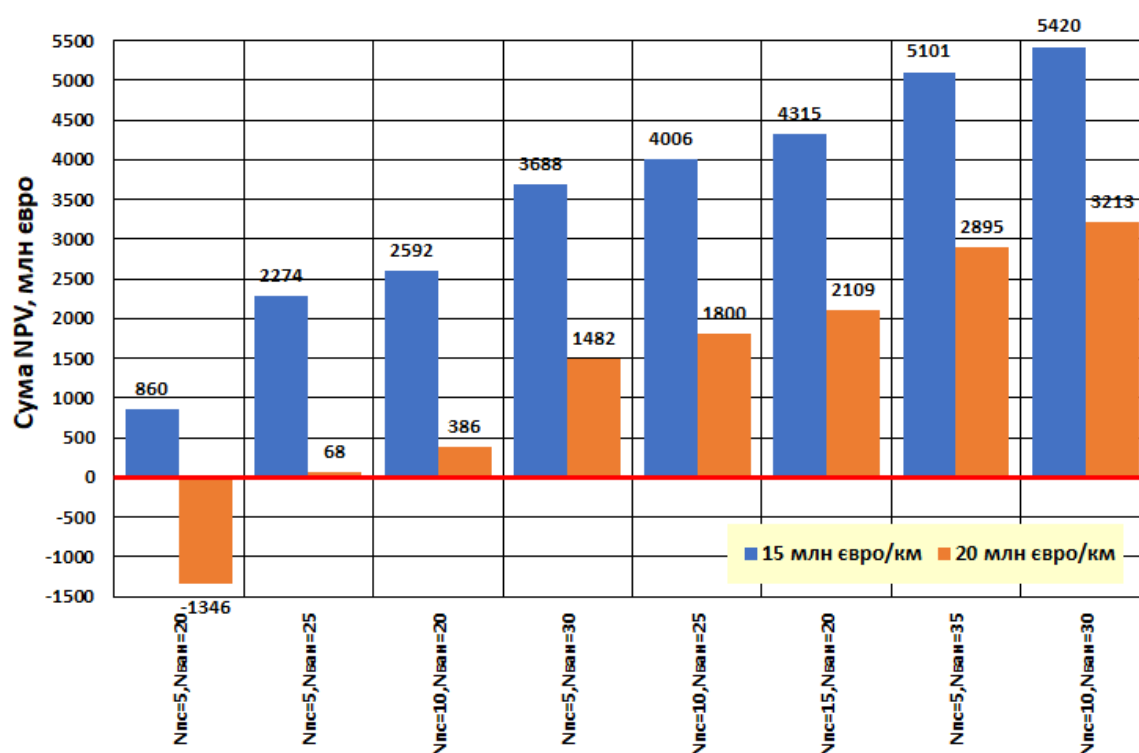


Рис. 3.23. Залежність $NPV \sum_{t=1}^{t=T} NPV_t$ від обсягів перевезень і вартості будівництва на напрямку Варшава – Львів – Київ

Наростаючий підсумок чистого дисконтованого доходу $\sum_{t=1}^{t=T} NPV_t$ (напрямок Варшава – Львів – Київ)

| Вартість, млн євро/км | Число пар пасажирських поїздів на добу | | | | |
|--------------------------|--|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 |
| 20 | -1212 | 520 | 2243 | 3975 | 5698 |
| 15 | -478 | 1254 | 2977 | 4709 | 6432 |
| | Обсяги вантажних перевезень, млн тонн на рік | | | | |
| | 20 | 25 | 30 | 35 | 40 |
| 20 | -134 | 1280 | 2694 | 4108 | 5513 |
| 15 | 1338 | 2752 | 4166 | 5580 | 6985 |

Отже, ефективність будівництва ВШМ на новій трасі буде забезпечена при вартості будівництва 15 млн євро/км за таких обсягів перевезень: 5 пар пасажирських поїздів і 20 млн тонн вантажних перевезень; при вартості 20 млн євро/км відповідно – 5 пар пасажирських і 25 млн тонн вантажів на рік. Можуть бути й інші комбінації, наприклад, при вартості будівництва 20 млн євро/км обсяг пасажирських перевезень 10 пар поїздів на добу і 20 млн тонн рік вантажних перевезень [80]. Щоб отримати чистий дисконтований дохід, наприклад 5 млрд євро, на південному ході потрібно мати обсяги перевезень 15 пар пасажирських поїздів і 35 млн тонн вантажних перевезень, а на південній трасі відповідно 15 пар поїздів і 30 млн тонн для перевезення вантажів.

3.5 Системний підхід до проектування високошвидкісних магістралей в Україні для інтеграції з європейською мережею

3.5.1 Будівництво ВШМ для інтеграції України з Європейським Союзом

Будівництво високошвидкісних залізничних магістралей (ВШМ) в Україні є стратегічно важливим завданням для розвитку країни та її інтеграції з Європейським Союзом. Стратегія транспортної інфраструктури

ктури ЄС, як визначено в Керівних принципах TEN-T [42], зосереджується на покращенні якості транспортної інфраструктури за рахунок нових інвестицій та ефективного використання існуючої інфраструктури з метою покращення доступності, мобільності й безпеки.

З 2000 року ЄС надав 23/7 мільярда євро спільного фінансування для підтримки інвестицій у високошвидкісну залізничну інфраструктуру. У теперішній час в Європі загальна довжина ВШМ складає на 2023 р. близько 15 тис км з урахуванням того, що деякі лінії знаходяться в процесі будівництва або проєктування. Метою ЄС було потроїти кількість кілометрів високошвидкісних залізничних ліній до 2030 року. В той же час Комісія відмічає, в Європі існує мережа національних високошвидкісних ліній, яка побудована без належної міждержавної координації: високошвидкісні лінії, що перетинають національні кордони, не входять до числа національних пріоритетів будівництва, навіть незважаючи на те, що були підписані міжнародні угоди та включено положення до Регламенту TEN-T, які вимагають коридорів основної мережі [124].

Актуальним завданням є розробка наукових підходів і практичних рекомендацій щодо визначення технічних можливостей створення високошвидкісних магістралей в Україні.

Європейська комісія та Європейський інвестиційний банк розробили стратегію з інтеграції залізничних мереж України, Молдови та Євросоюзу. Основний висновок проведеного дослідження полягає в необхідності побудови в Україні та Молдові нової магістральної мережі колії 1435 мм, яка працюватиме паралельно з теперішньою мережею 1520 мм на двох принципових засадах, по-перше, євроколія 1435 мм буде призначена для швидкісних перевезень, по-друге, розвиток магістральної мережі 1435 мм здійснюватиметься поетапно – з заходу на схід [22].

Основними містами, з яких будуть ходити поїзди за кордон, стануть Київ, Харків, Львів та Одеса. Згідно з новим проєктом, поїзди будуть рухатися зі швидкістю до 350 кілометрів на годину. Новий маршрут дозволить значно скоротити час руху до столиці.

Створення ВШМ в Україні є вимогою часу та відкриває широкі перспективи для розвитку країни. Розглянемо деякі питання вибору напрямку і прокладання траси ВШМ для інтеграції з європейською мережею.

3.5.2 Проблеми вибору напрямку ВШМ

Розглянемо проблему вибору напрямків ВШМ на прикладі пілотних проєктів, що розглядалися в Україні.

Для вирішення завдання щодо впровадження в Україні високошвидкісного транспорту потрібен системний підхід, який включає аналіз світового досвіду, дослідження передумов до організації високошвидкісного руху поїздів в Україні, вибір моделі експлуатації ВШМ, проєктування траси ВШМ, що передбачає розробку вимог і нормативів з проєктування плану та поздовжнього профілю колії (див. рис. 3.17) [125].

Згідно з прийнятими рішеннями IV Всесвітнього Форуму «EurailSpeed 2002», були внесені корективи в розвиток високошвидкісного руху в Україні. Так, першочерговим напрямком уведення високошвидкісного руху поїздів як за попередніми [126], так і наступними розрахунками [127] визначена ділянка Київ – Полтава – Харків.

Передпроєктні розробки були виконані Державним проєктно-вишукувальним інститутом Київдіпротранс [128]. Основні критерії вибору напрямку проходження траси базувалися на збалансованому урахуванні таких принципово важливих вимог, як максимальне скорочення довжини ВШМ, забезпечення оптимальних техніко-експлуатаційних і будівельних показників лінії (скорочення кількості кривих, великих штучних споруд, обсягів земляних робіт, знос будівель тощо), скорочення площі займаних земель, забезпечення нормативних екологічних та санітарних вимог у зоні впливу ВШМ.

Траса лінії прокладалась з відхиленням від найкоротшого напрямку тільки у важких топографічних умовах, а також для обходу населених пунктів, історичних заповідників (Полтава), великих водойм та ін. За результатами аналізу був визначений найбільш раціональний варіант, який і був рекомендований для подальших розробок [129, 130] (рис. 3.24) (показано червоним кольором).

Норми проєктування високошвидкісної магістралі прийнято на основі чинних нормативних і директивних документів у галузі залізничного транспорту та рекомендацій: Європейських нормативних документів у галузі високошвидкісного залізничного транспорту; Європейських вимог щодо сумісності інфраструктури, затверджених Директивою 96/48/ЄС у редакції Директиви 2004/50/, а також інших нормативних документів [125, 128].

Високошвидкісна магістраль проектується двоколіною з шириною колії 1435 мм на максимальну (розрахункову) швидкість руху пасажирських поїздів до 350 км/год при статичному навантаженні на вісь не більше 170 кН. Інфраструктура ВШМ проектується з електричною тягою на змінному струмі за системою 2×25 кВ, 50 Гц.

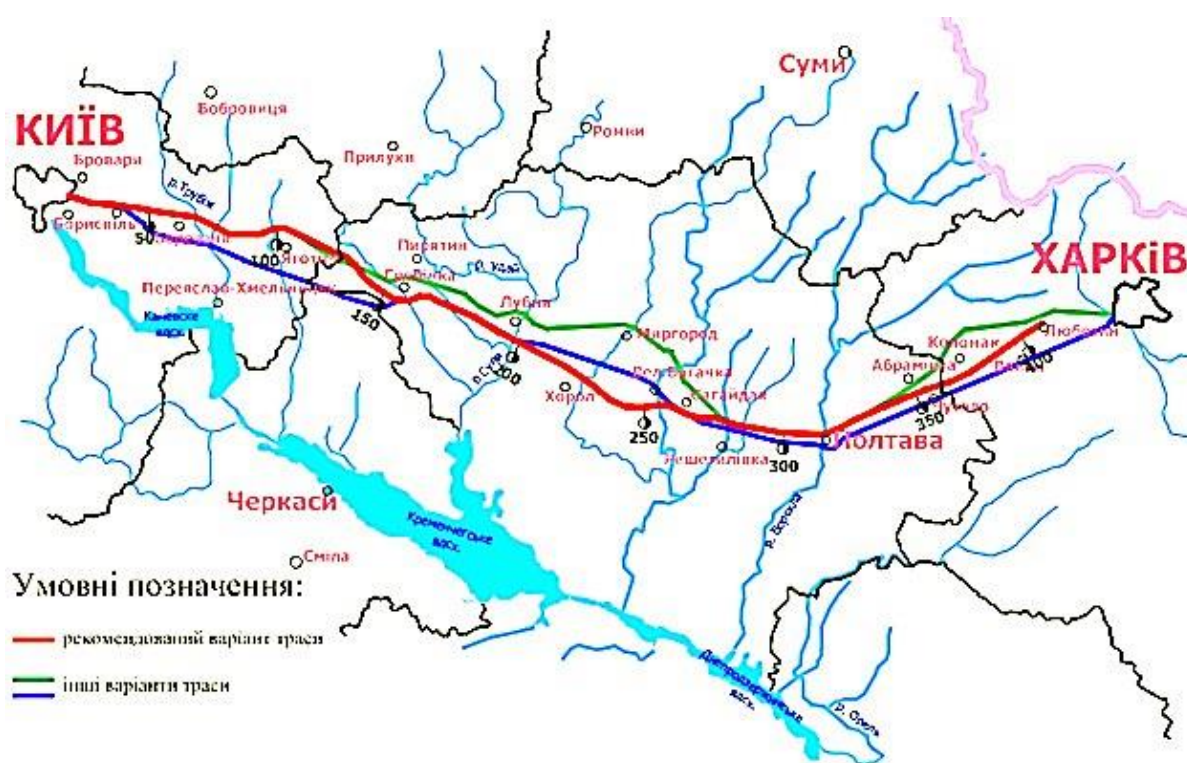


Рис. 3.24. Варіанти ВШМ Київ – Полтава – Харків

Роздільні пункти (станції, обгонні пункти, диспетчерські пункти), їх розміщення, колійні схеми, технічне оснащення – найважливіші питання формування ВШМ, оскільки в значній мірі визначають рівень їх експлуатаційної життєдіяльності. Аналізуючи світовий досвід, можна виділити два підходи – японський і західноєвропейський. Японський варіант характеризується практично повною ізоляваністю колійних обладнань ВШМ від звичайних залізниць. Це викликало необхідність спорудження на всій ВШМ нових пасажирських станцій з повним комплексом обладнань. Для забезпечення зручностей пасажиром в пересадці з поїздів існуючої мережі на високошвидкісні, ці станції по можливості суміщають на одній площадці зі станціями звичайних доріг. Західноєвропейський варіант передбачає використання існуючих станцій, як правило реконструйованих і розширених.

Оскільки в Україні розглядається варіант ВШМ європейського стандарту (1435 мм), а всі інші існуючі колії мають ширину 1520 мм, то рекомендується прийняти японський варіант з ізольованістю колійних обладнань ВШМ від звичайних залізниць.

Необхідно відмітити, що в країнах, які не входять до ЄС, але мають ВШМ: Японія, Південна Корея, Тайвань, США, КНР розроблені та діють свої нормативні бази, що забезпечують процеси розробки, проектування, будівництва, виробництва, експлуатації та обслуговування ВШМ, їх компонентів та пристроїв. У Японії та США ця нормативна база складалася в результаті самостійних розробок та у деяких питаннях має розбіжності з нормами ЄС. Південна Корея створювала ВШМ під великим впливом Франції, Тайвань – Японії, КНР успішно акумулювала та адаптувала до своїх умов досвід кількох провідних у галузі високошвидкісного залізничного руху країн.

3.5.3 Застосування системи автоматизованого проектування (САПР)

Для проектування ВШМ був застосований програмний продукт AutoCAD Civil 3D. Він базується на технології інформаційного моделювання будівель (BIM) та призначений для інженерів, які працюють над проектами транспортних споруд, об'єктів землеустрою та водоохоронних споруд. Розробником програмного забезпечення САПР AutoCAD Civil 3D є компанія Autodesk, Inc. (США) [131]. Civil 3D призначений для інженерів, які працюють над проектами транспортних споруд, об'єктів землеустрою та водоохоронних споруд. Програмне середовище AutoCAD Civil 3D дозволяє створювати більш складні та інформаційно насичені проекти завдяки підвищенню продуктивності платформи та розширенню користувальницького функціоналу.

На основі наявних матеріалів супутникової зйомки місцевості було сформовано цифрову модель місцевості (ЦММ) для подальшого проектування траси. Пошук необхідної ділянки місцевості здійснювався з використанням програми Google Earth, що відображає вигляд Землі із супутника

Для пошуку необхідної ділянки проектування ВШМ вводяться перше та останнє пункти розташування траси. Для прикладу наведена ділянка високошвидкісної магістралі Львів – Тернопіль і Тернопіль – Шепетівка (рис. 3.25, 3.26).



Рисунок створено авторами на основі даних Google Maps. © Google, 2025

Рис. 3.25. План ділянки місцевості Львів – Тернопіль – Шепетівка

Надалі здійснюється імпорт поверхні ділянки з Google Earth до AutoCad Civil 3D. Можливість використання в AutoCAD Civil 3D даних про місцевість у вигляді цифрової моделі рельєфу та растрового супутникового зображення цікавить на етапі, коли відсутня детальна топографічна зйомка місцевості.

Імпортована з Google Earth цифрова модель рельєфу разом із супутниковим зображенням та оцифрованою ситуацією є основою для начотного візуального представлення місцевості у проєктах об'єктів інфраструктури.

У Civil 3D для створення моделі рельєфу використовується нерегулярна триангуляційна мережа (TIN). Поверхні TIN формуються на основі інформації про горизонталі, точки та структурні лінії. Отримана цифрова модель місцевості використовувалася для проєктування плану траси (рис. 3.27).

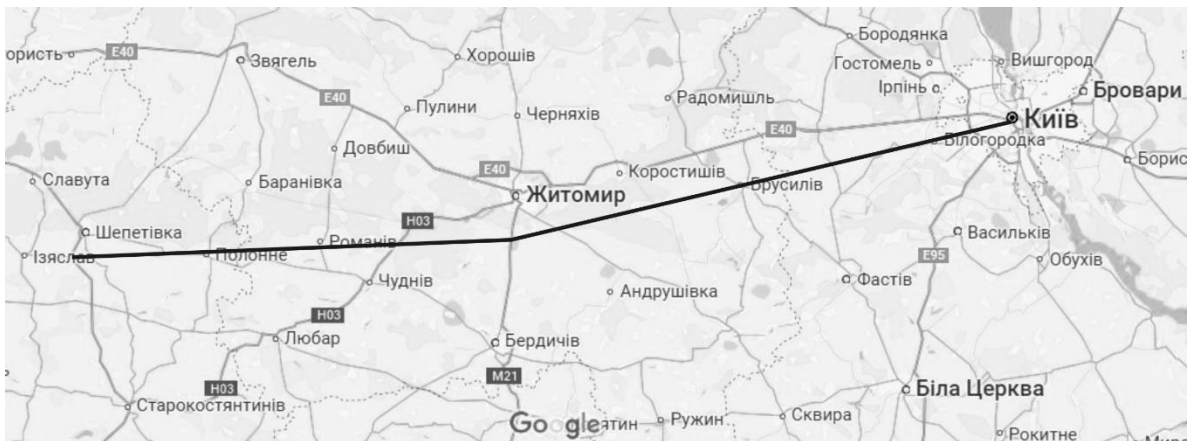


Рисунок створено авторами на основі даних Google Maps. © Google, 2025

Рис. 3.26. План ділянки місцевості Шепетівка – Житомир – Київ

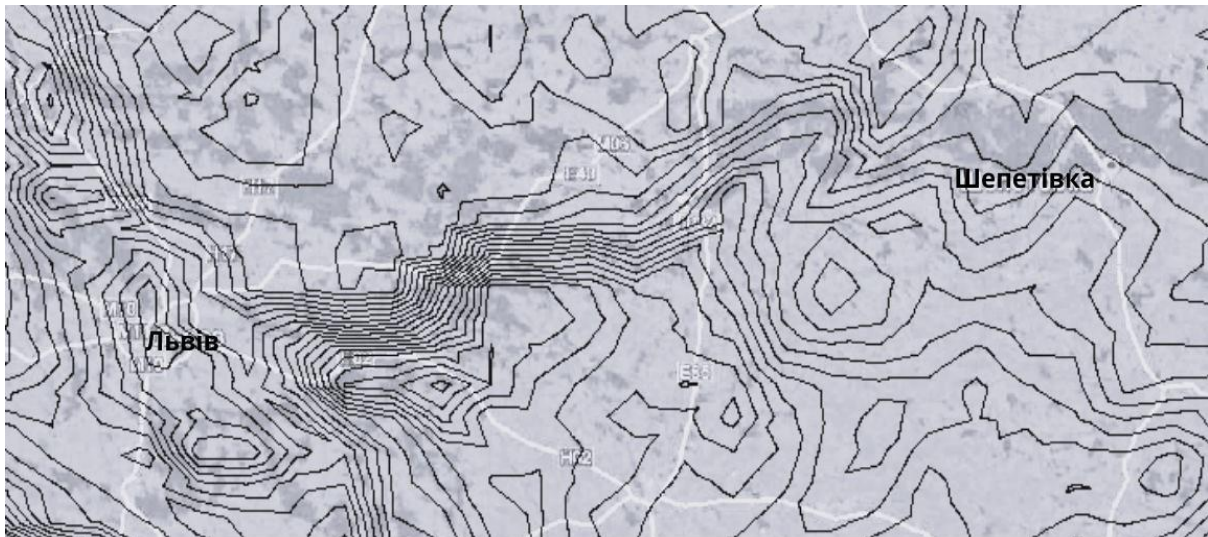


Рис. 3.27. Візуальне представлення місцевості

3.5.4 Вибір варіантів положення траси високошвидкісної магістралі

Траса ВШМ прокладається, як правило, з відхиленням від найкоротшого напрямку лише у важких топографічних умовах, а також для обходу населених пунктів, великих водойм та ін. Для прокладання траси використовувалися коридори існуючих комунікацій (ЛЕП, газопроводи тощо).

На вибір принципового положення траси високошвидкісної магістралі, що проектується, впливають соціально-економічні, природні, технічні та інші чинники та умови, багато з яких між собою тісно взаємопов'язані.

Основним призначенням нової високошвидкісної залізничної лінії є забезпечення великих обсягів пасажирських перевезень між двома та більшими містами та їх районами тяжіння з мінімальними втратами часу пасажирями. Належність великих населених пунктів до напрямку, що вибирається, визначає розміри пасажирських перевезень і доходи від експлуатації. Щільна міська забудова проміжних населених пунктів та наявність численних інженерних комунікацій диктують необхідність винесення залізничної лінії за межі міста.

Для прикладу наведена ділянка високошвидкісної магістралі Львів – Тернопіль і Тернопіль – Шепетівка (рис. 3.28, 3.29).

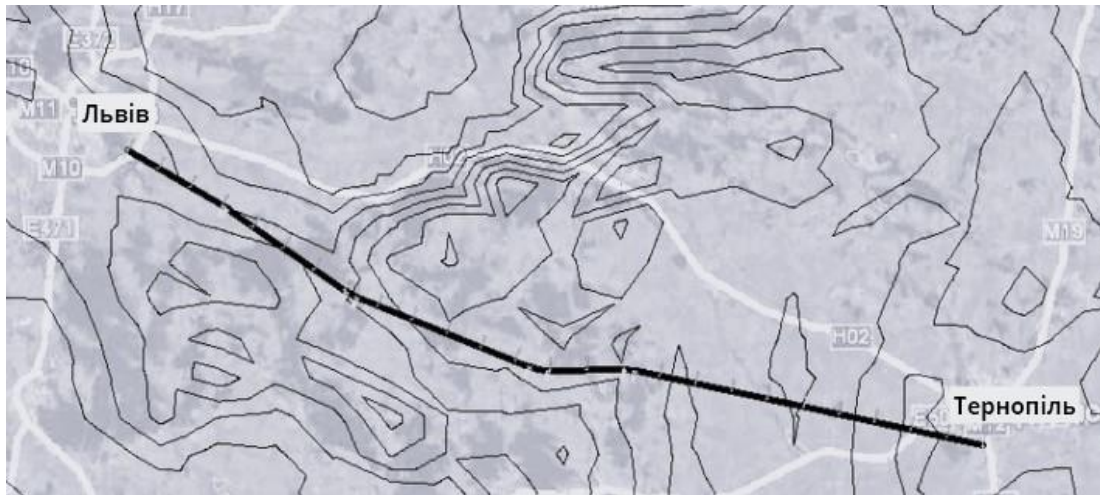


Рис. 3.28. Варіант ділянки високошвидкісної магістралі Львів – Тернопіль

Як було вище зазначено, раціональний варіант для подальших розробок знаходиться за результатами техніко-економічного порівняння. У сучасних умовах слід застосовувати системний підхід, який передбачає знаходження оптимального положення траси.



Рис. 3.29. Варіант ділянки високошвидкісної магістралі Тернопіль – Шепетівка

3.5.5 Метод встановлення оптимальної траси ВШМ

Проблема встановлення положення траси, досить близької до оптимального варіанту, виникла одночасно з появою залізниць. Десятиліттями вироблялися прийоми трасування, що дозволяють одержувати

трасу, допустиму за технічними обмеженнями, яка не має свідомо нерациональних проєктувань.

Розроблені за кордоном системи автоматизації проєктних робіт автоматично виконують операції, пов'язані з оцінкою проєктних рішень і з обробкою інформації [132, 133] і лише в деяких випадках роблять розрахунки з оптимізації поздовжнього профілю методом спрямованого пошуку [134] чи градієнтним методом [135]. Ефективність таких систем забезпечується значною кількістю периферійних пристроїв, високою швидкістю і великим обсягом оперативної пам'яті. Призначення і корегування варіантів виконується досвідченим інженером-проєктувальником. Незважаючи на високу вартість таких систем, їхнє застосування економічно виправдане.

Наведений короткий огляд показує, що задача автоматичного проєктування оптимальної траси ще не має остаточного розв'язку. Необхідні подальші розробки зі створення машинно-орієнтованих методів, що допускають програмну реалізацію на сучасних ЕОМ. Так, в роботі [136] запропоновано застосування методів випадкового пошуку в САПР. Алгоритми, створені на основі випадкового пошуку, надають можливість знаходити оптимальні розв'язки для складних багатовимірних інженерних об'єктів. Концепція випадкового пошуку була висунута Л. А. Растрігіним у 1959 р. на основі ідей британського дослідника в галузі штучного інтелекту В. Р. Ешбі. Подальша розробка цього методу проходила в Інституті електроніки й обчислювальної техніки Академії наук Латвії [137].

У 1969 р. вперше був опублікований збірник алгоритмів і програм для розрахунків методом випадкового пошуку [138]. Він відрізняється від регулярних (детермінованих) методів оптимізації навмисним введенням у пошук елементів випадковості і є прямим розвитком методу спроб і помилок. Одним із проявів ефективного випадкового пошуку в природі є закони еволюції.

У загальному випадку процедура пошуку описується виразом

$$X_{i+1} = X_i^* + a\Delta X_{i+1},$$

де X_{i+1} – вектор, що описує об'єкт на $(i+1)$ -м кроці пошуку;

X_i^* – найкращий вектор на i -му кроці;

a – масштаб пошуку;

ΔX_{i+1} – випадковий ізотропний одиничний вектор.

Основні відмінності різних алгоритмів випадкового пошуку полягають у виборі масштабу пошуку й алгоритмі вироблення вектора ΔX_{i+1} . У деяких задачах доцільним є введення самонавчання, тобто перебудови імовірнісних властивостей пошуку при виборі напрямку робочого кроку, який перестає бути ізотропним.

Оскільки для інженерних задач знаходження абсолютного екстремуму є надзвичайно складним завданням, тут і надалі під оптимальним мається на увазі розв'язок, що має значення критерію, досить близьке до мінімально можливого.

Відшукання оптимальної траси проводиться на обмеженій ділянці довжиною, як правило в перегін, орієнтований обрис якого встановлений в результаті ескізного проектування. Підходи ліворуч і праворуч від ділянки, що оптимізується, зафіксовані. Зважаючи на те, що визначення місця розташування великих штучних споруд є складним самостійним завданням, ділянки оптимізації призначаються таким чином, щоб вони не містили цих споруд.

Описуючи місцевість, за основу приймають ЦММ, на якій крім ліній ГМВК (надалі будемо називати їх основними шкалами), вводяться допоміжні шкали, що служать для точнішого відображення рельєфу місцевості (рис. 3.30). Отримана система шкал [139] досить повно відображає структуру рельєфу в зоні пошуку і полегшує процес оптимізації.

На шкалах наносяться точки, координати яких служать цифровою моделлю місцевості. Точки на шкалах розташовуються на відстані 100...500 м у залежності від складності ділянки і стадії проектування. Відстань між шкалами приймається близькою до найменшої довжини розділових площадок, що рекомендується нормами.

Варіант траси для прийнятої ЦММ задається у вигляді вектора

$$N = (n_1, n_2, \dots, n_i, \dots, n_{m-1}, n_m),$$

розмірність якого дорівнює числу основних шкал (m). Компонентами вектора є номери точок на основних шкалах (n_i), у яких розташовуються вершини кутів повороту для даного варіанта траси. Наприклад, якщо варіант траси для ЦММ, наведеної на рис. 4.26, заданий вектором $N = (3, 3, 2, 4, 2, 3, 3)$, то це означає, що вершини кутів повороту будуть розташовуватися в таких точках: перша основна шкала – точка 3; друга

– 3; третя – 2; четверта – 4; п'ята – 2; шоста – 3 і сьома основна шкала – точка 3.

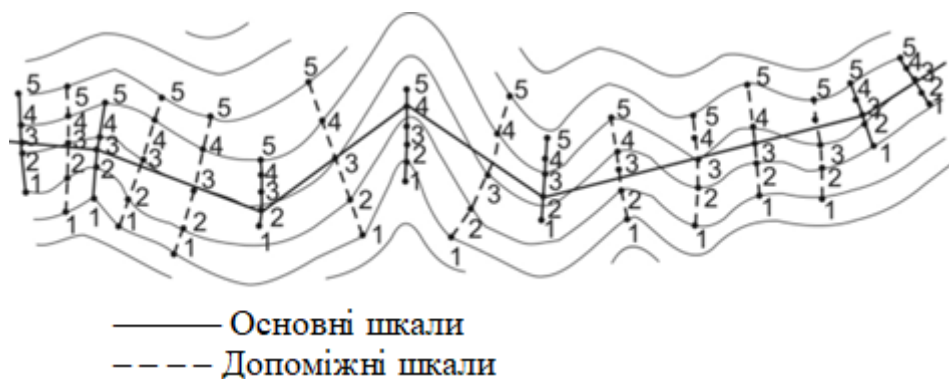


Рис. 3.30. Варіант траси для ЦММ

Слід зауважити, що збільшення кількості шкал позначається на швидкодії оптимізації більшою мірою, ніж збільшення кількості точок на шкалі. Масштаб карт не має принципового значення і вибирається відповідно до стадії проектування. Цифрова модель місцевості може будуватися і за іншими джерелами інформації, наприклад, аерофотозйомки, геодезичної зйомки.

Як критерій оптимізації використовуються приведені будівельно-експлуатаційні витрати [140]. Прийнятий метод оптимізації дозволяє робити розрахунок приведених витрат алгоритмічно з необхідною точністю і деталізацією, що дає можливість використовувати його на різних стадіях проектування і для розв'язання різноманітних проектних задач, пов'язаних із трасуванням [136].

Вивчення і критичний аналіз літератури з питань оптимізації траси показали, що найбільш ефективними для розв'язання даної задачі є крокові алгоритми, що дозволяють робити розрахунок критерію і перевірку обмежень алгоритмічно. З відомих крокових алгоритмів для розв'язання задачі оптимізації траси доцільно застосовувати алгоритми випадкового пошуку, що при алгоритмічному розрахунку критерію перевершують за швидкістю градієнтні методи. Розроблені модифікації цих алгоритмів дозволяють відшукувати розв'язання достатньо близьке до оптимального при складному рельєфі критерію якості (багатоекстремальність, наявність замкнутих допустимих областей, та ін.) і за наявності складних обмежень.

З погляду нелінійного програмування задача оптимізації траси може бути записана в такий спосіб. Об'єкт (траса), що оптимізується,

описується вектором N , розмірність якого дорівнює кількості основних шкал. Компонентами вектора є точки на основних шкалах, у яких розташовуються вершини кутів повороту. Ці компоненти змінюються дискретно в гіперпаралелепіпеді, на вектор накладаються обмеження, що виражаються параметрично або алгоритмічно. Для кожного допустимого вектора визначений алгоритм розрахунку критерію якості (приведених витрат), який передбачає знаходження поздовжнього профілю, близького до оптимального. Необхідно знайти такий вектор N , для якого значення критерію буде близьке до глобально оптимального.

Метод випадкового пошуку не накладає обмежень на спосіб розрахунку показника оптимізації. За необхідності розрахунок показника може виконуватися з будь-яким ступенем деталізації.

Оскільки використання досвіду інженера-проектувальника дозволяє прискорити процес оптимізації, то у дослідженні прийнято, що початкові варіанти задаються проектувальником.

Один крок спуску до локального екстремуму може проводитися в такий спосіб.

1. Формується вектор зсуву вершин кутів повороту N . Оскільки що для фіксації прямих підходу, вершини кутів повороту на першій, другій, останній і передостанній основних шкалах не змінюються, цей вектор має вигляд

$$\Delta N = (0, 0, \Delta n_3, \Delta n_4, \dots, \Delta n_{m-3}, \Delta n_{m-2}, 0, 0),$$

де m – число основних шкал.

Складові вектора ΔN рівноймовірно набувають значення -1 ; 0 ; $+1$.

2. Обчислюється вектор $N^* = N + \Delta N$, що за необхідності повертається в гіперпаралелепіпед допустимих значень. Повернення провадиться в такий спосіб:

$$n_i = \begin{cases} 1, & \text{якщо } n_i < 1, \\ n_i, & \text{якщо } 1 \leq n_i \leq n_{\max}, \\ n_{\max}, & \text{якщо } n_i > n_{\max}. \end{cases} \quad (3.1)$$

де n_{\max} – кількість точок на шкалі.

3. Для нового вектора розраховується значення показник оптимізації. Якщо він збільшився чи відбулося порушення обмежень, переходимо до пункту 4. А якщо ні, то приймаємо $N = N^*$ і повертаємося до пункту 2, тобто продовжуємо спуск у тому ж напрямку.

4. Якщо пункт 2 виконувався тільки один раз, провадиться реверс, тобто $\Delta N = -\Delta N$, і повернення до пункту 2. А якщо ні, то крок локального пошуку закінчується.

Реверс провадиться з таких міркувань. Якщо спуск у первісному напрямку приводить до збільшення показника, тобто відбувається підйом по рельєфу критерію, то можливо, що зміна напрямку на протилежний приведе до його зменшення. І хоча при розмірності простору більше трьох це припущення збувається нечасто, введення реверса в алгоритм, як показали розрахунки, доцільно.

Роботу прийнятого алгоритму оптимізації траси з урахуванням уведених доповнень можна подати в такий спосіб [136].

На кроці k пошуку маємо два базових, допустимих за обмеженнями варіанти траси N_{1b}^K і N_{2b}^K (на початку пошуку це варіанти, задані проєктувальником). Гірше значення критерію якості базових варіантів на кроці k

$$E_k^- = \begin{cases} E_{1b}, & \text{якщо } \Rightarrow E_{1b} \geq E_{2b}, \\ E_{2b}, & \text{якщо } \Rightarrow E_{2b} > E_{1b}. \end{cases}$$

Кожний із базових варіантів робить $(k+1)$ -й крок локального пошуку за таким алгоритмом.

1. Генерується вектор $\Delta N = (0, 0, \Delta n_3, \dots, \Delta n_i, \dots, \Delta n_{m-2}, 0, 0)$, де $n_i = [2\xi_i + 0.5] - 1$, $i = 3, 4, \dots, m-2$, де ξ_i – псевдовипадкове число, рівномірно розподілене на інтервалі $(0; 1)$; $[x]$ – найбільше ціле число, що не перевищує x .

2. Обчислюється вектор $N^{(k+1)} = \pi(N^{(k)} + \Delta N^{(k+1)})$.

Операція π здійснює повернення отриманого вектора в гіперпаралелепіпед допустимих значень (4.1).

3. Провадиться перевірка на збіг вектора $N^{(k+1)}$ з розрахованими раніше. Якщо збіг наявний, то вектору присвоюється розраховане раніше значення критерію і провадиться перехід до пункту 6. А якщо ні, то перехід до пункту 4.

4. Провадиться перевірка виконання обмежень. Якщо обмеження порушені, то варіанту присвоюється штрафне значення критерію і провадиться запис варіанта в масив розрахованих варіантів і перехід до пункту 7. А якщо ні, то перехід до пункту 5.

5. Провадиться розрахунок плану траси й позначок землі. Для отриманої лінії землі визначається близький до оптимального поздовжній

профіль; визначається значення показника оптимізації і провадиться запис у масив розрахованих варіантів.

6. Якщо значення критерію не зменшилося, то виконується перехід до пункту 7. А якщо ні, то приймається $N^{(k)} = N^{(k+1)}$ і провадиться повернення до пункту 2, тобто продовжується спуск у тому ж напрямку.

7, Якщо пункт 2 виконувався тільки один раз, провадиться реверс, тобто $\Delta N^{(k+1)} = -\Delta N^{(k+1)}$, і повернення до пункту 2. А якщо ні, то $N^{(k+1)} = N^{(k)}$ і крок локального пошуку закінчується.

У результаті локальних пошуків для базових варіантів утворюються в загальному випадку два нових варіанти траси: $N_1^{(k+1)}$ і N_2^{k+1} .

Після цього провадиться синтез додаткових варіантів. Номери точок на основних шкалах для перших двох додаткових варіантів розраховуються за формулою

$$n_i = \lfloor \xi_i(n_{max} - 1) + 0.5 \rfloor, \quad i = 3, 4, \dots, m - 2,$$

тобто генеруються рівномірно розподілені в гіперпаралелепіпеді допустимих значень варіанти.

Для третього і четвертого додаткових варіантів номери точок розраховуються за формулою

$$n_i = \lfloor n_1 \xi_i + n_{i_2} (1 - \xi_i) + 0.5 \rfloor, \quad \Leftrightarrow i = 3, 4, \dots, m - 2,$$

де n_{i_1}, n_{i_2} – номери точок першого і другого базових варіантів.

Кожний із додаткових варіантів робить кроки локального пошуку за вищенаведеним алгоритмом. Якщо після якого-небудь j -го кроку значення критерію додаткового варіанта перевищить гірше значення критерію базових варіантів на відповідному кроці E^-_j , даний варіант відкидається. А якщо ні, то додатковий варіант робить усі k кроків локального пошуку.

З додаткових варіантів, що залишилися, і варіантів $N_1^{(k+1)}$ і $N_2^{(k+1)}$, відбирають два найкращих за критерієм, що стають базовими на $(k + 1)$ -му кроці, після чого розрахунок повторюється.

При пошуку глобального екстремуму одним із найскладніших, як уже вказувалося, є питання зупинки. При оптимізації траси більшість з варіантів, що генеруються, виявляються з більшим, ніж в останнього, найкращого варіанта значенням критерію чи з порушенням обмежень.

Розрахунки рекомендується виконувати в три етапи.

Підготовчий етап. Проектувальник намічає лінії геометричного місця вершин кутів повороту та смугу трасування, формує ЦММ, вказує два початкові варіанти траси та необхідну для розрахунку приведених витрат інформацію.

Основний етап. Інформація вводиться в пам'ять ЕОМ і виконуються розрахунок. В результаті отримуємо кілька близьких за критерієм варіантів траси, що вказують на околицю глобального мінімуму.

Заключний етап. Аналізуючи результати з урахуванням неформалізованих вимог, визначається остаточний варіант траси, для якої викреслюється план і поздовжній профіль.

Як приклад розглянемо автоматичне проектування оптимальної траси дільниці AD (рис. 3.31), де зафіксовані прямі підходи AB і CD.

При аналізі ділянки AD було встановлено, що вершини кутів повороту на прямих підходах можуть встановлюватися в точках і С. На ділянці можлива наявність ще двох кривих. Геометричні місця розташування вершин кутів повороту (ГМВУ) цих кривих показано на рис. 3.31.

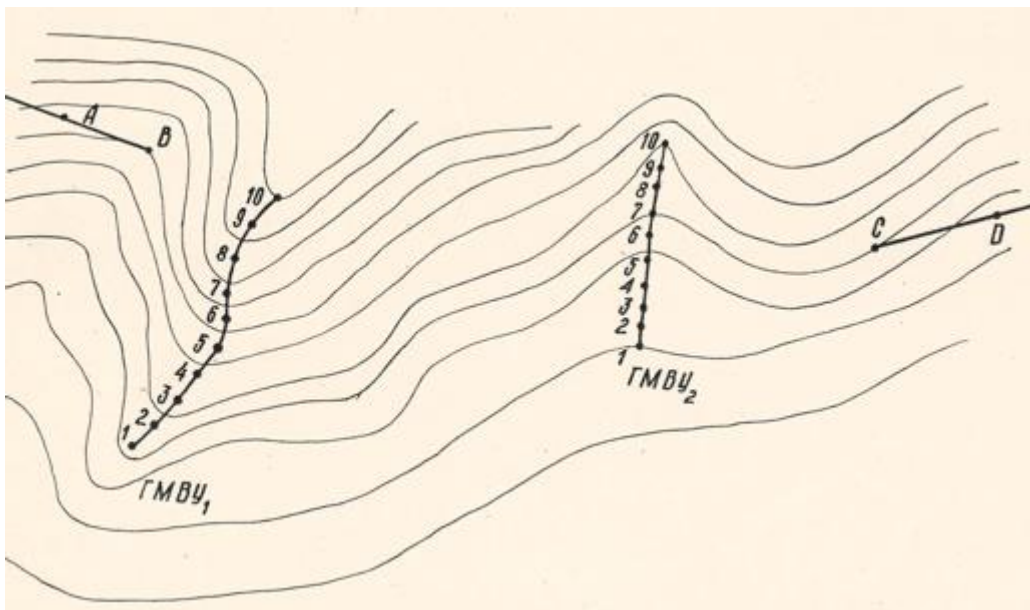


Рис. 3.31. Геометричні місця розташування вершин кутів повороту (ГМВУ) кривих

Крайні можливі положення вершин кутів повороту цих кривих з деяким запасом встановлені в точках 1 і 10. У проміжку між ними нанесена решта точок. Десять точок на лініях ГМВУ забезпечують знаходження контуру траси з необхідною точністю.

Основними шкалами для даної ділянки будуть лінії ГМВУ₁ і ГМВУ₂, а також лінії, що проходять через точки А, В, С і D. Допоміжні шкали наносяться таким чином, щоб вони відображали зміни поверхні землі вздовж смуги проектування.

Відстань між шкалами вибирається з таких міркувань. На ділянках, де поздовжній профіль проектуватиметься приблизно одноманітним ухилом, ця відстань може бути відносно великою. У разі прикладу цю відстань прийнято 400-600 м. У місцях, де передбачаються переломи профілю, відстань між шкалами слід зменшити до 200-300 м, що дозволить більш точно запроєктувати поздовжній профіль.

На всіх шкалах наносяться по 10 точок на перетинах з горизонталями та інших характерних місцях. Отримана система шкал представлена рис. 3.32.

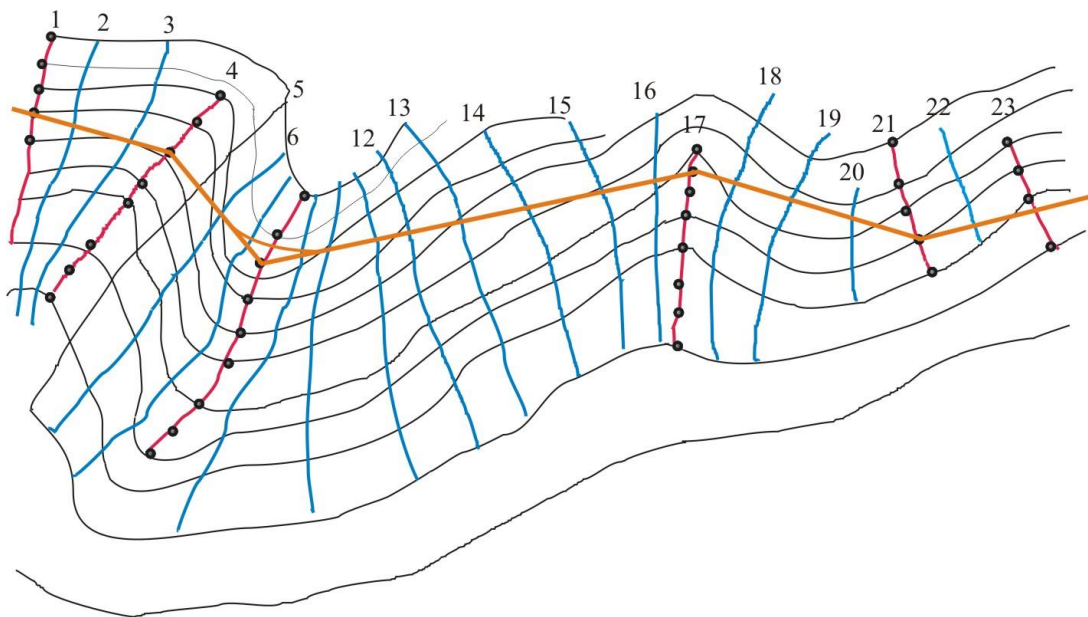


Рис. 3.32. Система шкал: основні та допоміжні

Шкали 1, 4, 8, 17, 21 та 23 віднесені до основних, а 2, 3, 5-7, 9-16, 18-20 та 22 – до допоміжних. Цифрова модель території представлена системою точок на шкалах.

Для кожної шкали встановлено максимальне значення різниці ухилів. Для шкал з 6-ї по 10-ю ця різниця дорівнює 5%, а для інших – 8%.

Для умов прикладу було отримано апроксимуючу залежність $F = f(h, t)$ від робочої відмітки насипу (виїмки) h і косогірності місцевості t , враховуючі вартість 1-го пог.м земляного полотна [136].

Водопрпускні споруди передбачалися на 8-й і 19 шкалах, вартість яких визначалася залежно від висоти насипу. Оскільки пошук оптимальної траси проводиться за двома шкалами (8-ма і 17-та), то можливо 100 варіантів.

Впровадження методу здійснено у проектному інституті «Дніпродіпротранс». Для однієї із запроєктованих залізничних ліній виконані перевірочні розрахунки за пропонованим методом.

Основний ефект при впровадженні методу полягає у скороченні термінів проектування з одночасним підвищенням якості трасування. Зощаджені терміни при проектуванні дозволяють проєктувальникам опрацювати більшу кількість ділянок. Проєктувальник при застосуванні запропонованого методу здійснює ескізне проектування.

Було виконано розрахунки для кількох ділянок, запроєктованих типовими методами. На рис. 3.33 наведено приклад варіантів траси, для типового та оптимізованого проектування.

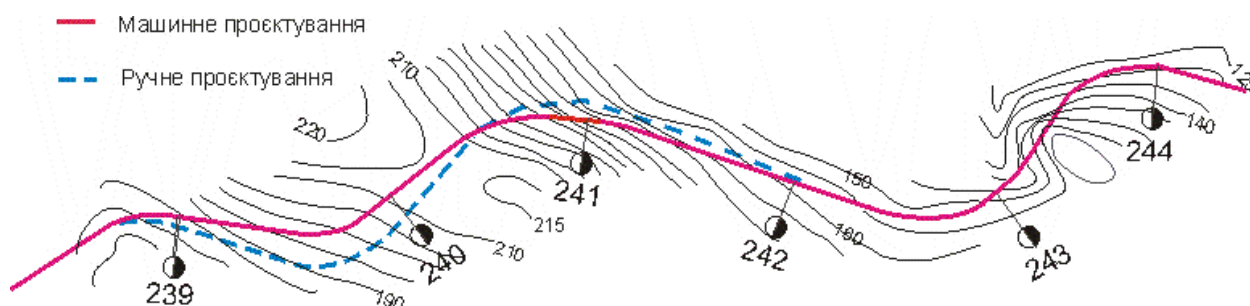


Рис. 3.33. Варіанти трас при типовому та оптимізованому проектуванні

Застосування запропонованого методу [140] дозволило значно скоротити вартість земляних робіт, зменшити довжину лінії, знизити до 10 % приведені витрати та уникнути нерациональних проєктувань.

Висновки до розділу 3

Аналізуючи міжнародний досвід та передумови проектування ВШМ встановлено, що в Іспанії, Італії і Німеччині, а також у Південній Кореї, Великобританії, США, Китаї та інших країнах активно велися відповідні наукові дослідження, йшов пошук, відбір, перевірка практикою основних інженерно-технічних рішень, необхідних для спорудження ВШМ і виробництва високошвидкісного рухомого складу.

Створення міжнародних мереж на базі потенціалів окремих країн призводить до необхідності встановлення таких експлуатаційно-технічних параметрів вітчизняних високошвидкісних магістралей, які мали б експлуатаційну сумісність з Транс'європейською мережею ВШМ.

Встановлено, що протяжність ВШМ постійно зростає як у Китаї, так і в Європі. Ідеологом високошвидкісних залізничних систем у Європі є Франція. TGV – це одна з найуспішніших високошвидкісних залізничних систем у світі. Вона перевозить мільйони пасажирів щороку та відіграє важливу роль у транспортній системі Франції. Найінтенсивніше розвиваються високошвидкісні перевезення в Іспанії та Китаї. Сьогодні у світі введені в експлуатацію швидкісні магістралі, на яких поїзди розвивають швидкість до 350 км/год.

Корисним для України може стати досвід Німеччини, яка розвинула регіональні перевезення чи не найкраще серед усіх країн ЄС. У німецьких регіональних перевезеннях керівну роль відіграє співпраця залізничного оператора та регіональної влади, оскільки вона є основним замовником послуг. Водночас центральна влада визначає доцільність і способи компенсації (дотації) для збиткових залізничних перевезень, якщо їх неможливо замінити іншими видами транспорту або така заміна матиме істотні негативні наслідки, як від збільшення трафіку, погіршення екології тощо.

Для повоєнної України, якій доведеться виробляти свої рішення для досягнення високого рівня безпеки на залізничному транспорті, особливо у сфері швидкісних і з перспективою високошвидкісних перевезень корисним може стати досвід Японії.

З проведеного аналізу випливає, що до 2004 року Китай реалізував проекти з покращення інфраструктури і підвищення максимальної швидкості поїздів до 160 км/год, що відповідає рівню розвитку української залізничної мережі сьогодні. Швидке економічне зростання

Китаю протягом останніх двох десятиліть особливо яскраво проявилось у розширенні мережі залізниць, темпи якого стали найвищими у світі, що можна пояснити тим, що Китай скористався досвідом провідних країн, які надали доступ до інноваційних технологій. Сьогодні Китай має найбільшу в світі мережу високошвидкісних ліній залізничного руху.

Стратегія Європейської Комісії з інтеграції залізничних систем України, Молдови та Європейського Союзу передбачає перехід на евроколію (1435 мм) на всіх основних напрямках. Реалізація цих проєктів буде мати значний вплив на розвиток України та її інтеграцію до Європейського Союзу.

Для встановлення оптимального положення траси нової HSR європейського стандарту, яка розглядається в Україні на перспективу на базі алгоритмів випадкового пошуку розроблено та реалізовано новий метод автоматичного проєктування траси, досить близькою до оптимальної, в межах перегону при фіксованих у плані та профілі початкової та кінцевої точках.

Метод враховує основні технічні вимоги, що пред'являються до плану та профілю нормами проєктування, практично не залежить від способів розрахунку приведених витрат та обліку обмежень і може застосовуватися для вирішення різних проєктних та науково-дослідних завдань, пов'язаних з трасуванням.

Прийнята ЦММ досить точно відображає рельєф у смузі трасування при відносно малому обсязі інформації і дозволяє представити варіант траси у вигляді вектора з дискретними змінними компонентами, а варіант профілю – вектором проєктних відміток, число компонент якого дорівнює числу ліній ЦММ. Таке подання об'єктів, що оптимізуються, значно прискорює вирішення завдання за рахунок обмеження сфери варіювання.

Застосування автоматичного проєктування траси дозволяє до 10 % знизити приведені витрати та уникнути нераціональних проєктувань.

Дослідження напружено-деформованого стану колії при впровадженні європейської колії

4.1. Математичного моделювання напружено-деформованого стану залізничної колії

Для дослідження напружено-деформованого стану залізничної колії сьогодні існує велика кількість математичних моделей. Вибір інструменту перш за все підпорядковується задачею, що вирішується. Потрібне обґрунтування само по собі може бути темою окремого наукового дослідження. В дослідженні була застосована просторова модель динамічних деформацій залізничної колії на основі теорії пружності [122, 123]. Дана математична модель базується на формуванні геометрії поширення пружної хвилі в тривимірному просторі залізничної колії від прикладеного навантаження. Геометричний обрис пружної хвилі визначає поширення напружень і деформацій в шарах речовин, з яких складається конструкція залізничної колії. При цьому, крім фізико-механічних властивостей, враховуються геометричні контури об'єктів конструкції, площини передачі тиску між ними та час виникнення і дії відповідних напружень. Розрахунок напружень і деформацій в точках простору на кожному часовому кроку відбувається через розв'язання системи диференціальних рівнянь, що описують передачу тиску в просторі речовини з урахуванням її динамічної деформації.

Детальний опис даної математичної моделі і результати застосування при вирішенні задач взаємодії колії і рухомого складу наведені в низці попередніх робіт авторів, зокрема в роботі [141] розглянутий приклад її верифікація і використання для визначення деформаційних характеристик баласту залізничних колій з урахуванням наявності різного рівня забруднень; в роботі [142] – для аналізу змін при переході на європейську ширину колії.

4.1.1. Зміна ширини однієї колії двоколійної ділянки з 1520 на 1435 мм

Зміна ширини колії з 1520 мм на 1435 мм потребує застосування іншого рухомого складу або заміни візків вагонів, що мали експлуатацію раніше. Це приведе до певних змін в динаміці рухомого складу і його взаємодії з залізничною колією. Однак, напруження в рейках, елементах рейкових скріплень та шпалах не мають суттєвої залежності від ширини колії. Технологія виконання робіт для переходу на іншу ширину колії передбачає виконання реконструкції, технічного переоснащення ділянки, зокрема з використанням сучасних конструктивних рішень [143]. При такому виді ремонту відбувається заміна рейко-шпальної решітки на нову з очищенням баластного шару. Таким чином, вся верхня будова колії буде оновлена і знаходитися в працездатному стані.

Напруження, що будуть поширюватися шаром баласту на земляне полотно також не будуть перевищувати допустимі значення (за дотриманням діючих нормативних документів щодо стану та умовам експлуатації рухомого складу і залізничної колії). Але, земляне полотно, на відміну від верхньої будови колії, залишається таким, що було побудовано багато років тому. Воно мало багаторічну експлуатацію і, безумовно, набуло певних ущільнень та залишкових деформацій у відповідності до існуючого обрису навантаження. Зміна цього обрису може спричинити додаткові деформації навіть за умови не перевищення допустимих напружень, як безпосередньо в ґрунті, так і в штучних спорудах [144].

Для прикладу було розглянуто рух пасажирського вагону по залізничній колії, конструкція якої відповідає I-й категорії українських залізниць: рейки UIC60, залізобетонні шпали, щебеневий баласт з піщаною подушкою сумарною товщиною 60 см. Модуль деформації баласту 200 МПа, земляного полотна – 35 МПа, що відповідає загальному модулю пружності підрейкової основи залізничної колії на рівні 50 МПа – прийняте значення для більшості типових розрахунків залізничної колії на міцність. На рис. 4.1 показано зміни напруженого стану в верхньому шарі земляного полотна при переході на ширину колії 1435 мм у відсотках відносно значенням при ширини колії 1520 мм.

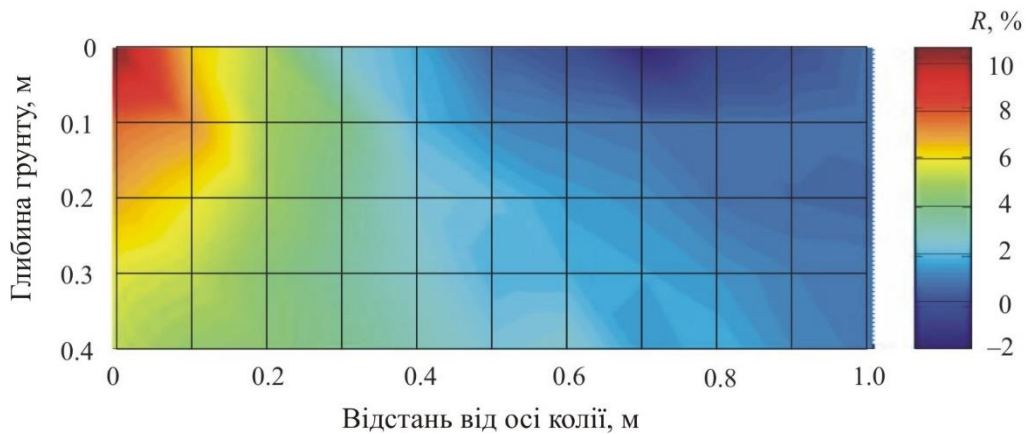


Рис. 4.1. Зміни в напруженому стані земляного полотна при переході з ширини колії 1520 на 1435 мм

Напруження в просторі земляного полотна були отримані за допомогою вище описаної математичної моделі. Моделювалося проходження пасажирського вагона зі швидкістю 160 км/год по колії з шириною 1520 мм, а потім по колії 1435 мм. З масиву напружень, що формується при проходженні коліс по встановленому перерізу колії, для подальшого порівняння приймалися максимальні. Показник (R), наведений на рис. 4.1, показує зміну напружень в просторі земляного полотна у відсотках при зміні ширини колії:

$$R = \frac{100(\sigma_{1435} - \sigma_{1520})}{\sigma_{1520}}, \quad (4.1)$$

де σ_{1520} , σ_{1435} – напруження в земляному полотні, що виникають при проходженні пасажирського вагона по колії шириною 1520 і 1435 мм відповідно.

Нульова відмітка по горизонталі – вісь колії, по вертикалі – основна площадка земляного полотна. Як видно з рис. 4.1 збільшення напружень до 10 % відбувається в верхніх шарах земляного полотна по осі колії. Це можна пояснити більшою концентрацією напружень при зруженні бази навантаження на залізничну колію. В зонах, віддалених від осі колії, можна спостерігати зменшення напружень на кілька відсотків. В цілому, можна стверджувати, що суттєвих змін в напружено-деформованому стані земляного полотна в даному випадку не спостерігається.

4.1.2. Застосування ділянки суміщеної колії 1435/1520 мм

Суміщена залізнична колія 1435/1520 мм складається з чотирьох рейок, розміщених на одній залізобетонній шпалі. Варіант конструкції з трьома рейками, який має місце в світовій практиці при іншому поєднанні ширини колії, в даному випадку унеможлиблюється невеликою різницею між їх значеннями. Шпала для розміщення чотирьох рейок має збільшену довжину. Тому заміна рейко-шпальної решітки з шириною колії 1520 мм на суміщену колію може ставити додаткові задачі пов'язані з забезпеченням габаритних відстаней. На рис. 4.2 показана схема реконструкції двоколіїної ділянки з заміною однієї колії на суміщену конструкцію.

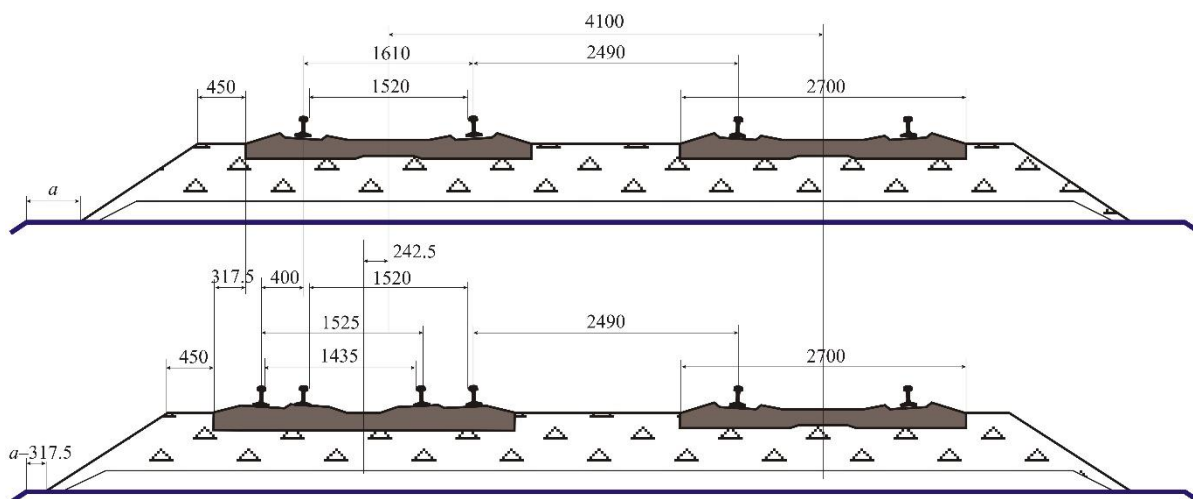


Рис. 4.2. Зміни в поперечному профілі верхньої будови при влаштуванні суміщеної колії на двоколіїній ділянці

На рисунку показані основні геометричні розміри, перш за все пов'язані з забезпеченням габаритних відстаней. В суміщеній конструкції застосовуються українські залізобетонні шпали типу Ш2С-1. Суміщену шпалу пропонується розміщувати так, щоб забезпечити зберігання осі колії для варіанту 1520 мм, що, крім іншого, забезпечує найменші зміни в габаритних відстанях. При цьому ось шпали буде зміщена на 243 мм назовні, крайня рейка (зовнішня для колії 1435 мм) – на 400 мм, при забезпеченні плеча баластної призми 45 см бровка земляного полотна (a) зменшиться майже на 318 мм.

Аналіз напруженого стану рейок, елементів рейкових скріплень та шпал можна вважати тотожними до наведеного для попереднього варіанту. Напружено-деформований стан баласту в такій конструкції буде більш складним. При забезпеченні належного стану рухомого складу і залізничної колії, та умов експлуатації перевищення допустимих напружень в баласті не очікується. Проте обрис напружень при проходженні рухомого складу по коліям різної ширини буде суттєво відрізнятися. Слід зазначити, що при проходженні рухомого складу баластний шар в основному реагує пружними вертикальними деформаціями. Інтенсивність накопичення залишкових деформацій, серед інших факторів, залежить від якості ущільнення баласту. Тому, крім ущільнення виправочно-підбивочно-рихтовочними машинами, яке відбувається під час вкладання рейко-шпальної решітки в проєктне положення, застосовується спеціальна колійна машина – стабілізатор колії. Вона, як правило, працює вже після завершення всіх інших ремонтних робіт і передає на колію вібраційну дію, яка тотожна пропуску певної кількості поїздів. Це дає змогу баласту пристосуватися (ущільнитись) саме під такий обрис навантаження, який буде передаватися поїздами в подальшій експлуатації. Для суміщеної колії цей обрис буде змінюватись в залежності від того, по колії якої ширини рухається поїзд, рис. 4.3. Для формування зображення на рис. 4.3.b одночасно показані напруження, які спостерігалися при проходженні поїздів по рейковим коліям шириною 1435 і 1520 мм:

$$\{\sigma\} = \{\sigma_{1520}\} \cup \{\sigma_{1435}\}. \quad (4.2)$$

В багатьох наукових дослідженнях роботу баластного шару визначають як складнішу порівняно з іншими елементами залізничної колії. Щебеневий баласт накопичує забруднювачі і потребує проведення регулярних ремонтних робіт з очищення та відновлення [145]. Крім іншого, баластний шар призначений для відводу води (опадів), що робить його фізико-механічні властивості залежними від погодних умов [146]. Така суттєва зміна обрису навантаження в баласті, яка спостерігається для руху поїздів по різним рейкам, що опираються на одну й ту ж саму шпалу, а також несиметричність цього обрису по довжині шпали (див. рис. 4.3), є додатковим фактором, який може привести до значного збільшення інтенсивності накопичення залишкових деформацій.

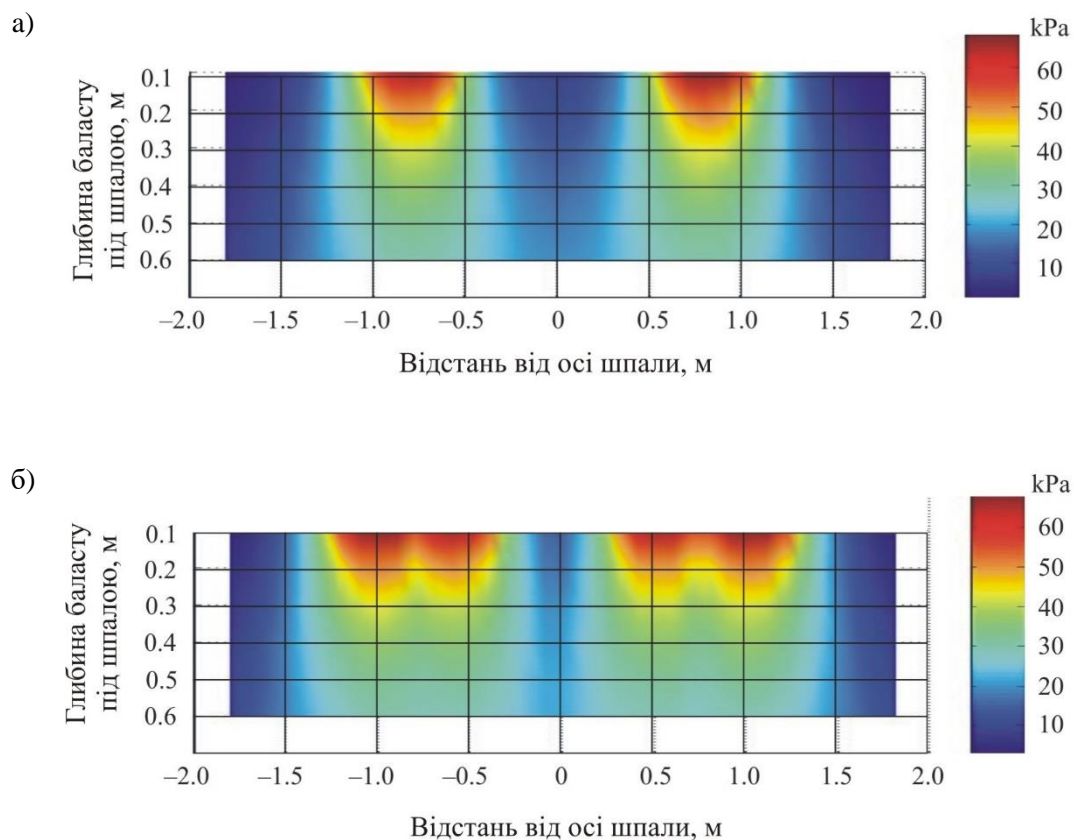


Рис. 4.3. Напруження в баластному шарі: а) для залізничної колії шириною 1520 мм; б) для суміщеної залізничної колії шириною 1435/1520 мм

Складний напружено-деформований стан баластного шару безумовно буде відбиватися і на роботі земляного полотна. На рис. 4.4 показані зміни в напруженні в просторі земляного полотна при переході з колії шириною 1520 мм на суміщену 1435/1520 мм. Нульова горизонтальна відмітка відповідає осі шпали суміщеної колії (див. рис. 4.2). Показник змін (R) визначено за рівнянням:

$$\left. \begin{aligned} R &= \frac{100(\sigma_{dg} - \sigma_{1520})}{\sigma_{1520}}; \\ \{\sigma_{dg}\} &= \{\sigma_{dg1435}\} \cup \{\sigma_{dg1520}\} \end{aligned} \right\} \quad (4.3)$$

де $\{\sigma_{dg1435}\}$ і $\{\sigma_{dg1520}\}$ – масиви напружень в земляному полотні, що виникають при проходженні пасажирського вагона по суміщеній колії шириною 1435 і 1520 мм відповідно.

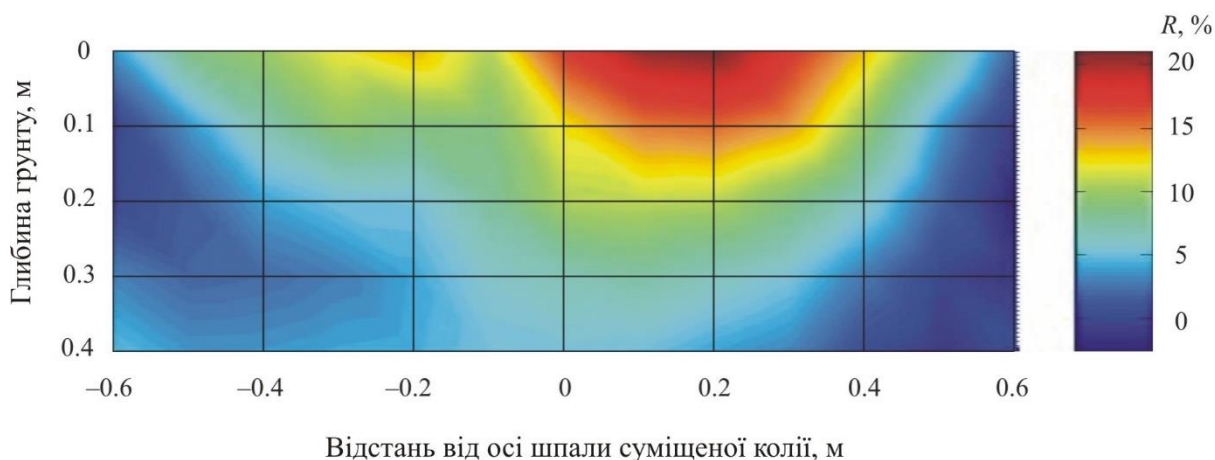


Рис. 4.4. Зміни в напруженому стані земляного полотна при реконструкції однієї колії двоколійної ділянки на суміщену 1435/1520 мм

Як видно з рис. 4.4, зміни в напруженому стану верхніх шарів земляного полотна досягають 20%. Незважаючи на те, що в абсолютному значенні напруження в земляному полотні не перевищують допустимі, такі зміни у порівнянні з попереднім багаторічним періодом експлуатації можуть бути шкідливими. Тому реконструкція залізничної ділянки, що супроводжується такими змінами в її напружено-деформованому стані повинна передбачати відповідні заходи щодо укріплення земляного полотна.

4.2. Вплив роботи баласту на напружено-деформований стан колії

Баластний шар – складний об’єкт залізничної колії. Фізико-механічні параметри баласту залежать від багатьох факторів і можуть суттєво змінюватися з часом експлуатації. Серед основних факторів можна назвати наступні: накопичення залишкових деформацій, проникнення забруднювачів, перемішування з ґрунтом, виконання колійних ремонтних робіт.

В попередньому пункті було доведено, що під час реконструкції під європейську ширину колії можливі зміни в показниках ущільнення баласту. Перш за все це можуть бути наслідком несиметричного навантаження від рухомого складу на колію по рейковим ниткам різної ширини.

Нерівномірне та (або) недостатнє ущільнення баласту як саме є суттєвим фактором змін в напружено-деформованому стану залізничної колії в цілому, так і причиною інтенсивного розвитку такого фактору, як забруднення баласту.

Для врахування неоднорідності баластного шару було прийнято, що його забруднення, а відповідно й зміна характеристик одноманітна по довжині колії. Таким чином предметом дослідження стала зміна жорсткості баластного шару по глибині і її вплив на загальні показники жорсткості системи.

Особливості просторової моделі деформацій залізничної колії на основі динамічної теорії пружності [123] дає можливість уникнути задавання чіткої межі між забрудненим і чистим шарами баласту з різними показниками жорсткості. Такий підхід дозволяє врахувати певну неоднорідність і поступовість процесу утворення забруднення, що є більш доречним у порівнянні з методами жорсткого поділення баласту на окремі шари. Це досягається через те, що обрис поширення хвилі в просторі залізничної колії обчислюється множиною векторів. Довжина кожного вектору на поточному часовому кроці залежить від його напрямку та властивостей речовини, які впливають на швидкість поширення в ній пружній хвилі. Множина векторів корегується при виході вектору за межі системи або при переході в іншу речовину. Таким чином кінці векторів формують актуальний обрис поширення пружної хвилі. На рис. 4.5 показано приклад обрису поширення хвилі в баласті під шпалою на момент часу початку залучення баластного шару до процесу взаємодії. Рисунок наведено для візуалізації складного обрису пружної хвилі, який формується з врахуванням вище наведених положень. Для покращення якості візуалізації на рисунку не відображаються всі елементи залізничної колії окрім баластного шару, крок побудови обрису збільшений у порівнянні з проведенням розрахунків для чисельного результату напружено-деформованого стану системи, врахована передача тиску на баласт тільки від однієї шпали, початок координат (позначений шаром) співпадає з геометричним центром шпали.

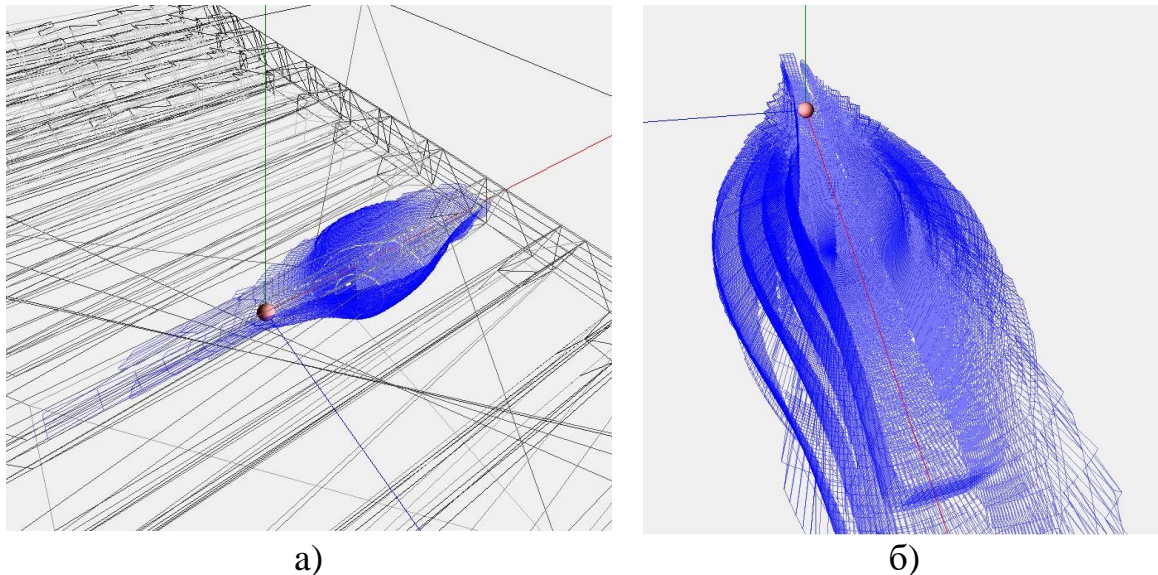


Рис. 4.5. Приклад формування обрису фронту пружної хвилі в баластному шарі: а) на одному часовому кроці; б) покроково в часі

Напружено-деформований стан залізничної колії можна аналізувати за різними показниками. Зміну жорсткості баласту більш наглядно буде відображати зміна пружної вертикальної деформації колії від зовнішнього навантаження. Як основний чисельний показник можна розглядати модуль пружності підрейкової основи. Цим терміном описується сумарна робота на пружну деформацію елементів залізничної колії, які забезпечують прогин рейки: скріплення, шпали, баласт, ґрунт. Навіть локальна зміна жорсткості в баластному шарі впливає на жорсткість всієї конструкції залізничної колії, спричиняючи перерозподіл напружень і деформацій в шарах, розташованих як більш глибоко, так і вище.

Як базові прийняті розрахунки для наступної конструкції колії: рейки UIC 60, залізобетонні шпали, щебеневий баласт товщиною 60 см з модулем деформації 100 МПа, земляне полотно, відсипане ґрунтом з модулем деформації 35 МПа. Навантаження від колеса на рейку прийнято на рівні 125 кН [147, 148]. Погіршення стану баласту задавалося локальним зменшення модуля деформації. Для подальших досліджень були виконані багатоваріантні розрахунки для різних значень модуля деформації баластного шару і його часткових змін в різних місцях локалізації.

На рис. 4.6 показано градієнт деформації баластного шару, який відображає, як швидко змінюється його деформація по глибині. Аналізуючи градієнт деформації баластного шару для різних варіантів, можна отримати інформацію про рівномірність розподілу деформації в баластному шарі, про механічні властивості матеріалу, виявити області, де можливі максимальні деформації. На обох частинах рис. 4.6 базовим показана зміна градієнту деформації для баласту з модулем деформації 100 МПа у чистому стані (без змін характеристик упродовж всієї товщини). Рисунок 4.6 а показує вплив глибини проникнення забруднювачів: на 20, 40 і 60 см. Наявність забруднювачів задавалася зменшенням модуля деформації відповідного шару баласту на 20 %. Рисунок 4.6 б показує вплив місця положення забрудненої зони: 20 см зверху, 20 см знизу, 40 см знизу. Зазвичай, більш інтенсивне забруднення спостерігається в верхніх шарах баласту. Це пов'язано з тим, що верхні шари баласту піддаються більш інтенсивному зносу та забрудненню внаслідок контакту зі шпалами, рейками та вагонами, а також впливу погодних умов, наприклад, дощів та вітру. Нижні шари баласту можуть залишатися більш чистими, оскільки на них не впливають такі інтенсивні зовнішні чинники. Однак, вони можуть бути вразливими до проникнення частинок піску та ґрунту з нижніх шарів залізничної колії.

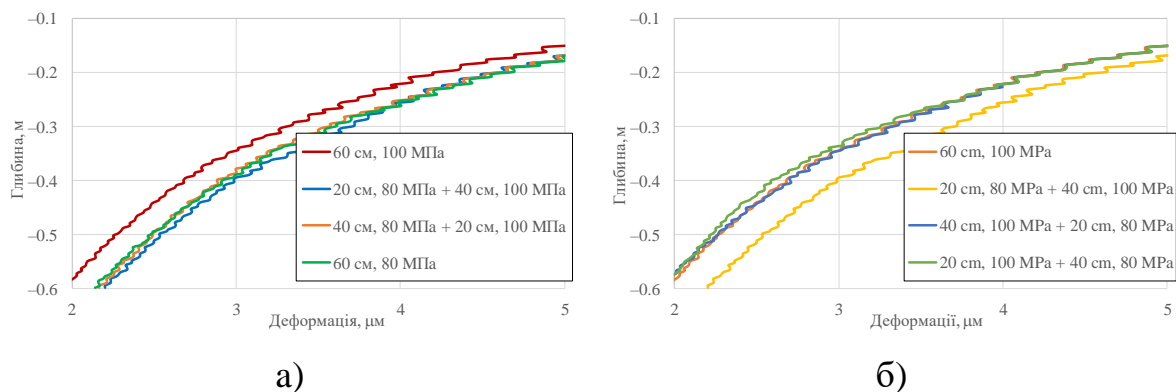


Рис. 4.6. Градієнт деформації баластного шару: а) проникнення забруднювачів на різну глибину; б) різне положення забрудненої зони

Як видно з рис. 4.6 найбільший вплив має зменшення жорсткості в верхньому шарі баласту до глибини 15-20 см. Подальше поширення деградації баласту вже не має таких суттєвих наслідків за показником, що розглядається. Це пояснюється перш за все значними напружен-

нями в саме цій зоні підшпального простору, далі з глибиною напруження швидко затухають і зменшується вплив роботи речовини на формування загальних деформацій системи.

За наведеною методикою були виконані багатоваріантні розрахунки для різного співвідношення вихідних даних [141]. На рис. 4.7 показана залежність загального модуля пружності підрейкової основи від показників жорсткості баластного шару і земляного полотна. Розглянуто декілька варіантів баласту з модулем деформації від 100 до 200 МПа в чистому і забрудненому стані, і декілька варіантів ґрунту з модулем деформації $E_{гр}$ від 20 до 50 МПа. Застосування баласту з більшим модулем деформації надає можливість забезпечити більшу загальну жорсткість колії. Слід зазначити, що жорсткість баласту залежить не тільки від фізичних властивостей речовини, а й від якості його відсіпання та ущільнення. Тому, в деяких випадках, її можна застосовувати як показник якості ремонту залізничної колії. Показово, що для слабких ґрунтів втрачається не тільки абсолютне значення модуля деформації залізничної колії, але й можливість його збільшення за рахунок підвищення якості баластного шару. Так у випадку міцних ґрунтів (з модулем деформації 35-50 МПа) модуль пружності підрейкової основи на рівні 50 МПа (що в більшості випадків вважається достатнім для нормальної експлуатації колії) досягається вже при баласті з модулем деформації 100-140 МПа. У випадку слабких ґрунтів (з модулем деформації 20 МПа) така жорсткість колії взагалі залишається недосяжною.

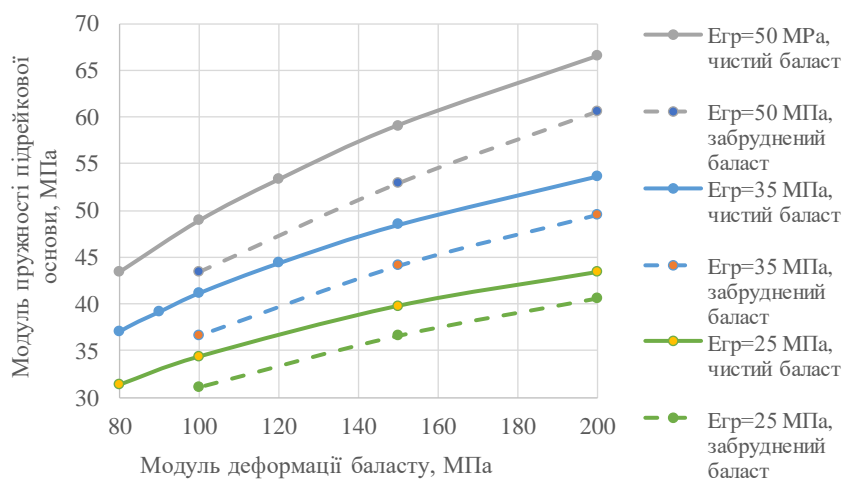


Рис. 4.7. Залежність модуля пружності підрейкової основи від характеристик баласту і ґрунту

За результатами багатоваріантних розрахунків підтверджено, що навіть локальна зміна жорсткості в баластному шарі приводить до перерозподілу деформацій по всьому простору залізничної колії. Найбільший вплив на показники деформації залізничної колії має забруднення верхнього шару баласту товщиною до 20 см. Подальше поширення забруднювачів, або потрапляння їх тільки в нижні шарі баласту, приводять до менших наслідків.

Застосування під залізничною колією на слабкого ґрунту може унеможливити забезпечення потрібної загальної жорсткості колії навіть при використанні якісного баласту з високим модулем деформації. При наявності міцних ґрунтів потрібна жорсткість підрейкової основи може досягатися без застосування баласту з високим модулем деформації. Однак, в цьому випадку, конструкція стає більш чутливою до забруднення верхнього шару баласту. В такому випадку саме в цій зоні буде найбільше співвідношення напружень-деформацій, і саме вона буде мати найбільший внесок в рівень загальних деформацій.

4.3. Моделювання напружено-деформованого стану залізничної колії для умов швидкісного руху

Питання необхідності враховувати динамічність відклику залізничної колії при проходженні поїзда постають давно. Особливої актуальності і практичної значимості вони отримали при поширенні швидкісного і високошвидкісного руху поїздів.

Динамічний прогин рейки характеризується не тільки розміром, а й швидкістю поширення, обидві ці характеристики обернено залежать від жорсткості шарів підрейкової основи, деформації яких відбуваються зі швидкістю й обрисом руху просторових хвиль у речовині. Тому застосування математичної моделі напружено-деформованого стану залізничної колії на основі динамічної задачі теорії пружності, яка базується на векторному принципі формування фронту поширення пружної хвилі, в якому відбуваються динамічні деформації речовини, дає змогу адекватного вирішувати такі задачі.

Слід враховувати, що поширення напружень по довжині рейки не тотожно формуванню її прогину. Прогин рейки формується за рахунок деформації усіх шарів підрейкової основи. Для повного прогину рейки відповідні деформації повинні реалізуватися в просторі підрейкової

основи не тільки певної глибини, а й достатньої довжини. Тиск від одного колеса через прогин рейки передається не тільки на центральну шпалу (що знаходиться безпосередньо в перерізі розташування колеса), а й на кілька суміжних шпал [149].

Спочатку тиск від колеса рухомого складу передається на рейку. Швидкість поширення деформацій в металевій рейці дуже велика і, наприклад, для рейок UIC60 складає 5856 м/с^2 в поздовжньому і 3130 м/с^2 в поперечному напрямку відповідно. Таким чином тиск від рейки досягне центральної шпали через $3 \cdot 10^{-5} \text{ с}$ і вже через $17 \cdot 10^{-5} \text{ с}$ дійде до першої суміжної шпали. Тут і далі часові відмітки наводяться відносно миті умовно раптового прикладання сили до розрахункового перерізу.

В тілі залізобетонної шпали напруження поширюються повільніше за рейку, але все ж таки дуже швидко – 4736 м/с^2 поздовжня і 2532 м/с^2 поперечна швидкості відповідно. На рис. 4.8 а показано фронт поширення напружень в просторі залізобетонної шпали через $5 \cdot 10^{-5} \text{ с}$. Ця часова відмітка відповідає початку передачі тиску від шпали на баласт.

Математичне моделювання процесу поширення напружень відбувалося для повної конструкції колії, яка складалася з рейок, скріплень, шпал, баласту і земляного полотна. Але для поліпшення візуального сприйняття на рис. 4.8 і аналогічних подальших рисунках з елементів залізничної колії показані тільки контури шпал. На цю часову відмітку фронт поширення напружень має майже еліпсоїдну форму, але відкориговану обрисами шпали і поверхні прикладання навантаження.

Далі до процесу взаємодії долучається баласт. Поширення напружень в баласті буде відбуватися значно повільніше за залізобетонну шпалу. Тому обрис поширення на поверхні баласту (зона контакту між шпалою і баластом) ще деякий час буде формуватися за рахунок поширення напружень в підшві шпали. На часовій відмітці $23 \cdot 10^{-5} \text{ с}$ від початку дії сили фронт поширення напружень в шпалі досягне її краю, а на відмітці $23 \cdot 10^{-5} \text{ с}$ – середини шпали (рис. 4.8 б). Починаючи від цього моменту процес формування обрису поверхні передачі тиску від шпали на баласт можна вважати закінченим. Рис. 4.8 б показує цю поверхню з початком заглиблення в шар баласту. Подальше поширення фронту напружень в баласті буде відбуватися вже за рахунок його властивостей. Деякі додаткові корегування обрису фронту відбудуться при залученні до процесу суміжних шпал.

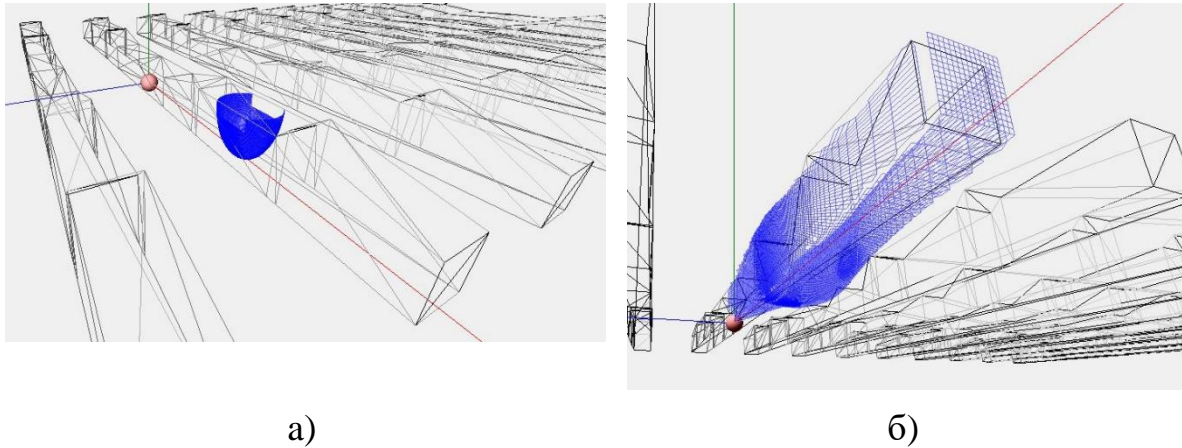


Рис. 4.8. Фронт поширення напружень: а) на момент початку тиску на баласт; б) на момент досягнення середини шпали

Баластний шар може мати різні геометричні розміри, різний матеріал з різними фізико-механічними властивостями, перебувати в різному стані ущільнення та забруднення тощо. Все це має суттєвий вплив на його напружено-деформований стан, в тому числі на швидкість поширення напружень. При щебеновому баласті з модулем деформації 200 МПа швидкості поширення напружень в ньому будуть становити 410 м/с^2 в поздовжньому і 219 м/с^2 в поперечному напрямках відповідно. В такому випадку при товщині баластного шару 60 см передача тиску від баласту на земляне полотно почнеться на часовій відмітці $151 \cdot 10^{-5} \text{ с}$. Відповідний обрис фронту поширення напружень в просторі залізничної колії показаний на рис. 4.9. Слід звернути увагу, що на цю мить поширення напружень по поверхні баласту ще не встигає досягти суміжних шпал.

Швидкість поширення напружень в земляному полотні, як і у випадку з шаром баласту, може знаходитись в певному діапазоні, що залежить від фізико-механічних властивостей ґрунту, що складає земляне полотно. Для ґрунту з модулем деформації 35 МПа швидкості поширення напружень складають 183 м/с^2 в поздовжньому і 98 м/с^2 в поперечному напрямках відповідно. Обрис фронту поширення буде корегуватися більш швидкім поширення напружень по поверхні контакту баласту і земляного полотна у порівнянні з швидкостями поширення в ґрунті, а в подальшому ще й виникненням додаткового тиску на баласт від суміжних шпал. Така форма обрису поширення напружень в залізничній колії для часової відмітки $423 \cdot 10^{-5} \text{ с}$, що для наведених вище

вихідних даних відповідає глибині поширення в ґрунті по осі дії сили на 0.5 м, показана на рис. 4.10.

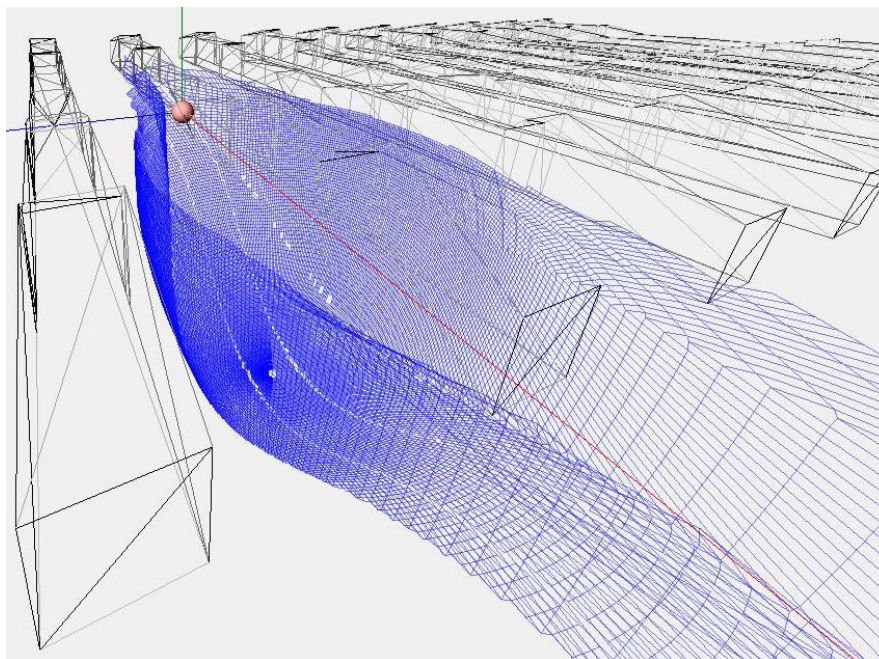


Рис. 4.9. Фронт поширення напружень на момент початку тиску на земляне полотно

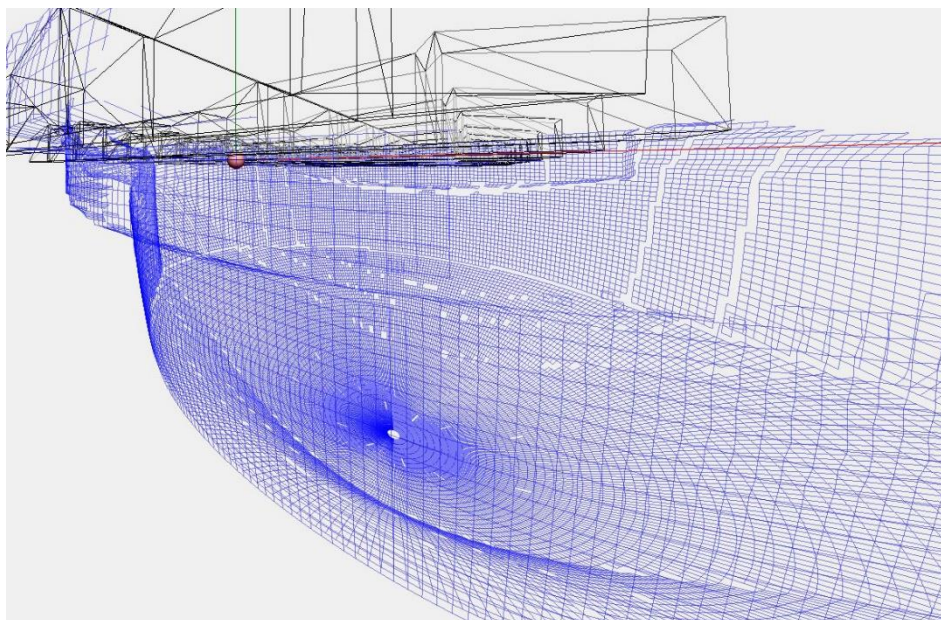


Рис. 4.10. Фронт поширення напружень в просторі залізничної колії на момент досягнення глибини ґрунту 0.5 м

Для спрощення візуального сприйняття і аналізу результатів подальше формування обрису простору залізничної колії, що вже вступив у процес взаємодії, показано в плоскому вигляді по поперечному перерізу колії, рис. 4.11. На рис. 4.11 по горизонталі показана відстань від розрахункового перерізу, по вертикалі – глибина відносно підшви шпали.

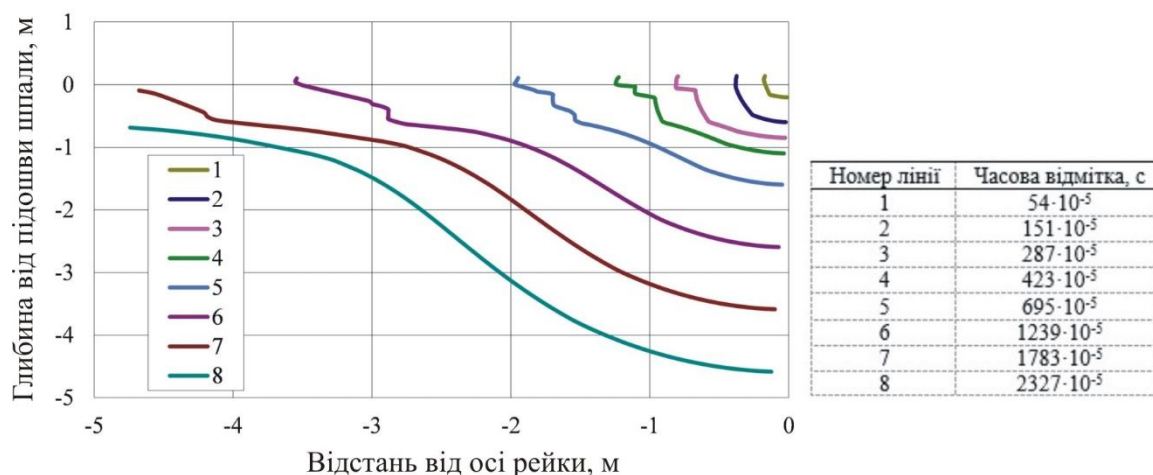


Рис. 4.11. Фронт поширення напружень в просторі залізничної колії

Розглянемо, як буде змінюватися прогин рейки в дослідному перерізі під час проходження колеса з відстані, коли тиск ще відсутній, до відстані, коли тиск вже відсутній. Такий обрис прогину рейки будемо називати динамічним, маючи на увагу, що його отримано з урахуванням динамічності прогину підрейкової основи.

Для порівняння, обрис прогину, отриманий за методом розрахунку колії на міцність [150], як балки на рівнопружній основі від навантаження тотожного динамічному, будемо називати статичним. Результати таких розрахунків, зокрема для високошвидкісного руху, наведені в роботі [151].

Відмінності динамічного і статичного прогину більш показові при руху з високими швидкостями і для конструкцій з низьким показником жорсткості. Для наявності далі розглянемо більш «м'яку» конструкцію залізничної колії: рейки UIC60, залізобетонні шпали, баласт щебеновий (модуль деформації 200 МПа) товщиною 0.5 м від підшви шпали, ґрунт з модулем деформації 25 МПа. Прийняті дані відповідають загальному модулю пружності підрейкової основи на рівні $U=32$ МПа. Розрахунки виконано для швидкостей руху від 80 до 320

км/год включно з кроком 40 км/год від рухомої сили 145 кН. Результати розрахунків показано на рис. 4.12. Для порівняння на рисунку також показаний обрис статичного прогину рейки [150].

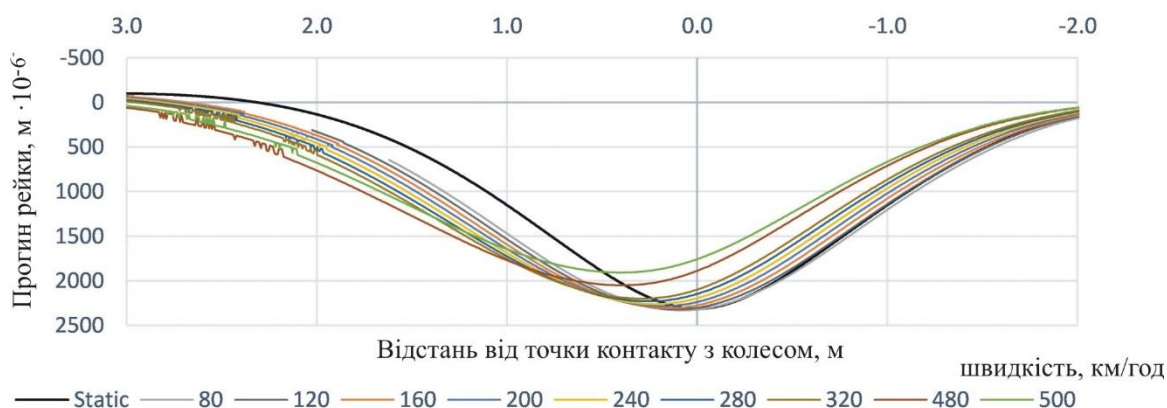


Рис. 4.12. Динамічні прогини рейки в залежності від швидкості руху для ділянки з $U=32$ МПа

Аналіз результатів розрахунків, приклад яких наведено на рис. 4.14, показує, що при збільшенні швидкості руху спостерігається зміна обрису прогину рейки, що є наслідком прояву дисипативних властивостей шарів підрейкової основи. Але ці зміни невеликі, і такі характеристики, як максимальне значення прогину і його довжина залишаються майже постійними. Тому напруження, які виникають в підрейковій основі під час цього процесу, можуть відрізнятися швидкостями реалізації, але за максимальними значеннями тотожні квазістатичним. Додатково на рис. 4.12 показано обриси прогину рейки для швидкостей 480 і 500 км/год. Це приклад швидкостей, при яких в такій конструкції колії вже не буде встигати реалізовуватися «повний» прогин рейки.

Одним з основних принципів, які дають змогу моделювати напружено-деформований стан залізничної колії з просторово-часовим урахуванням динаміки прогину підрейкової основи, є визначення і врахування обрису простору, що приймає участь у взаємодії на задану часову відмітку розрахунку. Крім задач визначення динамічних показників напружень або деформацій, які потребують покрокового точного визначення просторового обрису поверхні фронту, існують інші напрямки розрахунків, для яких достатньо визначити загальні характе-

ристики поширення або ступень поширення на момент виконання заданих граничних умов тощо. Це задачі обґрунтування місця встановлення (або інших характеристик) захисних шарів (або споруд), розмірів розрахункового простору при моделювання залізничної колії, наприклад, методом скінченних елементів тощо. В такому випадку доречно мати можливість аналітичного розрахунку обрису простору взаємодії за певними умовами.

В будь-якому середовищі пружна хвиля (а в межах її фронту напруження і деформації) має кінцеву швидкість поширення, яка залежить від таких фізичних властивостей як щільність (ρ), модуль Юнга (E), коефіцієнт Пуассона (μ). В загальному виді відрізняють поздовжню швидкість поширення (C_1), що співпадає з напрямком прикладеної сили, і поперечну (C_2), що є перпендикулярною до напрямку дії сили. Тоді фронт поширення пружної хвилі (довжина радіус-вектору від точки прикладання сили на момент дії зовнішнього навантаження t) в довільному напрямку α , де $\alpha = 0^\circ$ відповідає поздовжньому напрямку ($C_\alpha = C_1 | \alpha = 0$), а $\alpha = 90^\circ$ – поперечному ($C_\alpha = C_2 | \alpha = 90$) можна визначити за формулами [122, 123]:

$$\left. \begin{aligned} r(\alpha, t) &= C_\alpha t; \\ C_\alpha &= \frac{C_1 C_2}{\sqrt{C_1 \sin^2 \alpha + C_2 \cos^2 \alpha}}; \\ C_1 &= \sqrt{\frac{E(1-\mu)}{\rho(1+\mu)(1-2\mu)}}; \\ C_2 &= \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\mu)}}. \end{aligned} \right\} \quad (4.4)$$

При необхідності, результати за формулою (4.4) можна відтворити в декартовій системі координат

$$\left. \begin{aligned} x &= r \sin \alpha \\ z &= r \cos \alpha \end{aligned} \right\}, \quad (4.5)$$

тоді рівень $z=0$ відповідає підшві шпали, а часова відмітка $t=0$ – початку дії сили.

Слід враховувати, що баластна залізнична колія має таку конструкцію, що її жорсткість зменшується по напрямку дії зовнішнього навантаження, тобто спочатку у взаємодію вступають більш жорсткі шари (рейки, шпали), а потім більш м'які (баласт, ґрунт). З точки зору теорії

пружності положення жорсткого шару на більш м'якому є більш складним випадком, ніж навпаки. Таке розташування шарів за жорсткістю приводить до того, що швидкість поширення деформацій в нижніх шарах менше. Тоді зона контакту між шарами (зона передачі тиску від верхнього, більш жорсткого, до нижнього, більш м'якого) збільшується швидше, ніж відбувається поширення хвилі в наступному шарі. Це один з факторів, які суттєво ускладнюють розрахунки геометрії поширення хвиль напружень в залізничній колії і унеможливають зведення їх до базових формул (4.4).

Такий підхід (з певною похибкою) може бути прийнятним для баластного шару. Розташовані над ним елементи верхньої будови колії змінюють обрис фронту поширення, але, враховуючи велику швидкість проходження просторових хвиль в них, у порівняння з баластом, для більшості задач цю похибку можна вважати прийнятною.

Обрис фронту поширення в земляному полотні має більш складну форму (рис. 4.10, 4.11). Для його визначення аналітичним методом, запропоновано наступну формулу [152], яка, крім фізико-механічних властивостей ґрунту, враховує і властивості баласту, як шару, що передає тиск на земляне полотно і приймає активну участь в формуванні простору взаємодії

$$r(\alpha, t) = \frac{\varphi_{(s)} C_{1(s)} t}{\sqrt{\varphi_{(s)}^2 \cos^2 \alpha + \sin^2 \alpha}} + \frac{h_{(b)}}{\cos \alpha} \left(1 - \sqrt{\frac{E_{(s)} \rho_{(b)}}{E_{(b)} \rho_{(s)}}} \right), \quad (4.6)$$

де $C_{1(s)}$ – поздовжня швидкість поширення хвилі в земляному полотні; $h_{(b)}$ – товщина шару баласту; $E_{(b)}$, $E_{(s)}$ – модуль деформації баласту і ґрунту відповідно; $\rho_{(b)}$, $\rho_{(s)}$ – щільність речовини баласту і ґрунту відповідно; $\varphi_{(s)}$ – коефіцієнт відношення поперечної швидкості до поздо-

вжньої для ґрунту, $\varphi = \sqrt{\frac{1-2\mu}{2(1-\mu)}}$.

Висновки до розділу 4

В результаті даного дослідження було проаналізовано вплив стану баластного шару на вертикальний модуль деформації залізничної колії та отримані результати розрахунків загального модуля деформації підрейкової основи і модуля деформації баластного шару в залежності

від показників жорсткості і стану баласту та ґрунту. Вони можуть бути використані як обґрунтовані вихідні дані для задання характеристик залізничної колії в різноманітних моделях взаємодії колії і рухомого складу.

За результатами математичного моделювання поширення напружень в підрейковій основі показано вплив різних об'єктів залізничної колії на утворення обрису фронту пружної хвилі, визначені основні часові інтервали. Показано, що при збільшенні швидкості руху спостерігається зміна обрису прогину рейки, що є наслідком прояву дисипативних властивостей шарів підрейкової основи. Обрис фронту поширення напружень в певному місці простору залізничної колії залежить не тільки від фізико-механічних властивостей даної речовини, а й від обрису передачі тиску від попередніх шарів. Особливо вплив верхніх шарів відчутний для ґрунту. Для баласту він також має місце, але шпала (як об'єкт, що передає тиск на баласт) має невелику площу контакту з баластом в порівнянні з загальною поверхнею баластної призми, а вплив суміжних шпал швидко згасає. Для земляного полотна вплив верхнього шару зберігається постійно за рахунок протяжності контакту з баластом.

Досліджена зміна напружено-деформованого стану залізничної колії української ширини 1520 мм після реконструкції під європейську ширину колії 1435 мм або під суміщену колію 1435/1520 мм. Для виконання розрахунків застосована просторова модель динамічних деформацій залізничної колії на основі теорії пружності.

При реконструкції існуючої залізничної ділянки шириною 1520 мм під суміщену колію 1435/1520 мм будуть застосовуватись спеціальні залізобетонні шпали, які дають можливість одночасного укладання чотирьох рейок. При застосування такої конструкції особливу увагу слід надавати якості ущільнення та укріплення баластного шару. Напруження, що будуть виникати в просторі підрейкової основи будуть несиметричні по обрису баласту і поперемінно змінюватися в залежності від того, по якій саме колії проходять поїзди. Тому розподіл напружень, що будуть передаватися на земляне полотно, теж суттєво зміниться у порівнянні з попередніми роками експлуатації. Перерозподіл напружень приводить до виникнення зон їх збільшення до 20%. Реконструкція залізничної ділянки, що супроводжується такими змінами в її напружено-деформованому стані повинна передбачати відповідні заходи щодо укріплення земляного полотна.

Обґрунтування концепцій підсилення земляного полотна в Україні та Європейському Союзі

5.1. Аналіз концепцій підсилення земляного полотна в Україні та Європейському Союзі

Земляне полотно залізниці не є найбільш навантаженим елементом серед тих, що складають систему «рухомий склад – залізнична колія», оскільки напруження від колеса поїзда безпосередньо сприймає рейкошпальна решітка. Не викликає сумнівів, що рейки, скріплення, підкладки, шпали та щебневий баласт є найбільш напруженими елементами вказаної системи. Проте однозначним фактом є також і те, що матеріали, з яких вони створені, тобто сталь із високим вмістом вуглецю, залізобетон та гранітний щебінь, мають значно вищі міцнісні та деформаційні характеристики, ніж у матеріалі земляного полотна.

Система «рухомий склад – залізнична колія» влаштована таким чином, щоб зосереджені напруження в місці контакту колеса та рейки максимально розподілялися вже на основній площадці і далі, в земляному полотні. Проте навіть такий логічний інженерний хід часто не є запорукою неперевищення напруженнями в земляному полотні міцності його матеріалу, яким є ущільнений суглинок. Саме земляне полотно і певною мірою його непідготовлена ґрунтова основа є об'єктами виникнення так званих «хвороб», а саме дефектів, деформацій і пошкоджень, які, в свою чергу, вимагають ремонту або навіть реконструкції залізниці для забезпечення її нормального експлуатаційного стану [153, 154].

Слід відзначити, що основні «хвороби» земляного полотна, особливо його деформації, мають декілька причин виникнення.

Першою причиною є недотримання технології спорудження земляного полотна, а саме: 1) недостатнє або неякісно виконане ущільнення шарів суглинку; 2) недостатній або відсутній контроль за вологісним станом суглинку, що ущільнюється за умови досягнення оптимальної вологості; 3) недостатній або відсутній контроль за щільністю кожного

відсипаного шару і відповідно за отриманням проєктного модуля деформації (35...40 МПа за [155, 156]). Ці основні недоліки поодиночі або в комплексі не дають змоги спорудити якісне однорідне земляне полотно, що максимально довгий термін деформувалося б в пружній стадії без локального руйнування ґрунту і, тим паче, без глобальної втрати міцності і стійкості.

Другою причиною є недостатньо раціональна експлуатація із наступними вірогідними ситуаціями: 1) перевищенням навантаження на вісь (з 23.5 до 25 т); 2) недотриманням встановленої швидкості рухомого складу; 3) порушенням умов вологісного режиму; 4) збільшенням міжремонтних термінів тощо. Навіть якісно зведене земляне полотно, яке має проєктну щільність при оптимальній вологості і значення модуля деформації ґрунту, а також достатній для експлуатації комплекс інженерних споруд, переходить в пластичну стадію під час зміни вантажонапруженості. Це призводить до появи залишкових деформацій в локальній області і, відповідно, потребує робіт по приведенню рейкошпальної решітки до нормального режиму пропуску рухомого складу [157, 158].

Безсумнівно, поєднання обох проаналізованих вище причин завдяки синергетичному ефекту збільшує ймовірність катастрофічно швидкого накопичення локальних деформацій основної площадки або інших частин земляного полотна і його глобального руйнування, наприклад, після зсуву укусу.

Окрім розглянутих причин, слід проаналізувати ще один випадок, який відноситься до другої причини. Він пов'язаний з перспективним розвитком українських залізниць, а саме з їхнім потенційним перевлаштуванням на суміщену, а потім і на європейську колію. Суміщення колій із значеннями 1520 і 1435 мм призведе до зміни напружено-деформованого стану земляного полотна, що в комплексі з його недостатньо міцним та стійким станом може призвести до аварій та руйнувань.

Вказана зміна напружено-деформованого стану характеризується явною неоднорідністю формування і розвитку напружень і деформацій в щебеновому баласті [159, 75], що об'єктивним чином пов'язано із конструкцією шпали для суміщеної конструкції колії, яка визначає сценарії асиметричного прикладення поїзного навантаження (рис. 5.1).

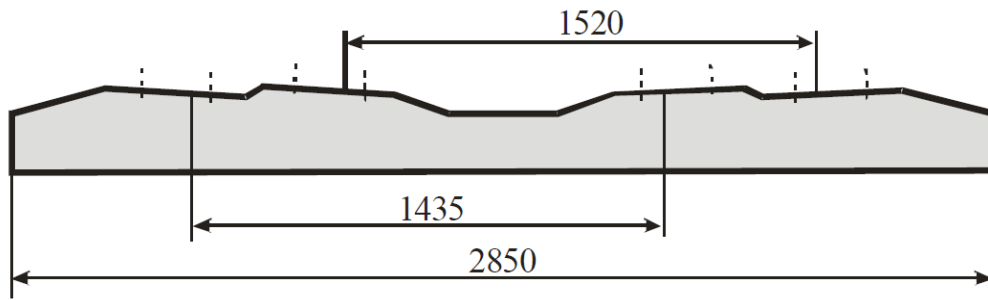


Рис. 5.1. Залізобетонна шпала Ш2С-1
для суміщеної конструкції колії [159, 75]

Оскільки зведення нового земляного полотна із шириною колії 1435 мм на всій протяжності українських залізниць є неможливим, то основним методом адаптації цієї вже існуючої конструкції, що довгий термін експлуатувалася, є підсилення шляхом уведення елементів армування з метою приведення ґрунтової матриці до відносно однорідного стану і, відповідно, підвищення міцності і стійкості, а також попередження можливого розвитку дефектів, деформацій і пошкоджень під час впровадження європейської колії на території України.

5.2. Варіанти підсилення земляного полотна та їхні особливості

Підсилення матеріалу земляного полотна зародилося і надалі розвивається як армування, тобто уведення до ущільненого суглинку елементів різного орієнтування в ґрунтовій матриці (горизонтальне, вертикальне, похиле), матеріалу (геосинтетичні матеріали, цементно-піщаний розчин, ґрунтоцемент, щебінь, асфальт, комбіновані варіанти тощо), характеру взаємодії (стиск, розтяг, перерозподіл компонент розтягу і стиску) [160-167].

Перед тим, як перейти до аналізу конкретних варіантів підсилення, що застосовуються в Україні та Європейському Союзі, слід підкреслити концептуальну різницю між конструкційним армуванням, наприклад, бетону під час створення залізобетону, та армуванням ґрунтових об'єктів. Вона полягає в різних термінах часу введення елементів армування і, відповідно, в їхній роботі: металеву арматуру розміщують в бетоні під час формування залізобетонної конструкції, а елементи

армування в земляному полотні розташовуються після деякого терміну експлуатації, тобто пропуску конкретної кількості пар поїздів. Ця різниця формує сенс армування залізобетону як створення сталобетонного композиту, в якому коригується недолік одного з компонентів (мала міцність бетону на розтяг), а у випадку створення геокомпозиту, тобто підсиленого земляного полотна, сенс елементів армування полягає лише у підтримці вже існуючої ґрунтової матриці.

Таким чином, підсилення земляного полотна, на відміну від створення залізобетону, застосовується не на початку спорудження ґрунтової конструкції, оскільки уведення елементів підсилення одразу виключає спрямування на створення якісної споруди. Підсилення земляного полотна подібне до підсилення частково зруйнованих залізобетонних балок за допомогою зовнішньої арматури, тобто має сутність допомоги конструкції, що під час експлуатації зменшила свою міцність та стійкість.

Основні види підсилення земляного полотна значно відрізняються один від одного (рис. 5.2).

Основним нормативним документом, що регламентує підсилення земляного полотна залізниць України, є «Правила улаштування основної площадки земляного полотна при виконанні капітального ремонту та модернізації колії» [154]. Концептуально цей документ базується на уведенні в ґрунтову матрицю горизонтальних елементів підсилення і пропонує два основні варіанти: 1) за допомогою геосинтетичних матеріалів та 2) із застосуванням шарів, що мало деформуються (рис. 5.3).

В Європейському Союзі розроблені і впроваджуються три концепції підсилення земляного полотна за допомогою: 1) геосинтетичних матеріалів [160-163]; 2) вертикальних паль або мікропаль (див. рис. 5.2, г) [164-166]; 3) комбінації геосинтетичних матеріалів з палями (*Geosynthetic-Reinforced-Pile-Supported*, скорочено GRPS) (див. рис. 5.2, д) [168].

Друга концепція, що концептуально базується на уведенні до ґрунтової матриці земляного полотна вертикальних елементів, в Україні розроблена теоретично і успішно впроваджена практично, але не на залізниці, а на об'єктах промислового та цивільного будівництва, під час підсилення фундаментів.

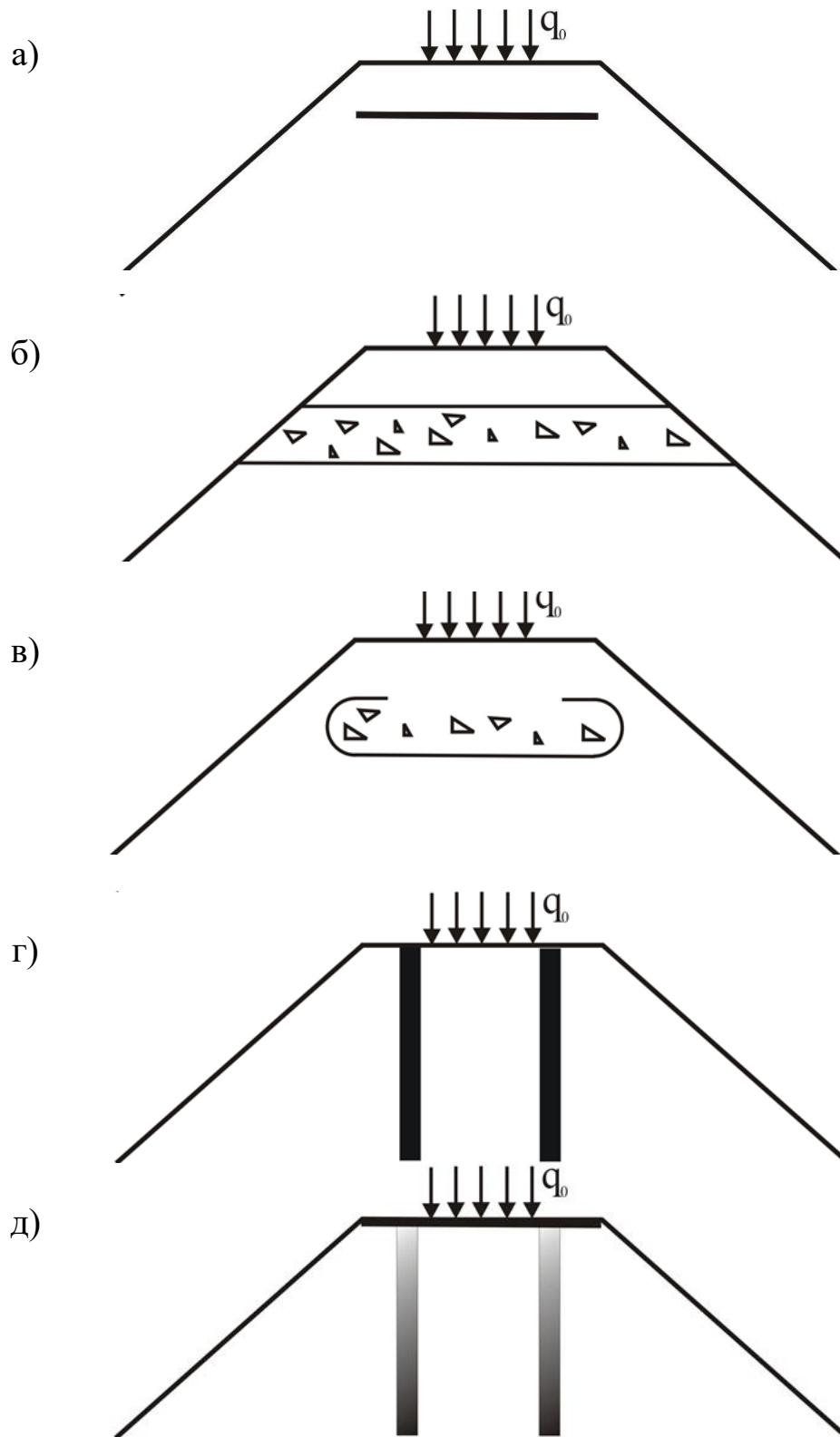


Рис. 5.2. Схеми основних видів підсилення земляного полотна:
 а) за допомогою геосинтетичних матеріалів; б) введення шару, що мало деформується; в) комбінація (а) і (б); г) влаштування вертикальних паль або мікропаль; д) комбінація (а) і (г)

Третя концепція, що комбінує горизонтальний (георешітки) і вертикальні (пали або мікропали) елементи підсилення в Європейському Союзі наразі потужно розвивається, проте в Україні розглядається мало і недетально, знаходячись на первинному етапі досліджень.

На сьогоднішній термін панівною концепцією підсилення земляного полотна українських залізниць є перша, що базується на уведенні в ґрунтову матрицю горизонтальних елементів підсилення (геосинтетичних матеріалів або шарів, що мало деформуються).

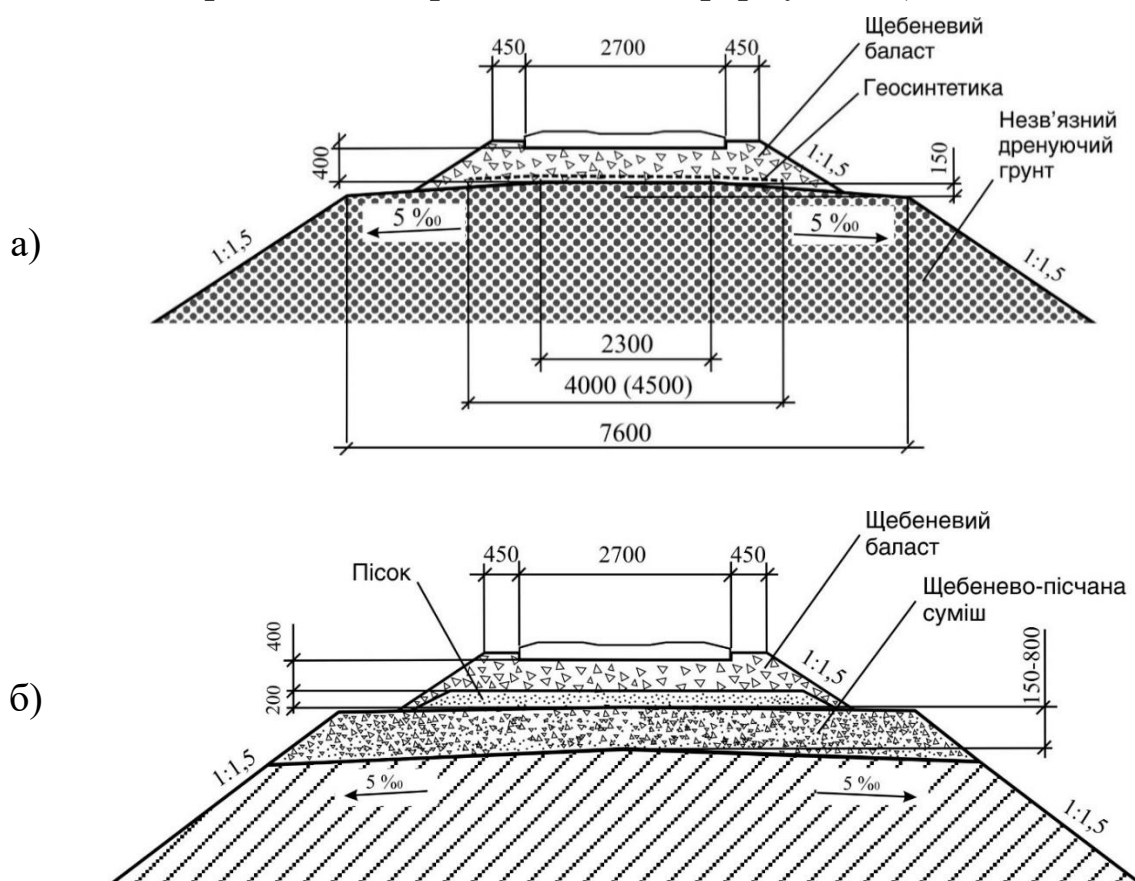


Рис. 5.3. Основні варіанти підсилення: а) геотекстилем або георешіткою; б) шаром, що мало деформується

Склалася парадоксальна наукова ситуація, оскільки за останні п'ятнадцять років з'явилася низка вітчизняних і закордонних статей, в яких достатньо ґрунтовно доведена ефективність вертикальних елементів, однак ця концепція, на відміну від Європейського Союзу, на українських дорогах не втілювалася навіть на експериментальних ділянках. Слід визнати певне розуміння такої ситуації, найбільш вагомим ре-

зультати, які доводять ефективність підсилення вертикальними елементами, отримані за останні п'ять років, що прийшлися на важкі часи пандемії COVID-19 і повномасштабної війни російської федерації проти України [169-173].

Безсумнівно, відмовлятися від підсилення за допомогою горизонтальних елементів, не слід. Проте, область застосування першої концепції варто значно обмежити, оскільки теоретичні й експериментальні дослідження підсилення геотекстилем або георешіткою (в незаанкереному варіанті, див. рис. 5.3, а) довели, що ці схеми мінімальним чином впливають на компоненту деформування земляного полотна, що превалює, а саме вертикальні деформації. Горизонтальні елементи підсилення, виконані з геосинтетичних матеріалів, можуть відігравати роль шару розділення щебеневого баласту та суглинку земляного полотна. Навіть в комбінації геосинтетичних матеріалів з палями (варіант GRPS; див. рис. 5.2, д) георешітка, що розташована на оголовках паль, лише розділяє баласт, палі і ґрунт земляного полотна, дещо впливаючи на позитивний розподіл горизонтальних деформацій[168].

Підсилення земляного полотна шаром, що мало деформується, також недостатньо ефективно у випадку зменшення вертикальних деформацій, проте є позитивним саме через збільшення деформаційних властивостей шару (модуль деформації бутового каменя або асфальтового прошарка). Цей варіант є найбільш зрозумілим, оскільки він базується на простій залежності між переміщеннями і модулем деформації ґрунту земляного полотна. Тобто, якщо була б змога спорудження нової лінії із значенням модуля деформації 50...60 МПа на відміну від 35...40 МПа, то потім проблема «хворого» земляного полотна не поставала б так гостро.

Найбільш цікавим є заанкерений варіант підсилення земляного полотна геотекстилем або георешіткою (див. рис. 5.3, в), що базується на комбінації з шаром із збільшеними деформаційними характеристиками (відпрацьований щебінь). На відміну від горизонтальних елементів підсилення, що працюють в розтягнутому стані, незамкнена оболонка з геосинтетичного матеріалу, заповненого ущільненим шаром, базується на розподілі горизонтальної і вертикальної компонент деформування і зарекомендувала себе під час експериментів як ефективна конструкція підсилення.

З механізму деформування системи «рухомий склад – залізнична колія», навіть під час суміщення колій 1520 і 1435 мм, впливає те, що

максимальне зниження вертикальної компоненти можливе лише під час застосування вертикальних елементів. Варіанти підсилення горизонтальними елементами не можуть бути ефективними в цій ситуації тому, що їхнє орієнтування в земляному полотні є перпендикулярним дії поїзного навантаження.

Таким чином, перша концепція (підсилення горизонтальними елементами) повинна замінюватися другою (підсилення вертикальними елементами) і третьою (підсилення комбінацією вертикальних і горизонтальних елементів), що притаманні практиці підсилення земляного полотна в Європейському Союзі. Реалізація другої концепції підсилення в Україні під час перевлаштування залізниці під суміщену колію потребує обґрунтування не самої ідеї, а її втілення, тобто теоретико-практичних питань методу підсилення.

5.3. Ранжування варіантів підсилення за позитивними та негативними параметрами

Не викликає сумнівів, що неможливо обрати ідеальний метод підсилення земляного полотна українських залізниць для випадку перевлаштування під суміщену або європейську колію. Ставити задачу в такий спосіб некоректно, оскільки випадки підсилення вже існуючих залізниць, які десятки років знаходяться в експлуатації, потребують конкретних рішень і впровадження найефективніших елементів підсилення.

Однак, розглянуті методи підсилення земляного полотна можна обґрунтувати, провівши ранжування за позитивними та негативними параметрами [174, 175], які характеризують ситуацію розміщення в ґрунтовій матриці елементів підсилення (табл. 5.1).

Надана таблиця побудована на основі результатів аналізу літературних джерел і майже п'ятнадцятирічного досвіду теоретичних і практичних досліджень земляного полотна в стінах Українського державного університету науки і технологій (раніше – Дніпровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна). Параметри підсилення розділені на позитивні (зменшення горизонтальних та вертикальних деформацій) та негативні (параметри технології), відповідно ранг характеризує позитивний чи негативний вплив.

Ранжування елементів підсилення за 5-бальною шкалою

| Елементи підсилення | Параметри підсилення | | | |
|---|---|---------------------------------------|---|--|
| | Позитивні | | Негативні | |
| | Вплив на горизонтальні деформації, Sh | Вплив на вертикальні деформації, Sv | Технологічна складність влаштування, TD | Рівень втручання в земляне полотно, LI |
| Геотекстиль | 3 | 2 | 4 | 4 |
| Георешітка | 3 | 2 | 4 | 3 |
| Шар, що мало деформується | 2 | 2 | 3 | 4 |
| Комбінація 1 (геотекстиль + шар, що мало деформується) | 5 | 3 | 5 | 4 |
| Вертикальні палі або мікропалі (<i>jet-grouting</i>) | 3 | 5 | 3 | 2 |
| Вертикальні палі або мікропалі (бурозмішувальна технологія) | 3 | 5 | 2 | 2 |
| Комбінація 2 (геосинтетичні матеріали + палі) | 4 | 5 | 5 | 5 |

Так, аналізуючи табл. 5.1, можна стверджувати, що застосування Комбінації 1 максимально позитивно впливає на зменшення горизонтальних деформацій, тобто застосування геотекстилю із загинами (анкерування геосинтетичного полотна всередині земляного полотна) в комбінації з шаром, що мало деформується, доцільно для земляного полотна, яке працює з підвищеними горизонтальними силами (наприклад, в кривих). Проте, ранги технологічної складності ($TD=5$) та рівня втручання в земляне полотно ($LI=4$) свідчать про те, що потребуються значні капіталовкладення для перевлаштування.

Ранги технологічної складності можна визначити як: 1 – без втручання; 2 – робота в межах рейко-шпальної решітки і баласту; 3 – ро-

бота в межах рейко-шпальної решітки, баласту і частини земляного полотна; 4 – робота в межах рейко-шпальної решітки, баласту і частини земляного полотна, також пов’язана із особливими маніпуляціями з елементом підсилення; 5 – робота в межах рейко-шпальної решітки, баласту і частини земляного полотна, також пов’язана із особливими маніпуляціями з комбінацією різнорідних елементів підсилення.

Ранги рівня втручання в земляне полотно можна визначити як: 1 – без втручання; 2 – робота з рейко-шпальною решіткою; 3 – робота з рейко-шпальною решіткою і баластом, ремонт; 4 – робота з рейко-шпальною решіткою, баластом і частиною земляного полотна, реконструкція; 5 – майже повна реконструкція.

Користуватися таблицею рангів (табл. 5.1) слід, задаючись рівнем можливостей перевлаштування, якому буде відповідати рівень позитивного впливу на деформований стан ґрунтової матриці. На даний термін процесу переходу з ширини колії 1520 мм до 1435 мм рівень можливостей диктується технологічною складністю влаштування (TD) при мінімальному рівні втручання в земляне полотно, що експлуатується (LI), та оптимальному рівні горизонтальних та вертикальних деформацій. Для цього треба вирішити одну із систем рівнянь, задавшись або рівнем впливу на деформований стан, або рівнем TD , або рівнем LI :

$$\left. \begin{array}{l} S_h=a; S_v=b; \\ TD=c; \\ LI \rightarrow \min; \end{array} \right\} \quad (5.1)$$

$$\left. \begin{array}{l} S_h \rightarrow \max(h); \\ S_v \rightarrow \max(v); \\ TD=d; \\ LI=e; \end{array} \right\} \quad (5.2)$$

$$\left. \begin{array}{l} S_h \rightarrow \max(h); S_v \rightarrow \max(v); \\ TD=f; \\ LI=g, \end{array} \right\} \quad (5.3)$$

де a, b, c, e, f, g – ранги, що є початковими умовами рішення.

Якщо прийняти TD рівним $f=2\dots3$, то, вирішив систему (5.3) при значенні LI , що дорівнює $g=2\dots3$, максимальне значення позитивного впливу ($S_h=3; S_v=5$) надають варіанти вертикальних паль або мікропаль, створених на основі бурозмішувальної технології або *jet-grouting*.

5.4. Розробка математичних моделей для визначення характеристик земляного полотна під суміщену колію і його підсилення

5.4.1. Розробка математичної моделі земляного полотна методом скінченних елементів

Для визначення напружено-деформованого стану підсиленого земляного полотна під суміщену колію застосований метод скінченних елементів, реалізований в комплексі SCAD [165, 176].

Для математичного моделювання приймається просторова (3D) постановка, як така, що дозволяє найбільш повно відобразити систему, що досліджується. Об'ємні моделі створені на основі плоского прототипу, що побудований на основі автоматичної триангуляції (автоматичної розбивки на скінченні елементи). Цей крок є коректним, оскільки об'єкт, що досліджується (рейка, шпала, баласт, земляне полотно, основа), має складний обрис. Окрім розмірів та форми рейки, всі інші розміри та форми елементів верхньої будови колії та земляного полотна збережені для максимально повного відтворення об'єкта дослідження.

Перед тим, як виконати триангуляцію, в схему було завантажено вузли, через які проходить контур, що обмежує область триангуляції. Для завантаження схеми вузлів та контурів моделі застосовано імпортування з програми AutoCAD for Windows, в якій по точкам побудований поперечний переріз земляного полотна висотою 6 м. Його конструкція відповідає розробленій для [165] конструкції земляного полотна із шпалою під суміщену колію.

На рис. 5.4 наведена модель земляного полотна, яка створена у комплексі SCAD за допомогою автоматичної триангуляції (крок триангуляції – 0.1 м). Розміри СЕ коливаються у межах $0.1 \times 0.1 \times 0.1$ до $0.15 \times 0.1 \times 0.1$ м, тобто дискретизація схеми достатньо детальна.

У схемі застосовані як тетраедричні СЕ (у моделюванні укосу), так і паралелепіеди (у моделюванні земляного полотна та основи). Загальна кількість вузлів схеми – 43731 шт. (близько 131 тисячі ступенів свободи, задача вважається великорозмірною), кількість скінченних елементів – 28684 шт. Розміри моделі: довжина – 14.65 м, висота – 7.5

м (з яких висота земляного полотна – 6 м, основа – 1 м, баластний шар щебеню – 0.5 м).

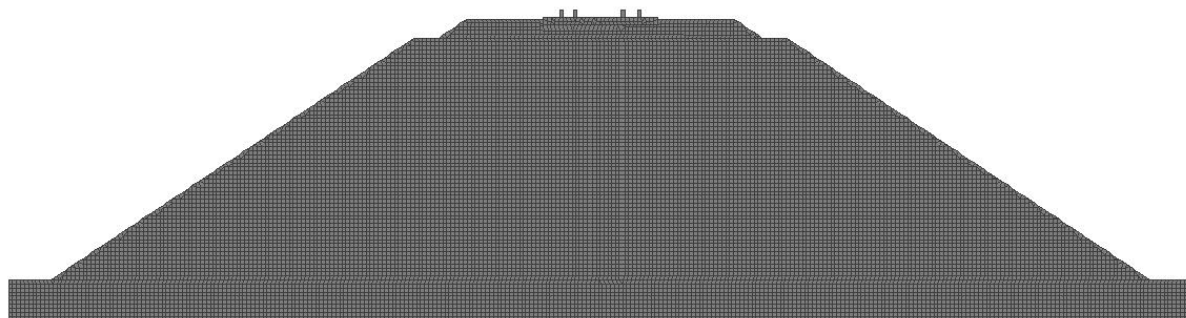


Рис 5.4. Скінченно-елементна модель земляного полотна висотою 6 м під суміщену колію

На схему накладені граничні умови: понизу моделі – заборона переміщення по всім трьом осям, по боках основи – заборона по горизонтальним осям, по поперечних сторонах моделі – заборона по поздовжній осі. Верх та відкоси моделі вільні від граничних умов. В моделі було прийнято поїзне навантаження 23.5 т/вісь, тобто 115.25 кН на одну рейку (рис. 5.5).

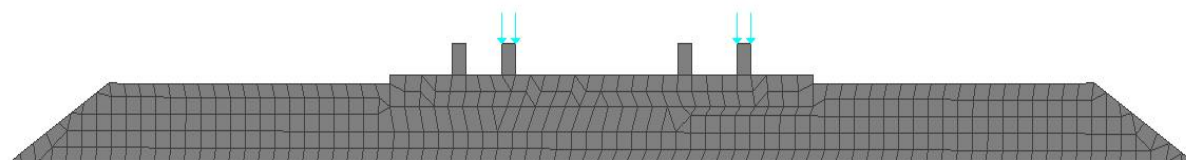


Рис. 5.5. Розташування поїзного навантаження на колії 1520 мм

Деформаційною характеристикою (модуль пружності E) скінченно-елементної моделі є наступні: 1) рейка (сталь) $E=2.1 \cdot 10^8$ кПа; 2) шпала (залізобетон) $E=4.0 \cdot 10^7$ кПа; 3) баласт (щебінь) $E=10 \cdot 10^4$ кПа; 4) земляне полотно (слабкий суглинок) $E=25 \cdot 10^3$ кПа; 5) паля (грунтоцемент, що армований сталевим каркасом) $E=140 \cdot 10^5$ кПа.

Постановка палі діаметром 0.2 м саме в положення між рейками базується на результатах статті [165], а також на технологічній можливості бурового агрегату, що може проводити буріння без зняття рейкошпальної решітки. Діаметр палі, що досліджувався в рамках цього

Проекту, вважається зменшеним, оскільки частіш усього діапазон діаметрів коливається в межах 0.3...1.2 м.

Під час чисельного аналізу SCAD застосовувався мультифронтальний метод розкладення матриці жорсткості із автоматичною оптимізацією ширини стрічки, як найбільш прогресивний метод роботи із матрицями, який застосовано у комплексі SCAD. Результатами розрахунку являються загальні деформації та напруження моделі по осям X та Z, причому нижченаведені результати показують характерну картину їх розподілення у земляному полотні.

Отримані результати чисельного аналізу надали змогу отримати значення вертикальних (рис. 5.6 і 5.7) деформацій для чотирьох варіантів (без палі, з палею довжиною 2.0, 4.0 і 6.0 м). Результати для вертикальних елементів довжиною 2.0 і 4.0 м для економії місця не наведені, але дані про деформації цього варіанту проаналізовані. Для презентації результатів деформованого стану застосований особливий фільтр відображення розрахункового комплексу SCAD. З його допомогою відображені вертикальні деформації для всіх варіантів підсилення, причому для кожного з них обрано постійний крок компоненти деформування (0.05 мм для вертикальних деформацій). Якісний аналіз отриманих результатів доводить, що введення в ґрунтове середовище вертикальних елементів, що мають підвищені деформаційні властивості (модуль пружності або деформації матеріалу палі або мікропалі), є ефективним методом зниження деформованого стану (рис. 5.6 і 5.7).

Не викликає сумнівів, що введення палі змінює характер ізоляцій. Вони, на відміну від непідсиленого земляного полотна (рис. 5.6, а і 5.7, а) втрачають плавність та гладкість. Наявність елемента, чий модуль пружності в 5.6 разів більше модуля пружності суглинку, формує нову картину деформування.

Якісний аналіз варіантів знаходження поїзда (на рейках 1520 мм – рис. 5.6, на рейках 1435 мм – рис. 5.7) свідчить про те, що зменшення ширини колії та її асиметричне знаходження на шпалі збільшує вертикальні деформації, але незначно. Найбільшу проблему складає саме асиметричність розподілу вертикальних деформацій (рис. 5.6, б і 5.7, б).

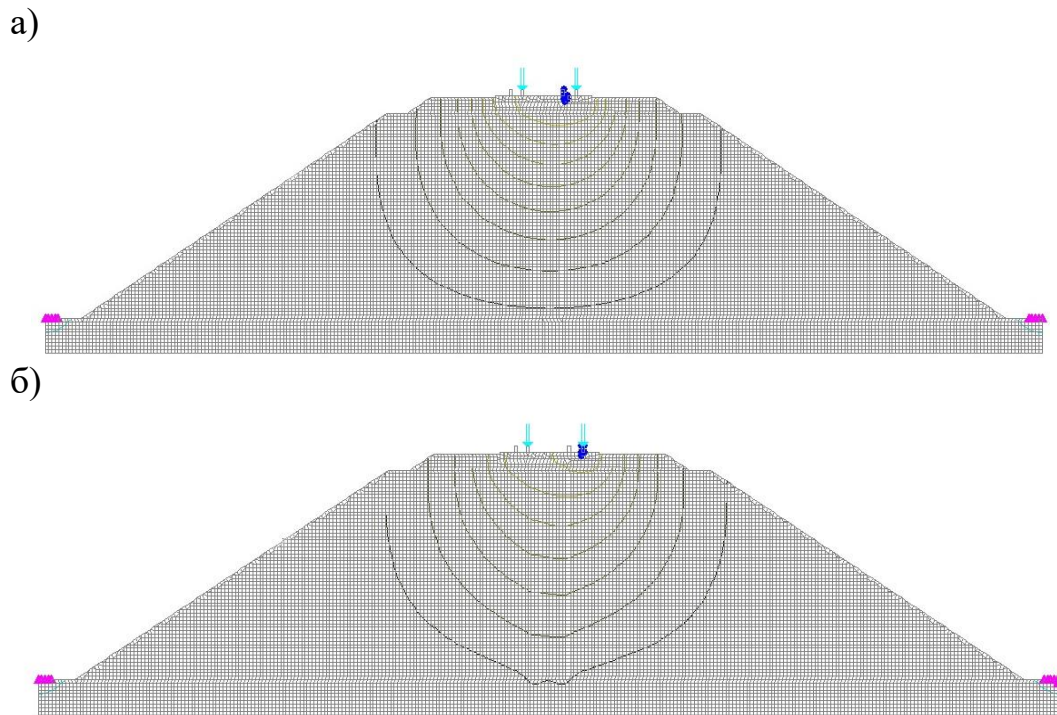
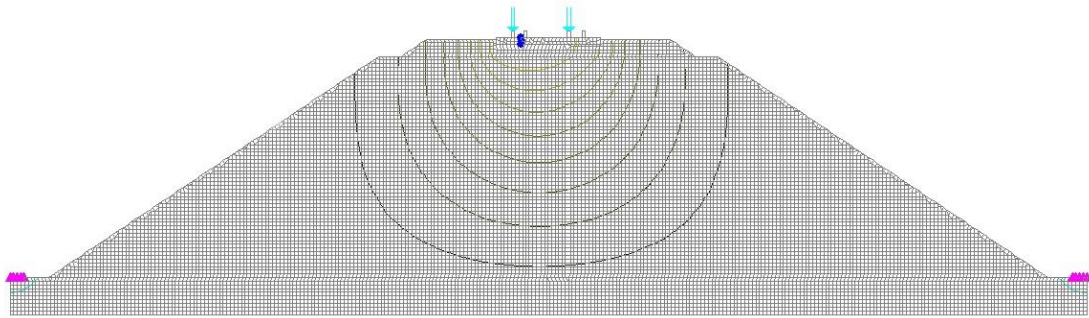


Рис. 5.6. Деформований стан земляного полотна (поїзд на рейках 1520 мм) (вертикальні деформації, мм; крок ізоліній фіксований і складає 0.05 мм) із підсиленням палею довжиною: а) 0 м (непідсилене); б) 6 м

Максимальний якісний ефект спостерігається у випадку вертикальних деформацій (рис. 5.7). Вертикальний елемент підсилення (грунтоцементна мікропалля) навіть довжиною 2 м значно впливає на розподіл ізоліній, а для довжини 6 м зміни є кардинальними.

Важливим висновком є те, що зростання довжини вертикального елемента підсилення надає зменшення деформацій в 1.1...1.2 рази. Це може бути основою для первинного рішення щодо вибору довжини вертикального елемента підсилення, виходячи з економічних умов та запланованого рівня зменшення деформацій.

а)



б)

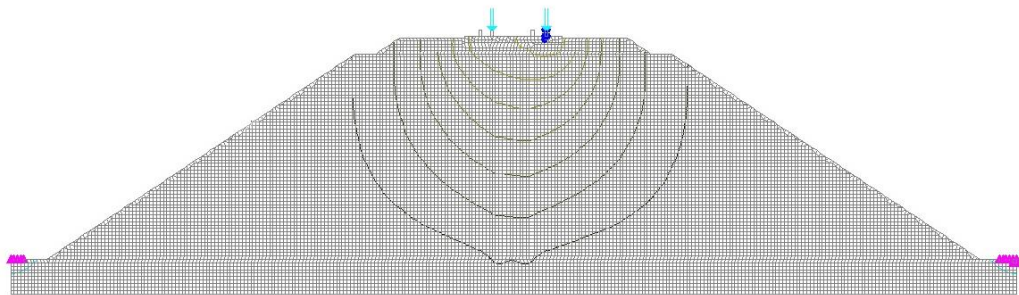


Рис. 5.7. Деформований стан земляного полотна (поїзд на рейках 1435 мм) (вертикальні деформації, мм; крок ізоліній фіксований і складає 0.05 мм) із підсиленням палею довжиною: а) 0 м (непідсилене); б) 6 м

5.4.2. Закономірності напруженого стану земляного полотна до впровадження європейської колії

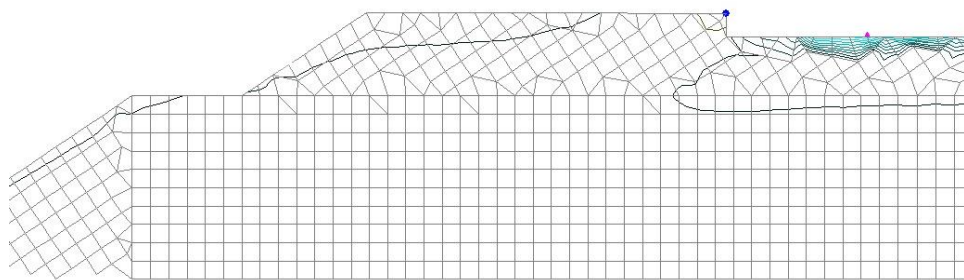
Результати чисельного аналізу надали змогу отримати значення горизонтальних (рис. 5.8) та вертикальних (рис. 5.9) напружень.

Результати отримані для чотирьох варіантів (без палі, з палею довжиною 2.0, 4.0 і 6.0 м); для вертикального елемента довжиною 4.0 м для економії місця не наведені, але дані про напруження цього варіанту проаналізовані нижче. Для презентації результатів напруженого стану застосований особливий фільтр відображення розрахункового комплексу SCAD. З його допомогою відображені горизонтальні та вертикальні напруження для всіх варіантів підсилення, причому для кожного з них обрано постійний крок компоненти (100 кПа для горизонтальних і вертикальних напружень). Така презентація, окрім кількісного аналізу, дозволяє і якісний, оскільки ізолінії на рис. 5.8 і 5.9 мають однакове значення. Для зручності в кожній з картин напруженого

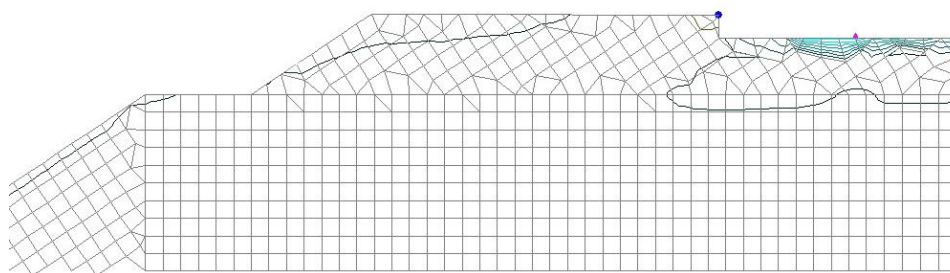
стану показано дві характерні точки: 1) максимального значення (коло); 2) мінімального значення (трикутник).

Якісний аналіз отриманих результатів доводить, що введення в ґрунтове середовище вертикальних елементів, що мають підвищені деформаційні властивості (модуль пружності або деформації матеріалу палі або мікропалі), є ефективним методом зниження напруженого стану (рис. 5.9).

а)



б)



в)

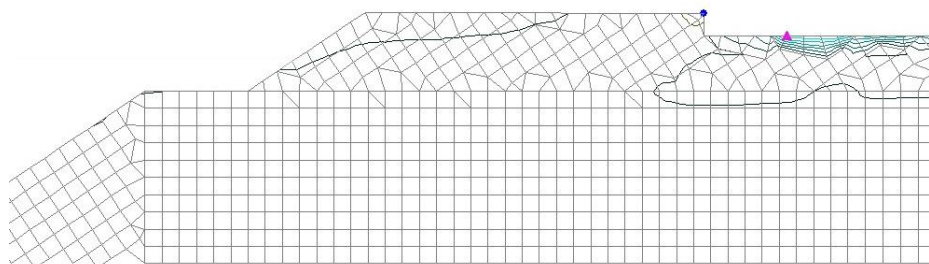
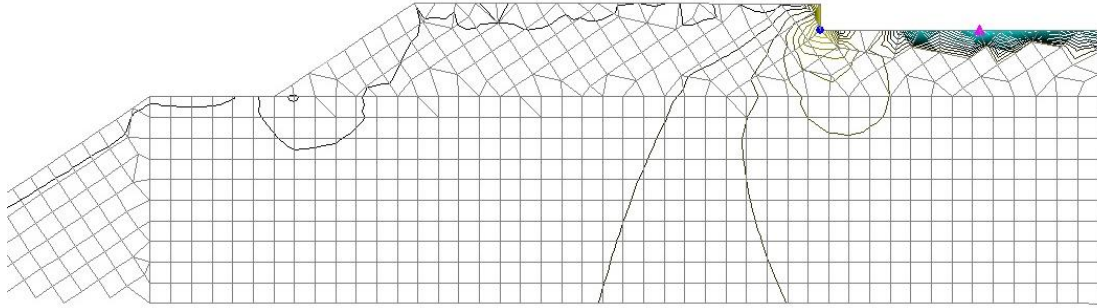
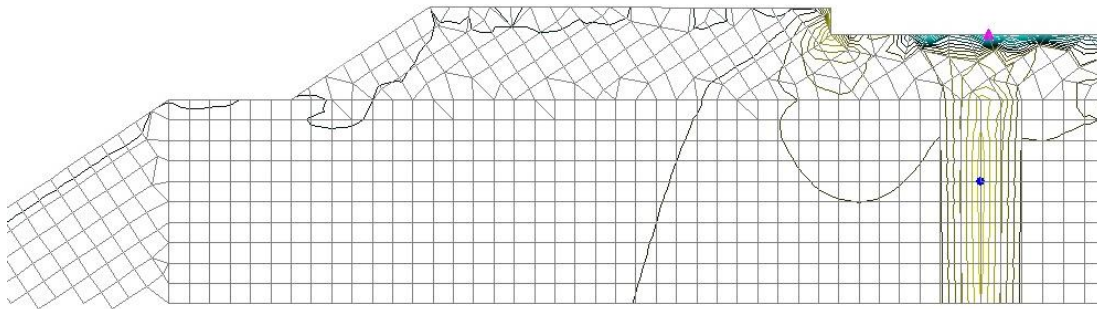


Рис. 5.8. Деформований стан земляного полотна (горизонтальні напруження, кПа; крок ізоліній фіксований і складає 100 кПа) із підсиленням палею довжиною: а) 0 м (непідсилене); б) 2 м; в) 6 м

а)



б)



в)

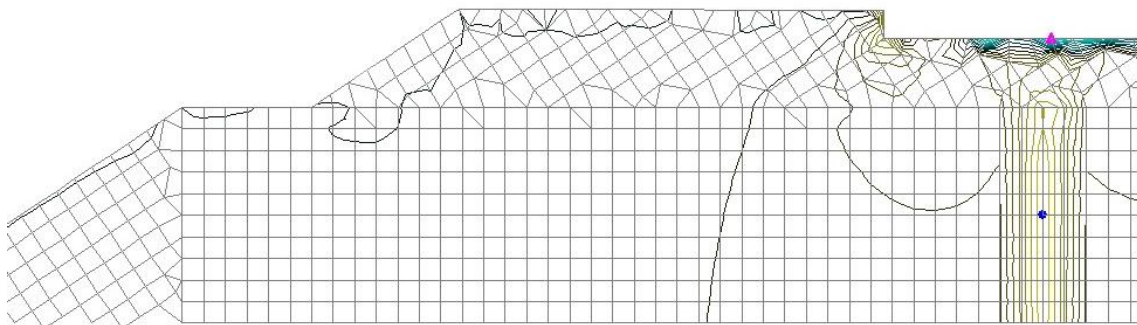


Рис. 5.9. Деформований стан земляного полотна (вертикальні напруження, мм; крок ізоліній фіксований і складає 100,0 кПа) із підсиленням палею довжиною: а) 0 м (непідсилене); б) 2 м; в) 6 м

Слід також відмітити, що на вертикальну компоненту напруженого стану підсилення такими елементами впливає суттєво, проте особливе встановлення палі відносно шпали позитивно впливає і на горизонтальну компоненту, що доведено отриманими результатами (рис. 5.8).

Не викликає сумнівів, що введення палі змінює характер ізоліній. Вони, на відміну від непідсиленого земляного полотна (рис. 5.8, а і

5.9, а) втрачають плавність та гладкість. Наявність елемента, чий модуль пружності в 5.6 разів більше модуля пружності суглинку, формує нову картину деформування. Так, ядро максимальних горизонтальних напружень зменшується, а характерна ізолінія стискається (рис. 5.8, б), щоб замкнутися всередині земляного полотна. Це пояснюється тим, що вертикальний елемент перешкоджає також і горизонтальним деформаціям (рис. 5.9, в).

Максимальний якісний ефект спостерігається у випадку вертикальних напружень (рис. 5.9). Вертикальний елемент навіть довжиною 2 м значно впливає на розподіл ізоліній (рис. 5.9, б і в). Ці зміни можна простежити на прикладі характерної ізолінії, яка є сталою та знаходиться всередині вертикального елемента підсилення.

Кількісний аналіз максимальних напружень дозволив побудувати та апроксимувати їхні закономірності (рис. 5.10).

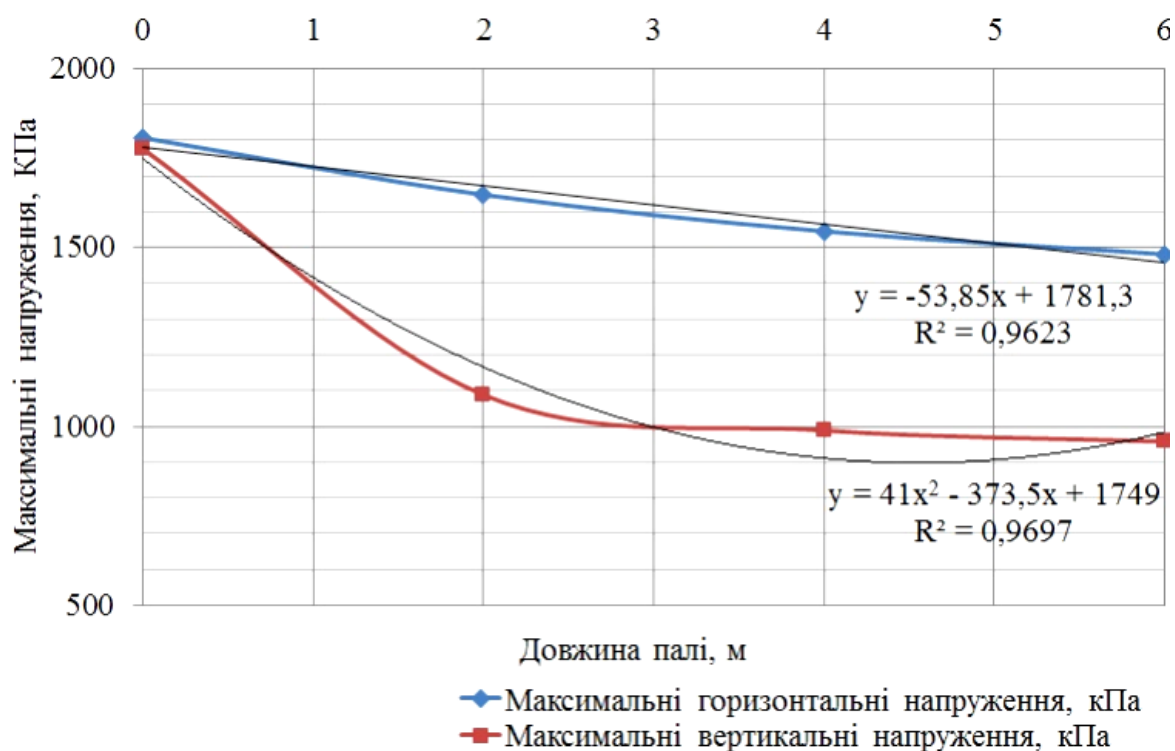


Рис. 5.10. Закономірності зміни максимальних вертикальних та горизонтальних напружень вертикального елемента підсилення при варіації його довжини

Графік (рис. 5.10) демонструє, що закономірності зміни напружень при варіації довжини вертикального елемента підсилення є лінійними для горизонтальної компоненти та поліноміальними другого ступеня для вертикальної (коефіцієнт кореляції $R^2=0.96\dots0.97$).

5.4.3. Закономірності деформованого стану земляного полотна після впровадження європейської колії

Розподіл вертикальної компоненти деформованого стану непідсиленого горизонтальним або вертикальним елементом земляного полотна в загальних рисах співпадає з уявленням про деформування жорсткої балки на пружній основі, яке наведене в роботі [177]. Якщо конкретизувати це уявлення, коригуючи його у відповідності з наявністю в загальній системі «рейко-шпальна решітка – баласт – земляне полотно», то можна виділити три зони інтенсивності вертикальної компоненти (рис. 5.11). Надалі існування цих трьох зон також обґрунтовується результатами чисельного аналізу.

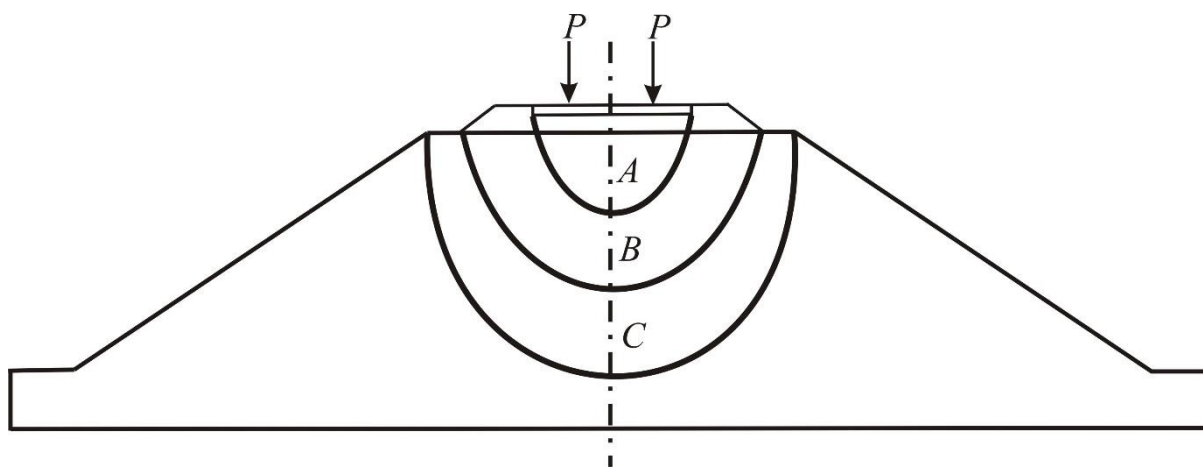


Рис. 5.11. Схема розподілу вертикальної компоненти в земляному полотні

Рівень вертикальних переміщень є максимальним в зоні *A*, зменшується в зоні *B* та загасає до мінімального значення в зоні *C*. В реальному земляному полотні, що характеризується стрибкоподібним розподілом деформаційних характеристик (модуль пружності або деформації E), форма цих зон є дещо зміненою. Але характер змін не настільки виразний, щоб відмічати особливості розподілу деформацій під шпалою (модуль пружності залізобетону $E=4.0 \cdot 10^7$ кПа), під щебене-

вим баластом (модуль пружності $E=10 \cdot 10^4$ кПа) та в земляному полотні з суглинки (модуль деформації $E=35 \cdot 10^3$ кПа). Звичайно, від однієї зони до іншої значення вертикальних переміщень зменшується саме тому, що земляне полотно влаштоване таким чином, щоб перерозподіляти деформований стан. Проте, деформаційних характеристик баласту та ґрунту земляного полотна не буває достатньо, щоб знизити вертикальну компоненту. Тоді відбувається процес накопичення деформацій, проаналізований вище.

Аналізуючи рис. 5.11, можна визначити принцип введення вертикальних елементів підсилення (паль, що створені на основі бурозмішувальної технології) всередину земляного полотна. Цей принцип направлений на те, щоб максимально знизити деформаційний стан та стабілізувати земляне полотно. Не виникає сумнівів, що вертикальні елементи підсилення слід розміщувати всередині «ядра» максимальних вертикальних переміщень, тобто таким чином, щоб паля перерізувала три зони і зменшувала вертикальні деформації (рис. 5.12, а, Варіант 1). Варіант 1 є єдиним варіантом занурення поодинокі палі. В подальшому чисельному аналізі, окрім Варіанту 0 (непідсилене земляне полотно), Варіант 1 буде відігравати роль еталонного, оскільки порівняння інших варіантів підсилення земляного полотна саме з ним дозволяє визначити їхню ефективність в стабілізації вертикальної компоненти деформованого стану.

Варіанти 2, 3 і 4 застосовують занурення подвійних паль, що симетрично розміщені в земляному полотні відповідно до вертикальної площини симетрії. Їхнє розташування не є довільним. Ці схеми стабілізації, що виконуються на основі бурозмішувальної технології, можливі за умов технології, а саме можливості буріння в баласті та земляному полотні без підняття рейко-шпальної решітки. Відповідно, існує три варіанти буріння: всередині між шпалами (Варіант 2), біля рейки (Варіант 3) та на узбіччі земляного полотна (Варіант 4).

Слід одразу відмітити, що Варіант 4 є найменш ефективним, що доведено результатами наукової роботи [165]. Така ситуація має логічне пояснення, виходячи з аналізу рис. 5.12. Оскільки Варіант 4 знаходиться поза межами «ядра» максимальних вертикальних переміщень (зона *A* і частково зона *B*), він не може на них впливати. Таким чином, в рамках цієї статті Варіант 4 не розглядається, як найменш ефективний під час стабілізації земляного полотна.

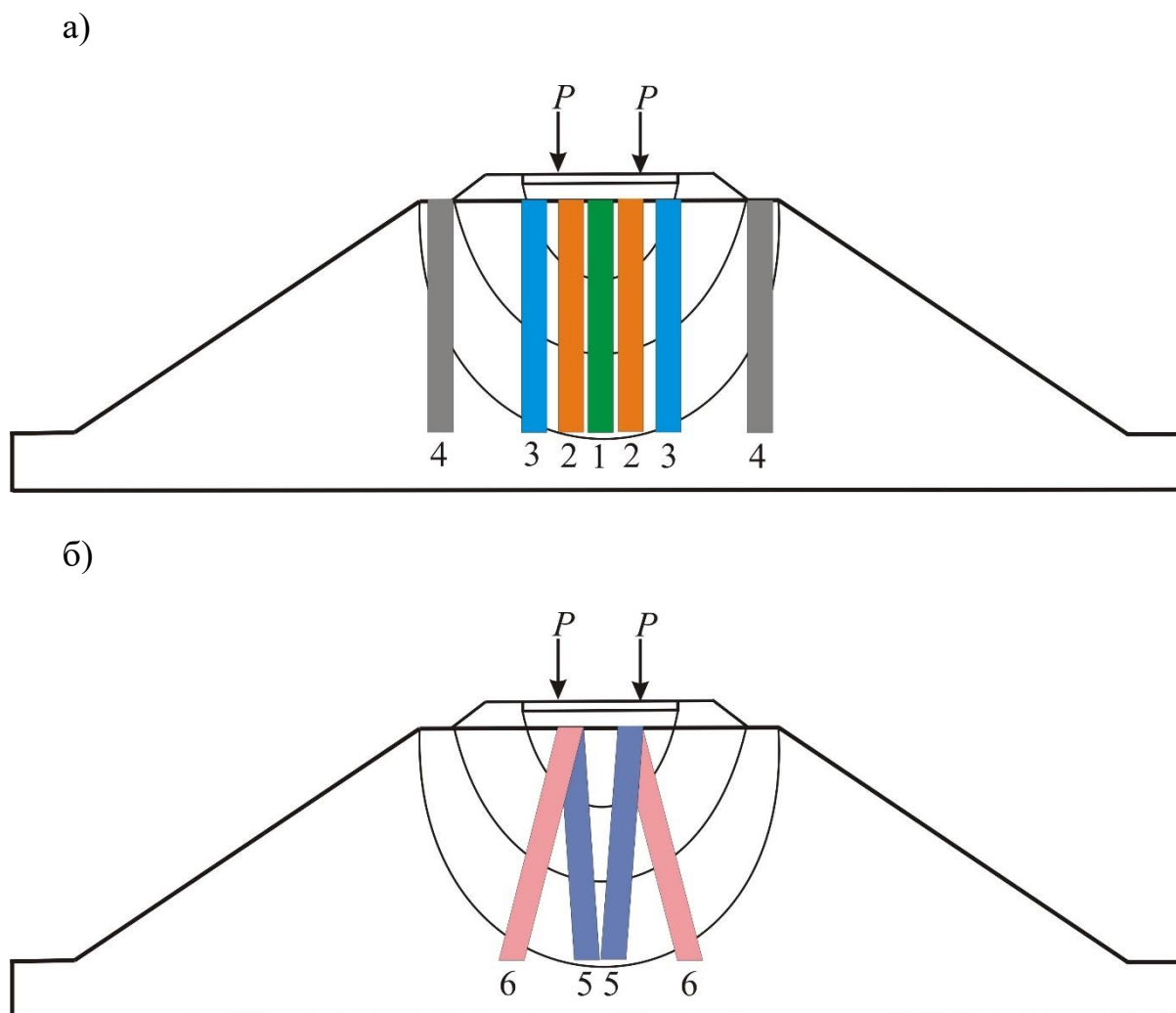


Рис. 5.12. Схеми стабілізації деформованого стану земляного полотна за допомогою вертикальних (а) та похилих (б) паль, що створені на основі бурозмішувальної технології

Варіанти з подвійних паль (рис. 5.12, а, Варіанти 2 і 3) мають логічне обґрунтування з позиції аналізу зон інтенсивності вертикальної компоненти деформованого стану (рис. 5.11). Їхнє розташування всередині «ядра» є симетричним відносно вертикальної площини симетрії земляного полотна, а подвоєння паль дозволяє прогнозувати зменшення вертикальних переміщень і загальну стабілізацію земляного полотна.

Важливим нововведенням, яке в даній роботі також буде детально розглянуте, є застосування похилих елементів (рис. 5.12, б). Такий ва-

ріант палъ розглядається нечасто, що пояснюється характером розподілу вертикальних деформацій (рис. 5.11). Дійсно, зниження саме вертикальної компоненти деформованого стану ефективніше під час застосування вертикальних елементів підсилення. Однак, характер розподілу «ядра» вертикальної компоненти, особливо зони А, дозволяє прогнозувати позитивний вплив похилих елементів. Цей вплив пояснюється тим, що елемент підсилення, що має ухил, більш активно прорізає зони інтенсивних деформацій. З технологічної точки зору, не виникає проблем в реалізації бурозмішувальної технології з залізничної платформи, щоб досягти ухилу елемента підсилення в $10...15^\circ$ (Варіант 5 і 6 мають ухил $10,6^\circ$ до вертикалі).

Таким чином, для подальшого чисельного аналізу схем стабілізації деформованого стану із застосуванням методу скінченних елементів приймаються такі варіанти: Варіант 0 (непідсилене земляне полотно); Варіант 1 (земляне полотно, підсилене поодинокую вертикальною паляю, рис. 5.12, а); Варіант 2 (земляне полотно, підсилене подвійними вертикальними палями всередині рейкошпальної решітки, рис. 5.12, а); Варіант 3 (земляне полотно, підсилене подвійними вертикальними палями зовні рейкошпальної решітки, рис. 5.12, а); Варіант 5 (земляне полотно, підсилене подвійними похилими палями всередині рейкошпальної решітки, що нахилені до площі симетрії, рис. 5.12, б); Варіант 6 (земляне полотно, підсилене подвійними похилими палями всередині рейкошпальної решітки, що нахилені від площі симетрії, рис. 5.12, б).

Чисельний аналіз схем стабілізації деформованого стану із застосуванням методу скінченних елементів реалізується за допомогою розрахункового комплексу SCAD for Windows. Розроблена скінченно-елементна модель земляного полотна, яка налічує 87150 вузлів та 57526 скінченних елементів, яка відрізняється від моделі, що наведена на рис. 5.13. Вона відображає земляне полотно висотою 4 м в масштабі 1:1. Довжина елемента підсилення співпадає з висотою земляного полотна.

Постановка задачі є просторовою. Відповідно, скінченними елементами є об'ємні призми та тетраедри з характерним розміром $0,05 \times 0,05 \times 0,05$ м. Розбивка є дрібною, але ще більше згущується в областях, що моделюють шпалу і рейки з відстанню 1435 мм між ними. Кількість скінченних елементів характеризує задачу чисельного аналізу як середньої розмірності.

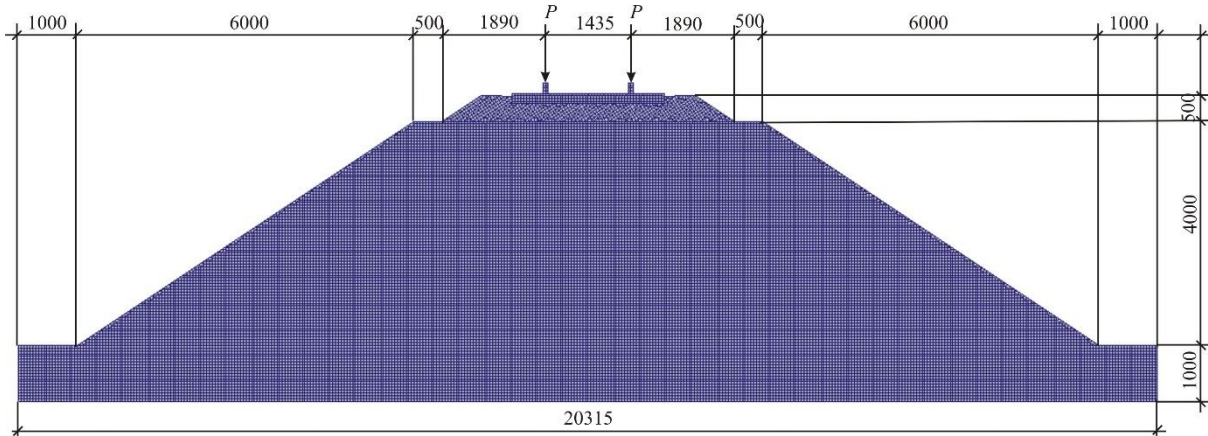


Рис. 5.13. Скінченно-елементна модель земляного полотна

Закріплення моделі застосовано таким чином, щоб зменшити крайовий ефект та його вплив на деформований стан земляного полотна. Для цього під земляним полотном змодельована ґрунтова основа розмірами 1×1 м, яка має по боках заборону горизонтальних деформацій, а по нижній площині – заборону горизонтальних і вертикальних деформацій.

Деформаційні характеристики моделі наступні: рейка – модуль пружності сталі $E=2.06 \cdot 10^8$ кПа; шпала – модуль пружності залізобетону $E=4.0 \cdot 10^7$ кПа; щебневий баласт – модуль пружності $E=10 \cdot 10^4$ кПа; земляне полотно з суглинка – модуль деформації $E=35 \cdot 10^3$ кПа; ґрунтоцемент – модуль деформації $E=37.5 \cdot 10^4$ кПа.

Навантаження прикладене до рейок, його значення складає $P=98.1$ кН, що відповідає 20 т статичного навантаження, прикладеним на вісь. Рейки жорстко приєднані до шпал, що забезпечується скінченними елементами комплексу SCAD. Частина рейко-шпальної решітки, що змодельована, рівномірно передає тиск на баласт, який перерозподіляє напруження на земляне полотно.

Після чисельного аналізу 6 скінченно-елементних моделей з вертикальними та похилими елементами армування було отримано загальний деформований стан скінченно-елементної моделі, вертикальна складова якого представлена на рис. 5.14 - 5.16. Вертикальні деформації на рисунках представлені у відсотках. Значення деформації для базового варіанту 1 (рис. 5.14, а) встановлені на рівні 100 %. Характерні значення свідчать про зменшення вертикальних деформацій порівняно з неармованим варіантом. На рисунках для можливості кращого розгляду ізоліній та ізополів вертикальної компоненти деформованого

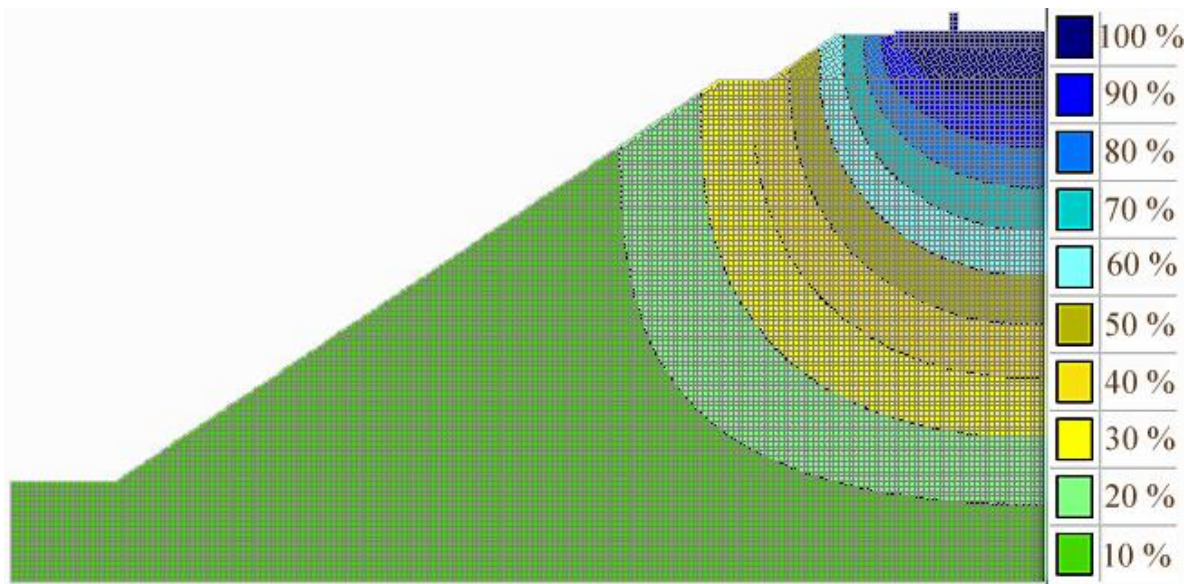
стану наведено лише половину скінченно-елементної моделі. Аналіз деформованого стану непідсиленого земляного полотна (Варіант 0, рис. 5.14, а) доводить те, що розподіл деформацій в баласті та земляному полотні відповідає трьохзонному розподілу, наведеному на рис. 5.11). Ізополя без зламів, мають гладку кривободинійну форму, що свідчить про правильний вибір скінченно-елементної сітки та достатньо високу точність проведеного чисельного аналізу.

Важливим в подальшому дослідженні є якісний аналіз зміни форми ізолій та ізополів, що викликані уведенням в однорідне земляне полотно вертикальних або похилих елементів. Саме зміна форми та площі ізополів, особливо в зоні *A*, дозволяє, разом з результатами кількісного аналізу, стверджувати про ефективність схеми стабілізації або негативний чи недостатній ефект, який полягає в незначному зменшенні вертикальних деформацій.

Так, варіант підсилення поодиноким палем (Варіант 1, рис. 5.14, б) демонструє явне збільшення площі зони *A*, при цьому значення деформацій в ній суттєво зменшуються. Подібна картина спостерігається і для випадку подвійних паль, обидва варіанти яких (особливо Варіант 2) збільшують площу зони *A*, зменшуючи в ній інтенсивність вертикальних деформацій (рис. 5.15, б). Ще яскравіше зміна площі і форми ізополів, а також їхніх значень, спостерігається у випадку подвійних похилих паль (рис. 5.16).

Результати чисельного аналізу доводять гіпотезу про максимально ефективну стабілізацію деформованого стану, причиною якої є занурення елемента підсилення, а також збільшене значення його деформаційних властивостей. Модуль пружності ґрунтоцементу в 10...11 разів більше модуля деформації суглинку земляного полотна, що надає елементу підсилення приймати більшу частину деформацій від баласту та рейко-шпальної решітки. При нормативному значенні максимальних вертикальних переміщень, отримані значення непідсиленого земляного полотна (Варіант 0, рис. 5.14, а) вже є такими, що потребують інженерного втручання. Наявність же палі в земляному полотні «розмазує» зону максимальних вертикальних деформацій, тим самим зменшуючи їхні значення до 1.5 разів лише для поодинокій палі (Варіант 1, рис. 5.14, б). Відповідно, виконується стабілізація деформованого стану.

a)



б)

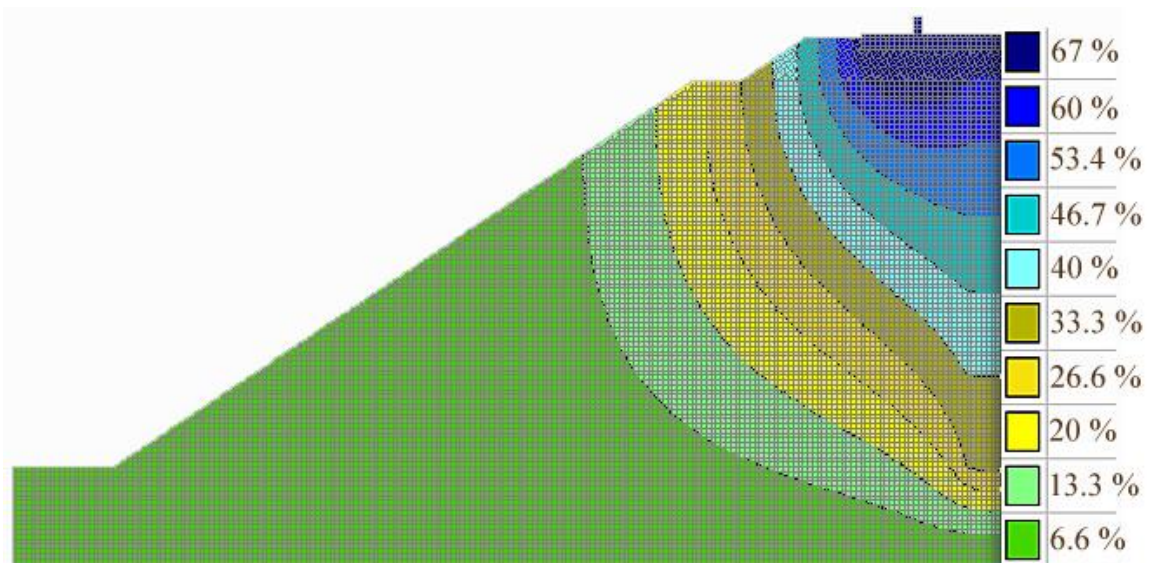
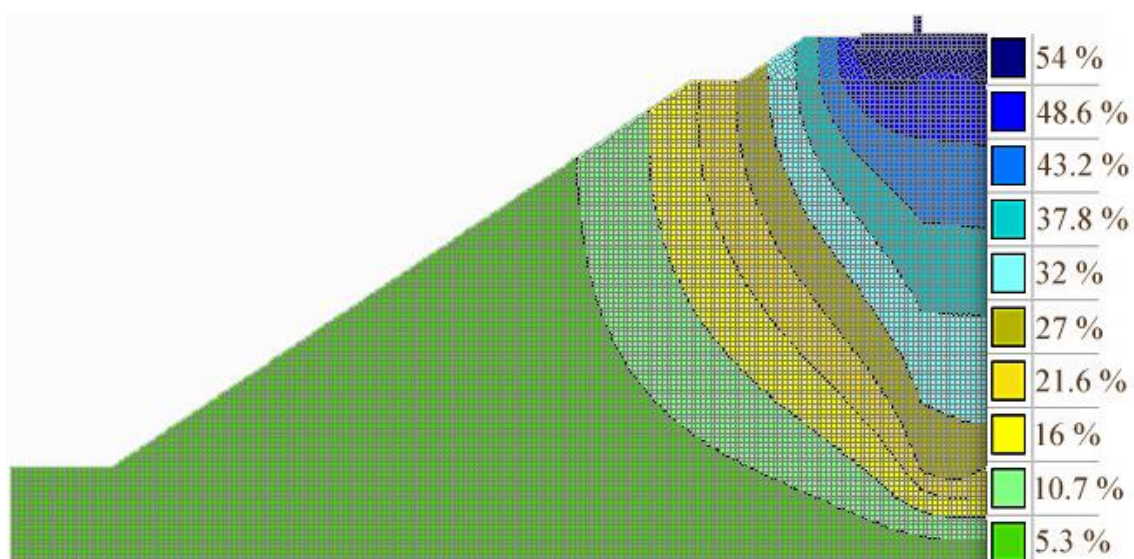


Рис. 5.14. Деформований стан скінченно-елементних моделей земляного полотна: а) Варіант 0; б) Варіант 1

а)



б)

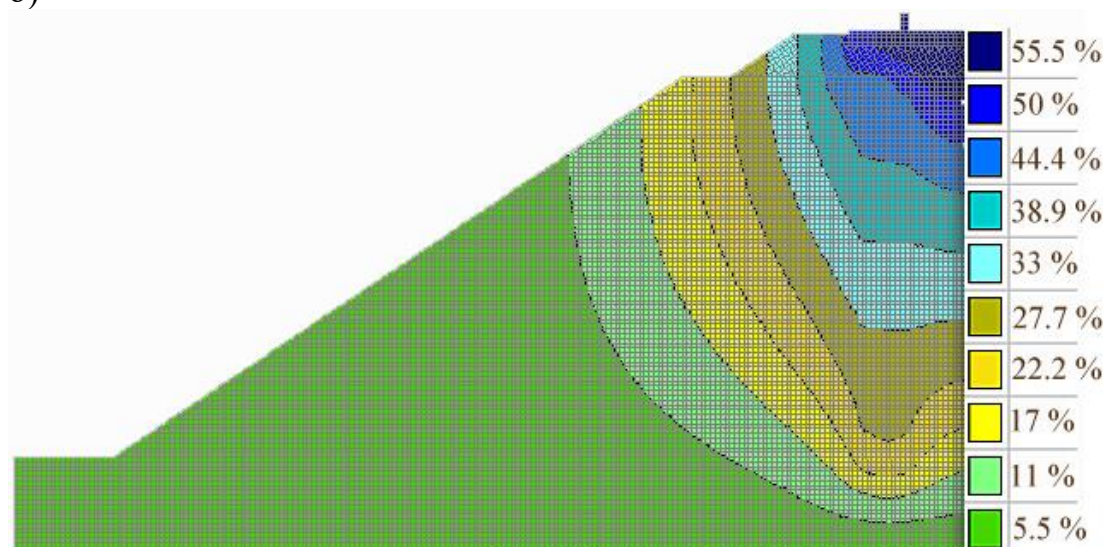
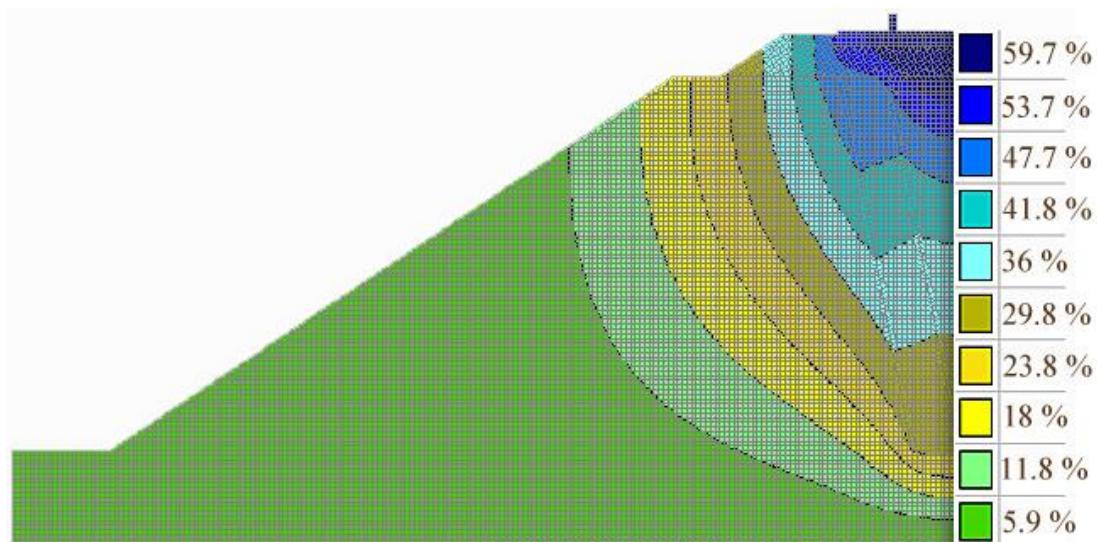


Рис. 5.15. Деформований стан скінченно-елементних моделей земляного полотна: а) Варіант 2; б) Варіант 3

Уведення подвійних вертикальних елементів також зменшує значення вертикальних переміщень відповідно в 1.85 рази (Варіант 2, рис. 5.15, а) та 1.8 рази (Варіант 3, рис. 5.15, б). Слід відмітити, що порівняння двох варіантів з подвійними палями підтверджують гіпотезу про те, що елемент підсилення слід розміщувати всередині між рейками для того, щоб добитися більшого ефекту стабілізації. Вибір між

варіантом поодинокі палі (Варіант 1) та варіанту подвійних паль (Варіант 2) можливий лише за вимоги техніко-економічного обґрунтування подвійного застосування матеріалів та робіт.

а)



б)

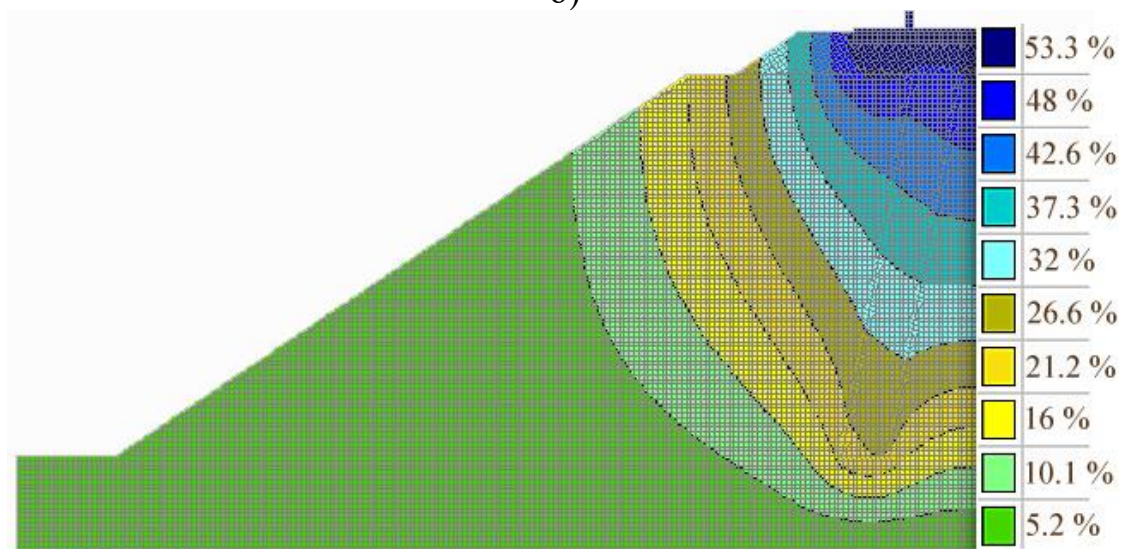


Рис. 5.16. Деформований стан скінченно-елементних моделей земляного полотна: а) Варіант 5; б) Варіант 6

Занурення подвійних похилих елементів доводить ефективність схем стабілізації деформованого стану, оскільки значення вертикальних деформацій зменшується відповідно в 1.68 рази (Варіант 5, рис.

5.16, а) та 1.88 рази (Варіант 6, рис. 5.16, б). Варіант 6 з похилими палями, що направлені з середини між рейок вбік укусу земляного полотна (див. рис. 5.12) є найкращою схемою стабілізації, виходячи із отриманого ефекту зменшення вертикальних переміщень серед всіх варіантів. На відміну від Варіанту 2 (рис. 5.15, а), занурена під кутом паля не просто змінює площу і форму ізополів, а й явно викривлює ізолінії (рис. 5.16, б), які отримують зломи. Це свідчить про те, що найбільш деформовані зони змінюють свою конфігурацію. Проте, вибір між Варіантом 2 і Варіантом 5 також потребує техніко-економічного обґрунтування, оскільки проведення робіт під кутом потребує більших матеріальних та трудових витрат, ніж вертикальний варіант бурозмішувальної технології.

Висновки до розділу 5

Аналіз концепцій підсилення земляного полотна в Україні і Європейському Союзі та їхнє обґрунтування надало змогу з'ясувати напрями розвитку українських залізниць. Встановлено, що максимальне значення позитивного впливу на зменшення вертикальних деформацій надають вертикальні елементи підсилення.

Розроблені в роботі математичні моделі для визначення характеристик земляного полотна під суміщеною колію доводять те, що підсилення вертикальними елементами впливає максимально позитивно на деформування системи. Доведено, що наявність вертикальних паль зменшує вертикальну компоненту деформацій в 1.10...1.24 рази.

Результати чисельного аналізу доводять гіпотезу про максимально ефективну стабілізацію деформованого стану, причиною якої є занурення елемента підсилення, а також збільшене значення його деформаційних властивостей. Отримано закономірності напружено-деформованого стану колії та земляного полотна при переході на Європейську колію та під час підсилення.

Кожний з запропонованих в роботі варіантів потребує техніко-економічного обґрунтування, оскільки проведення робіт з підсилення земляного полотна потребує різних матеріальних та трудових витрат.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Враховуючи значні обсяги перевезень у напрямку Схід – Захід, а також вигідне географічне положення України, можна стверджувати, що створення ефективних способів організації транспортування вантажів у міжнародному сполученні з країнами Євросоюзу дозволить залучити додаткові обсяги транзитних вантажопотоків.

Позитивний досвід, насамперед країн Європейського Союзу, показав, що за умови наявності ефективної транспортної мережі та розвинутої системи передачі вантажів у пунктах зміни стандартів залізничної інфраструктури значно підвищуються як внутрішні, так і транзитні вантажопотоки, що дає можливість збільшити привабливість країни в міжнародній системі перевезень.

Отримані результати, дозволяють зробити висновок, що міжнародні перевезення, які здійснюються через територію України, мають певні особливості. Зміна стандартів залізничної колії на кордоні з європейськими країнами змушує шукати найбільш раціональні маршрути для транспортування вантажів (урахування дальності, технічного стану й параметрів МТК, швидкості доставки тощо) і раціональних технологій безперевантажувальної передачі вантажів на прикордонних пунктах, що дозволить вивести ці перевезення на інноваційний шлях розвитку.

На відміну від результатів досліджень, опублікованих у вітчизняних і закордонних працях, автори при виборі логістичних схем перевезень залізничним транспортом по міжнародних транспортних коридорах розглядали весь ланцюжок транспортування: відправник – транспортний коридор – перетин кордону з різним стандартом залізничної колії – одержувач. Одержані результати дозволяють підвести наукове підґрунтя під створення та подальший розвиток сучасної національної системи інтермодальних перевезень, а також оптимізацію параметрів її окремих ланок для подальшої інтеграції у європейську транспортну систему.

З 2023 по 2024 рр. наукова робота виконувалася авторами під час реалізації проекту «Наукове обґрунтування впровадження європейської колії на території України в повоєнний період» за підтримки гранту Національного фонду досліджень України, у рамках якої розроблено методичні підходи до визначення раціональних способів переходу ру-

хомого складу з широкої української колії 1520 мм на європейську колію 1435 мм для забезпечення транзитних перевезень. Отримані результати не розходяться з результатами відомих вітчизняних і закордонних досліджень, але, на відміну від них, АТ «Укрзалізниця» може використовувати інформацію для різних сценаріїв просування вантажопотоків, що дозволяє планувати заходи з прискорення доставки вантажів як на території України, так і під час передачі вантажів на прикордонних станціях, прогнозувати отримання доходів від здійснення міжнародних перевезень у напрямку Схід – Захід, що дуже важливо для залучення інвестицій.

Одночасно з пропозиціями щодо урахування впливу тих чи інших факторів на інноваційні технології при переході рухомого складу з української на європейську колію для забезпечення транзитних перевезень Україна – Євросоюз сьогодні є низка невіршених питань, серед яких нетехнологічні втрати часу на прикордонних станціях, відсутність достатніх інвестицій у рухомий склад та інфраструктуру. Безумовно, для прийняття остаточного рішення повинні враховуватись не тільки економічні, але й соціальні фактори, а також надійність (безвідмовність роботи) тієї чи іншої системи транспортування вантажів. Це питання підлягає додатковому дослідженню, але й зараз можна говорити про те, що найбільшу надійність і найменші затримки на кордоні забезпечують варіанти будівництва європейської колії до відповідних терміналів чи портів.

Впроваджуючи пропозиції Європейської комісії і Європейського інвестиційного банку щодо перебудови мережі України залізниць під європейським стандартом 1435 мм, в даній роботі досліджені різні сценарії: існуюча двоколійна ділянка перебудовується на дві одноколіїні з шириною колії 1435 і 1520 мм; на головній колії укладається суміщена колія (1435/1520 мм); проектується залізнична колія європейського стандарту на новій трасі. Враховуючи обсяги і структуру перевезень, потрібні інвестиції й терміни виконання робіт на конкретних напрямках залізниць, надані рекомендації відповідно до розглянутих сценаріїв, що буде сприяти інтеграції залізничної мережі України у європейську транспортну систему.

Отримані результати були широко представлені для обговорення на Міжнародних конференціях: VI międzynarodowa konferencja naukowa zorganizowana przez instytut kolejnictwa i wydział transportu politechniki warszawskiej «Najnowsze technologie w transporcie

szynowym» (Warszawa, November 16-17, 2017); «Науково-технічне забезпечення розвитку залізничних перевезень у міжнародному сполученні» (19.04.2018 – 20.04.2018, м. Дніпро); Міжнародній науково-практичній конференції «Енергооптимальні технології, логістика та безпека на транспорті» (18.06.2018 – 19.06.2018, м. Львів); Міжнародній науково-практичній конференції здобувачів вищої освіти, викладачів та науковців «Сучасні дослідження: транспортна інфраструктура та інноваційні технології» (29.11.2023 – 30.11.2023 р., м. Київ); 82-й Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту», (20.04.2023 – 21.04.2023 р. м. Дніпро); II Міжнародній науково-практичній конференції «Логістика і транспортна безпека: проблеми та перспективи розвитку в контексті аналізу сучасних викликів і загроз» (09.11.2023 р. м. Дніпро); Proceedings of 27th International Scientific Conference. Transport Means 2023. Lithuania, TRANSBALTICA 2024: Transportation Science and Technology - Invitation Letter (19.09.2024 – 20.09.2024 р. м. Вільнюс, Литва); 10-й Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд і будівель на залізничному транспорті» (20.11.2024 – 22.11.2024 р. м. Харків) і отримали схвалення.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Тарасовський Ю. УЗ отримає від ЄС майже €43 млн на будівництво євроколії. URL: <https://forbes.ua/news/uz-otrimae-vid-es-mayzhe-43-mln-na-budivnitstvo-evrokolii-23072024-22561> (дата звернення: 22.03.2025).
2. Баранов А. Г. Транспортна політика Європейського Співтовариства та зміцнення зв'язків з країнами, які не є членами ЄС. Департамент з політики розвитку Міністерства інфраструктури України. URL: <http://www.myshared.ru/slide/622074/> (дата звернення: 22.03.2025).
3. Залізниця Польщі. URL: <http://ostarbeiter.vn.ua/rkr>. (дата звернення: 22.03.2025).
4. Feuille de route pour la Pologne. URL: <https://fr.polandmap360.com/feuille-de-route-pour-la-pologne/> (дата звернення: 22.03.2025).
5. Залізниця світу. Залізниця Польщі. URL: <http://www.1430mm.ru/railway-poland> (дата звернення: 22.03.2025).
6. Report on the activities of the organisation for co-operation between railways for 2022. URL: <https://en.osjd.org/api/media/resources/2729?action=download> (дата звернення: 22.03.2025).
7. Slovak Republic Railways will need 223 million euros to maintain infrastructure. *Industry publication for railway transport specialists*. URL: <https://www.railway.supply/en/slovak-republic-railways-will-need-223-million-euros-to-maintain-infrastructure/> (дата звернення: 22.03.2025).
8. OSJD Bulletin of Statistical Data on Railway Transport for 2021. URL: <https://en.osjd.org/api/media/resources/1818?action=download> (дата звернення: 22.03.2025).
9. Gryniuk V. Татранська Магістраль – стежка через всі Татри. Словаччина. URL: <https://gryniuk.com/tatranska-magistrala/> (дата звернення: 22.03.2025).
10. Будівництво залізниці Будапешт-Белград: завершено ще один етап. *MyHungary.Net*. URL: <https://myhungary.net/news/3129-stroitelstvo-zheleznoy-dorogi-budapesht-belgrad-zavershen-esche-odin-etap.html> (дата звернення: 22.03.2025).
11. Web předpisu o zaměstnaneckých zahraničních jízdách čd. Maďarsko. URL: <http://fipky.jednoduse.cz/chci-jet-do/madarsko/> (дата звернення: 20.10.2024).
12. Угорські державні залізниці. Вікіпедія. URL: <https://w.wiki/DXjM> (дата звернення: 22.03.2025).
13. CFR Călători. URL: <https://www.cfrcalatori.ro/en/> (дата звернення: 22.03.2025).
14. Datei: Railway map of Romania. URL: https://de.m.wikipedia.org/wiki/Datei:Railway_map_of_Romania.png (дата звернення: 20.10.2024).

15. Перелік вантажних станцій Залізниці Молдови. URL: <https://osjd.org/api/media/resources/15319> (дата звернення: 20.10.2024).
16. Національна транспортна стратегія України на період до 2030 року. *Схвалено Кабінетом Міністрів України від 30.05.2018*. URL: <https://mtu.gov.ua/news/28581.html> (дата звернення 28.10.24)
17. Курган М. Б., Курган Д. М. Науково-технічне забезпечення залізничного сполучення Україна – Євросоюз : монографія. Дніпро, Вид-во ПФ «Стандарт-Сервіс», 2018. 268 с.
18. Довідник основних показників роботи залізниць України (2005-2020 роки) / АТ «Укрзалізниця». Управління статистики. Київ, 2021. 41 с.
19. Програма оновлення рухомого складу ПАТ «Укрзалізниця» на період до 2021 року (проект). Київ, 2016. 66 с.
20. Kurhan M. B. Verbitskii V. G., Kurhan D. M. Difference Research of Ukrainian and European Railway Infrastructure. *Science and Transport Progress*. 2019. Vol. 5(83). P. 52–70. <https://doi.org/10.15802/stp2019/184497>
21. Про внесення змін до деяких нормативно-правових актів Міністерства транспорту України та Міністерства транспорту та зв'язку України. Наказ Міністерства Інфраструктури України № 798 від 25.11.2020. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0090-21#Text> (дата звернення: 22.03.2025).
22. Водяний А. ЄС розробив стратегію переходу України на євроколію. *LIGA.net*. URL: <https://biz.liga.net/ua/all/transport/novosti/evrosoyuz-razrobotal-strategiyu-perehoda-ukrainy-na-evroputi-karta> (дата звернення: 22.03.2025).
23. Kurhan M., Kurhan D., Husak M., Hmelevska N. The advisability of using dual gauge for expansion of the international traffic. *Transport Means - Proceedings of 24th International Conference*. 2020. P. 469-474.
24. Kurhan D., Kurhan M., Hmelevska N. Analysis of Feasibility for Implementing European Standard Railway Tracks in Ukraine. *Transport Means. 27th International Scientific Conference*. 2023. Vol. II. P. 605 - 610.
25. Fischer S., Kurhan D., Kurhan M., Hmelevska N. Analysis of Stress-Strain State Changes in Railway Tracks During Transition to European Gauge. *IOP Conference. Series: Earth and Environmental Science*. 2024. Vol. 1348(1). Essays of Mining Science and Practice: Proc. of the 5th International Conference, 200033. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1348/1/012029>.
26. Pomykała A., Engelhardt J. Concepts of construction of high-speed rail in Poland in context to the European high-speed rail networks. *Socio-Economic Planning Sciences*. 2023. Vol. 85. <https://doi.org/10.1016/j.seps.2022.101421>
27. Польський СРК та "Укрзалізниця" спільно працюватимуть над будівництвом високошвидкісної залізниці. URL: https://cfts.org.ua/news/2023/01/19/polskiy_cpk_ta_ukrzaliznitsya_spilno_pra_tsyuvatimut_nad_budivnitstvo_visokoshvidkisno_zalznitsi_73421 (дата звернення: 22.03.2025).

28. Kurhan M., Kurhan D., Husak M., Hmelevska N. Perspectives of High-Speed Train Traffic in Ukraine at the Stage of Integration with the European Network, *Transport Means*. 2021. P. 47-52.
29. Rail Baltica Global Project CostBenefit Analysis Final Report. 2017. URL: https://www.railbaltica.org/wp-content/uploads/2017/04/RB_CBA_FINAL_REPORT_0405.pdf (дата звернення: 26.03.2018).
30. Tarapata Z. Modelling and analysis of transportation networks using complex networks: Poland case study. *The Archives of Transport*. 2015. Vol. 36(4). P. 55-65. <https://doi.org/10.5604/08669546.1185207>
31. Meżyk A., Zagożdżon B. Development of Rail Passenger Transport in the European Union. *Transport Means, Proceedings of 23rd International Scientific Conference*. 2019. P. 83-87.
32. Kurhan M., Kurhan D., Husak M., Hmelevska N. The advisability of using dual gauge for expansion of the international traffic. *Transport Means*. 2020. P. 469-474.
33. Ursavas E., Zhu S. X. Integrated Passenger and Freight Train Planning on Shared-Use Corridors. *Transportation Science*. 2017. Vol. 52(6). <https://doi.org/10.1287/trsc.2017.0796>
34. Chornopyska N., Stasiuk K. Logistics Potential of the Railway as a Key for Sustainable and Secure Transport Development. *Transport Means*. 2020. P. 421-425.
35. Kurhan M., Kurhan D., Černiauskaite L. Rationale of priority areas of rail operation in north-eastern Europe. *Transport Means*. 2019. P. 1439-1444.
36. Szkoda M. Tulecki A. Decision models in effectiveness evaluation of Europe-Asia Transportation Systems. The 8th World Congress on Railway Research WCRR 2008. Seoul, Korea, G.3.3.4.2. URL: <https://www.sparkrail.org/Lists/Records/DispForm.aspx?ID=3772> (дата звернення: 31.05.2022).
37. Jacyna M., Wasiak M., Lewczuk K., Kłodawski M. Simulation model of transport system of poland as a tool for developing sustainable transport. *Archives of Transport*. 2015. Vol. 31(3). P. 23-35. <https://doi.org/10.5604/08669546.1146982>
38. Siergiejczyk M., Krzykowska-Piotrowska K. Research Methods and Solutions to Current Transport Problems. *Proceedings of the International Scientific Conference Transport of the 21st Century*, 9–12th of June 2019, Ryn, Poland. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-27687-4>
39. Francesco R., Gabriele M., Stefano R. Complex railway systems: capacity and utilisation of interconnected networks. *European Transport Research Review*. 2016. Vol. 8(4). P. 21-29. <https://doi.org/10.1007/s12544-016-0216-6>
40. Pouryousef H., Lautala P., White T. Railroad capacity tools and methodologies in the U.S. and Europe. *Journal of Modern Transportation*. 2015. Vol. 23(1). P. 30–42. <https://doi.org/10.1007/s40534-015-0069-z>

41. Woodburn A. The impacts on freight train operational performance of new rail infrastructure to segregate passenger and freight traffic. *Journal of Transport Geography*. 2017. Vol. 58. P. 176-185.
<https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2016.12.006>
42. Guide to Cost-Benefit Analysis of Investment Projects. URL: https://ec.europa.eu/regional_policy/sources/docgener/studies/pdf/cba_guide.pdf (дата звернення: 27.06.2021).
43. Dingler M, Lai Y.C., Barkan C. Impact of train type heterogeneity on single-track railway capacity. *Transportation Research Record*. 2009. Vol. 2117(1). P. 41-49. <https://doi.org/10.3141/2117-06>
44. Ližbetin J., Ponický J., Zitrický V. The Throughput Capacity of Rail Freight Corridors on the Particular Railways Network. *Ukupan izravni kapacitet koridora željezničkog prijevoza na posebnim mrežama željeznica*. 2016. Vol. 63(3). P. 161-169. <https://doi.org/10.17818/NM/2016/SI16>
45. Kurhan M., Kurhan D., Husak M., Hmelevska N. Increasing the Efficiency of the Railway Operation in the Specialization of Directions for Freight and Passenger Transportation. *Acta Polytechnica Hungarica*. 2022. Vol. 19(3). P. 231-244. <https://doi.org/10.12700/APH.19.3.2022.3.18>
46. Investment plan for Europe. URL: <https://www.consilium.europa.eu/en/policies/investment-plan/> (дата звернення: 22.03.2025).
47. International railway transit tariff. Tariff 8100. URL: <https://osjd.org/api/media/resources/3524?action=download> (дата звернення: 22.03.2025).
48. Даценко В., Гречуха Д. Відбудова залізничного транспорту повоєнної України. *Transparency International Ukraine*. URL: https://ti-ukraine.org/wp-content/uploads/2023/08/UZ_reform_ti_ukraine_ukr.pdf (дата звернення: 22.03.2025).
49. UIC leaflet 406 R, Capacity. UIC International Union of Railways, France. Version traduite. List of recent publications. 2013. 60 p.
50. Bulíček J., Nachtigall P., Široký J., Tischer E. Improving single-track railway line capacity using extended station switch point area. *Journal of Rail Transport Planning & Management*. 2022. Vol. 24. 100354. <https://doi.org/10.1016/j.jrtpm.2022.100354>
51. Široký J., Nachtigall P., Gašparík J., Čáp J. Calculation Model of Railway Capacity Price in the Czech Republic. *Promet-Traffic & Transportation*. 2021. Vol. 33(1). P. 91-102. <https://doi.org/10.7307/ptt.v33i1.3544>
52. Shih M.-C., Dick C. T., Sogin S. L., Barkan C. P. L. Comparison of Capacity Expansion Strategies for Single-Track Railway Lines with Sparse Sidings. *Transportation Research Record*. 2014. Vol. 2448(1). P. 53-61. <https://doi.org/10.3141/2448-07>
53. Kinfé S. Capacity estimation of new single track stations : Master thesis : Stockholm, Sweden, 2012. URL: https://www.kth.se/polopoly_fs/1.491061.1550157598!/X12_036_report.pdf

54. Sogin SL, Lai Y-C (Rex), Dick CT, Barkan CP. Analyzing the transition from single- to double-track railway lines with nonlinear regression analysis. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F*. 2015. Vol. 230(8). P. 1877-1889. <https://doi.org/10.1177/0954409715616998>
55. L. D'Acerno, M. Napolitano, L. De Matteis, M. D'Avino, S. D'Avanzo, M. Botte. The Adoption of the HD-ERTMS for Improving the Capacity of Single-Track Railway Lines. *2023 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2023 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe*. Madrid, Spain. 2023. P. 1-4. <https://doi.org/10.1109/EEEIC/ICPSEurope57605.2023.10194602>
56. Bulková Z., Gašparík J., Mašek J., Zitrický V. Analytical Procedures for the Evaluation of Infrastructural Measures for Increasing the Capacity of Railway Lines. *Sustainability*. 2022. Vol. 14(21). 14430. <https://doi.org/10.3390/su142114430>
57. Line capacity and train capacity for future rail freight corridors. URL: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1651030/FULLTEXT01.pdf> (дата звернення: 23.03.2025).
58. Ricci S., Lupták V., Chovancová M. Baseline Model to Increase Railway Infrastructure Capacity on a Single-Track Section: a Case Study. *LOGI – Scientific Journal on Transport and Logistics*. 2017. Vol. 8(2). <https://doi.org/10.1515/logi-2017-0018>
59. Козаченко Д. М., Папахов О. Ю., Логвінова Н. О. Пропускна та провізна спроможність залізниць : навч. посіб. для студентів ВНЗ. Дніпро. 2017. 108 с.
60. Козаченко Д. М., Малашкін В. В., Березовий М. І., Іскра О.Л. Дослідження пропускної та провізної спроможності залізничної інфраструктури гірничо-збагачувального комбінату в умовах збільшення обсягів перевезення сировини. *Транспортні системи та технології перевезень*. 2020. Вип. 20. С. 86-93.
61. Березовий М. І., Шепета А. М., Малашкін В. В. Теоретичні основи визначення пропускної спроможності одноколіїних ділянок. *Транспортні системи та технології перевезень*, 2015. Вип. 8. С. 13–19. <https://doi.org/10.15802/tstt2014/38078>
62. Курган М. Б., Хмелевська Н. П., Байдак С. Ю. Дослідження ефективності електрифікації одноколіїних залізниць для підвищення пропускної спроможності. *Електрифікація транспорту*. 2015. № 9. С. 44-49.
63. Прохорченко А. В. Проблеми розрахунку пропускної спроможності залізничної інфраструктури в умовах ринкових відносин. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2014. № 4 С. 36-41.
64. Kontaxi E., Ricci S. Railway capacity analysis: methodological framework and harmonization perspectives. *12th WCTR*. July 11-15, 2010. Lisbon, Portugal. P. 21.

65. Вергун О.Ф., Липовець Н.В., Боголій В.М. Інструкція з розрахунку наявної пропускної спроможності залізниць України : Навч.-метод. посіб. Київ : Транспорт України, 2002. 376 с.
66. Хоміч С. Модернізуватимуть залізничну дільницю «Ковель-Ягодин-Держжордон». URL: <https://lyuboml.rayon.in.ua/news/253735-modernizuvatimut-zaliznichnu-dilnitsiu-kovel-iagodin-derzhkordon> (дата звернення: 23.03.2025).
67. Infrastructure: update to TEN-T Corridor Work Plans. URL: https://transport.ec.europa.eu/news-events/news/infrastructure-update-ten-t-corridor-work-plans-2020-11-03_en. (дата звернення: 23.03.2025).
68. Kurhan M., Kurhan D. Providing the railway transit traffic Ukraine–European Union. *Pollack Periodica*. 2019. Vol. 14(2). P. 27-38. <https://doi.org/10.1556/606.2019.14.2.3>
69. Костюк М. Д., Говоруха В. В. Сучасна конструкція суміщеної рейкової колії 1520 та 1435 мм із залізобетонними шпалами та проміжним пружним рейковим скріпленням. *Будівництво : зб. наук. пр.* 2002. Вип. 10. С. 72-75.
70. Rail Baltica URL: https://lt.wikipedia.org/wiki/Rail_Baltica (дата звернення: 23.01.2019).
71. Інфраструктурні проєкти залізничного транспорту. URL: <https://mtu.gov.ua/content/infrasturkturni-proekti-zaliznichnogo-transportu.html> (дата звернення: 23.03.2025).
72. ДБН В.2.3-019:2018. Державні будівельні норми України. Споруди транспорту. Залізничні колії 1520 мм. Норми проектування. Київ : Мінрегіонбуд, 2018. 126 с.
73. Кірпа Г. М. Інтеграція залізничного транспорту України у європейську транспортну систему : Монографія. Дніпро : Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2004. 248 с.
74. Пам'ятка О+Р 759. *OSJD*. URL: <https://osjd.org/api/media/resources/9208>
75. Kurhan M. B., Kurhan D. M., Brazhnyk M. Y., Kovalskyi D. L. Features of Stress-Strain State of the Dual Railway Gauge. *Science and Transport Progress*. 2019. Vol. 79(1). P. 51–63. <https://doi.org/10.15802/stp2019/158471>
76. Kurhan D., Kurhan M. Modeling the Dynamic Response of Railway Track. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 708. 012013. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/708/1/012013>
77. ЦП-0275. Інструкція з укладання та утримання суміщеної залізничної колії 1520 мм і 1435 мм. Затверджена наказом Укрзалізничі від 21.06.2012 № 228-Ц. Київ : НВП Поліграфсервіс, 2012. 15 с.
78. На Львівщині збудують залізничну колію за європейським стандартом. URL: <https://forpost.lviv.ua/novyny/43414-na-lvivshchyni-zbuduiut-zaliznychnu-koliiu-za-ievropeiskym-standartom> (дата звернення: 12.07.2023).
79. Польський СРК та "Укрзалізниця" спільно працюватимуть над будівництвом високошвидкісної залізничі. *Центр транспортних стратегій*. URL:

- https://cfts.org.ua/news/2023/01/19/polskiy_cpk_ta_ukrzaliznitsya_spilno_pra_tsyuvatimut_nad_budivnitstvo_visokoshvidkismo_zalznitsi_73421 (дата звернення: 23.03.2025).
80. Kurhan M., Fischer S., Tiutkin O., Kurhan D., Hmelevska N. Development of High-Speed Railway Network in Europe: A Case Study of Ukraine. *Periodica Polytechnica Transportation Engineering*. 2024. Vol. 52(2). P. 151–158. <https://doi.org/10.3311/PPtr.23464>
 81. Pyrgidis C., Christogiannis E. The Problems of the Presence of Passenger and Freight Trains on the Same Track. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*. 2012. Vol. 48. P. 1143-1154. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.06.109>
 82. Kozachenko D., Skalozub V., Gera B., Hermaniuk Y., Korobiova R., Gorbova A. A model of transit freight distribution on a railway network. *Transport Problems*. 2019. Vol. 14(3). P. 17-26.
 83. Scientific and Technical Support Development Railway Transport in International Traffic. URL: <http://eadnurt.diit.edu.ua/jspui/handle/123456789/10482> (дата звернення: 23.03.2025).
 84. Fischer S. Traction Energy Consumption of Electric Locomotives and Electric Multiple Units at Speed Restrictions. *Acta Technica Jaurinensis*, 2015. Vol. 8(3). P. 240–256. <https://doi.org/10.14513/actatechjaur.v8.n3.384>
 85. Massel A. Train Commercial Speed Versus Maximum Line Speed – Central-European Experience. *Transport Means*. 2019. P. 358-366.
 86. Zhipeng H., Huimin N. The Mode of Combined Multi-speed Freight Trains under Separation of Passenger and Freight Transport. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*. 2012. Vol. 43. P. 709-717. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.04.144>
 87. Pittman R. Reforming and restructuring Ukrzaliznytsia: a crucial task for Ukrainian reformers. *Science and Transport Progress*. 2017. Vol. 1(67). P. 34-50.
 88. Sari A. R., Rusdiansyah A. Feasibility model for freight train insertion in one way – train schedule. *MATEC Web of Conferences*. 2018. Vol. 204. 02011. <https://doi.org/10.1051/matecconf/201820402011>
 89. Woodburn A. The impacts on freight train operational performance of new rail infrastructure to segregate passenger and freight traffic. *Journal of Transport Geography*. 2017. Vol. 58. P. 176-185. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2016.12.006>
 90. Dingler MH, (Rex) Lai Y-C, Barkan CPL. Mitigating train-type heterogeneity on a single-track line. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*. Part F. 2012. Vol. 227(2). P. 140-147. <https://doi.org/10.1177/0954409712456832>
 91. Lai YC, Lin YJ, Cheng YF. Assessment of capacity charges for shared-use rail lines. *Transportation Res. Record: J. Transportation Res. Board* 2448. P. 62–70.

92. Dac Criteria for Evaluating Development Assistance. URL: <https://www.oecd.org/dac/evaluation/49756382.pdf> (дата звернення: 27.06.2021).
93. Results-Based Management approach as applied at UNESCO. URL: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000177568> (дата звернення: 27.06.2021).
94. Leitner B., Rehak D., Kersys R. The new procedure for identification of infrastructure elements significance in sub-sector railway transport. *Communications - Scientific Letters of the University of Zilina*. 2018. Vol. 20(2). P. 41-48.
95. Bureika G., Bielousova L., Nozhenko V. Estimation of Ecological Effectiveness of Rail Vehicle Operation in Eurasian Railway Corridors. *Transport Means*. 2019 P. 460-465.
96. Technical Monograph: Estimating Maintenance Costs for Mixed High Speed Passenger and Freight Rail Corridors. *United States Department of Transportation*. URL: <https://railroads.dot.gov/elibrary/technical-monograph-estimating-maintenance-costs-mixed-high-speed-passenger-and-freight> (дата звернення: 23.03.2025).
97. Hubar O., Markul R., Tiutkin O., Andrieiev V. Arbuzov M. Kovalchuk O. Study of the interaction of the railway track and the rolling stock under conditions of accelerated movement. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 2020. Vol. 985. 012007.
98. Kurhan M., Kurhan D. Problems of providing international railway transport. *MATEC Web Conf.* 2018. Vol. 230. 01007. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201823001007>
99. Курган Д. М., Заяц М. А. Визначення раціонального розподілу поїздопотоків на мережі залізниць. *Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна*. 2010. Вип. 34. С. 88-93.
100. Kurhan M, Kurhan D., Novik R. Baydak S., Hmelevska, N. Improvement of the railway track efficiency by minimizing the rail wear in curves. *IOP Conf. Ser.: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 985. 165475. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/985/1/012001>
101. Pyrgidis C. N. *Railway Transportation Systems: Design, Construction and Operation*. CRC Press. 2016. 511 p.
102. General definitions of highspeed. *International Union of Railways*. URL: <https://web.archive.org/web/20110728141420/http://www.uic.org/spip.php?article971>
103. Блохін Є. П., Пшінько О. М. Високошвидкісний наземний транспорт світу: підручник. Дніпро : Дніпропетр. нац. ун-т з.-д. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2009. 240 с.
104. UIC Activities Report 2012. *International Union of Railways*. URL: https://uic.org/IMG/pdf/2012_uic_activities_report_md.pdf (дата звернення: 30.03.2025).

105. Залізничі світу у XXI столітті / під ред. Г. М. Кірпи : монографія. Дніпро : Дніпропетр. нац. ун-т з.-д. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2004. 224 с.
106. Givoni M. Development and Impact of the Modern High-speed Train: A Review. *Transport Reviews*. 2006. Vol. 26(5) P. 593–611. <https://doi.org/10.1080/01441640600589319>
107. Seikan Tunnel, Japan. *Railway Tehnology*. URL: <https://www.railway-technology.com/projects/seikan-tunnel/> (дата звернення: 23.03.2025).
108. Seikan Tunnel. URL: <https://ua.advisor.travel/poi/Tonnel-Seykan-10182>
109. High Speed Lines in the World. URL: https://uic.org/IMG/pdf/20200227_high_speed_lines_in_the_world.pdf (дата звернення: 23.03.2025).
110. TGV Atlantique. *Vikimedia*. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/TGV_Atlantique (дата звернення: 23.03.2025).
111. LGV Est. *Vikimedia*. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/LGV_Est (дата звернення: 23.03.2025).
112. Мережа ICE в Німеччині. URL: <https://studfile.net/preview/15933375/> (дата звернення: 27.10.2024).
113. A clear visualisation of the entire HSR in Italy with every city served. URL: https://www.reddit.com/r/TransitDiagrams/comments/14eft2w/a_clear_visualisation_of_the_entire_hsr_in_italy/ (дата звернення: 23.03.2025).
114. Високошвидкісна залізниця Мадрид – Барселона. *Vikimedia*. URL: <https://surl.li/hwnebb> (дата звернення: 23.03.2025).
115. West Coast Main Line. *Vikimedia*. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/West_Coast_Main_Line (дата звернення: 23.03.2025).
116. Пасічний О. М. Досвід організації швидкісних перевезень на залізницях Китаю та можливості запозичення його для вітчизняного залізничного транспорту. *Двадцять перша всеукраїнська практично-пізнавальна інтернет-конференція «Наукова думка сучасності і майбутнього»*. Дніпро, 2018. С. 17-21.
117. China Highspeed Railway. URL: <http://surl.li/npdhvp> (дата звернення: 23.03.2025).
118. Proposed US High Speed Rail System. URL: https://www.reddit.com/r/MapPorn/comments/17wh62/proposed_us_high_speed_rail_system_updated/ (дата звернення: 30.03.2025).
119. Залізниця Польщі. URL: <https://ostarbeiter.vn.ua/pkr.html> (дата звернення: 23.03.2025).
120. Угорські державні залізничі. URL: <http://surl.li/uwoebr> (дата звернення: 23.03.2025).
121. Румунські залізничі. *Vikimedia*. URL: https://w.wiki/_pQEH
122. Курган М. Б., Курган Д. М. Теоретичні основи впровадження високошвидкісного руху поїздів в Україні : монографія. Дніпро : Дніпропетр. нац. ун-т за-лізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2016. 283 с.

123. Kurhan D., Kurhan M. Modeling the Dynamic Response of Railway Track. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 2019. Vol. 708. 012013. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/708/1/012013>
124. A European high-speed rail network: not a reality but an ineffective patchwork. *European Court of Auditors*. URL: <https://op.europa.eu/webpub/eca/special-reports/high-speed-rail-19-2018/en/> (дата звернення: 23.03.2025).
125. Попереднє техніко-економічне обґрунтування проекту високошвидкісної залізничної мережі в Україні : Технічний звіт. Київ : SYSTRA, 2002. 311 с.
126. Босов А. А., Кірпа Г. М. Формування варіантів раціональної мережі ліній високошвидкісного руху поїздів в Україні : Монографія. Дніпро : ДНУЖТ, 2004. 144 с.
127. Бараш Ю. С., Момот А. В. Економічна ефективність високошвидкісних пасажирських залізничних перевезень в Україні: монографія. Дніпро : Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2015. 137 с.
128. Основні технічні та технологічні умови для проектування та будівництва високошвидкісної магістралі Київ-Харків : Технічний звіт. Київ : Киевгипротранс, 2002. 59 с.
129. Курган М. Б. Пілотні проекти високошвидкісних магістралей в Україні. *Українські залізниці*. 2015. № 11-12 (29-30). С. 36-39.
130. Курган М. Б. У витоків швидкісного й високошвидкісного руху поїздів в Україні. *Українські залізниці*. 2016. № 2 (32). С. 34-36.
131. Програмне забезпечення для проектування об'єктів інфраструктури та випуску документації. URL: <https://www.autodesk.com/products/civil-3d/overview>
132. Berger F. Das Programmsystem «Tras-Optier zur Berechnung von Eisenbahntrassen». *Vermessungstechnik*. 1971. Vol. 5. P. 165–169.
133. Roberts H. E., Stothard J. H. Use of Computers for Road Desing. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*. 1969. Vol. 42. P. 105–129.
134. Gerhard H. Anwendung der elektronischen Datenverarbeitung bei der Vortrassierung von Eisenbahn. *Rdsch*. 1971. Vol. 20.
135. Fisher R., Karner G. Recherunter stützte Verfahren zur Auffindung, Beurteilung und Auswahl von Trassen für Landverkehrswege. *Allg. Vermess. Nachr.* 1980. Vol. 87(4). P. 191–198.
136. Корженевич І.П. Питання оптимізації траси залізниць : дис. ... канд. техн. наук : 05.22.03. Дніпро, 1983. 164 с.
137. Автоматика та обчислювальна техніка. Рига : Зинатне, 1966. 215 с.
138. Алгоритми та програми випадкового пошуку. Рига : Зинатне, 1969. 374 с.
139. Яковлев Б. В., Корженевич І. П. До питання оптимізації траси нових ліній. *Транспортне будівництво*. 1982. № 10. С. 40–41.
140. Kurhan M., Kurhan D., Hmelevska N. A Systematic Approach to Designing High-Speed Railway Track: European Perspective. *Proceedings of 28th International Scientific Conference. Transport Means*. 2024. P. 47–51.
141. Kurhan D., Kurhan M., Horváth B., Fischer S. Determining the Deformation Characteristics of Railway Ballast by Mathematical Modeling of Elastic Wave

- Propagation. *Applied Mechanics*. 2023. Vol. 4. P. 803-815. <https://doi.org/10.3390/applmech4020041>
142. Fischer S., Kurhan D., Kurhan M., Hmelevska N. Analysis of stress-strain state changes in railway tracks during transition to European gauge. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2024. Vol. 1348, 012029. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1348/1/012029>
143. Plugin A., Kaliuzhna O., Lobiak O., Plugin D. et. ol. Regarding the Replacement of Steel Reinforcement in Pre-Stressed Concrete Sleepers with Composite Rebars. *AIP Conference Proceedings*. 2024. Vol. 3064(1). 60003. <https://doi.org/10.1063/5.0199575>
144. Kovalchuk, V., Sysyn, M., Movahedi Rad, M., Fischer, S. Investigation of the Bearing Capacity of Transport Constructions Made of Corrugated Metal Structures Reinforced with Transversal Stiffening Ribs. *Infrastructures*. 2023. Vol. 8. 131. <https://doi.org/10.3390/infrastructures8090131>
145. Andrieiev V., Tiutkin O., Hubar O., Markul R., Mukhina N. Methods of assessment of ballast contamination on railways of Ukraine. *Transport Means*. 2022. P. 842–849.
146. Liu J., Liu Z., Wang P., Kou L., Sysyn M. Dynamic characteristics of the railway ballast bed under water-rich and low-temperature environments. *Engineering Structures*. 2022. Vol. 252. 113605. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113605>
147. Eller B., Fischer S. Tutorial on the emergence of local substructure failures in the railway track structure and their renewal with existing and new methodologies. *Acta Technica Jaurinensis*. 2021. Vol. 14(1). P. 80-103. <https://doi.org/10.14513/actatechjaur.00565>
148. Fischer S., Eller B., Zoltán K., Németh A. Railway construction. Universitas Győr Nonprofit Kft. Győr, Hungary, 2015.
149. Kurhan D. Determination of Load for Quasi-static Calculations of Railway Track Stress-strain State. *Acta Technica Jaurinensis*. 2016. Vol. 9(1). P. 83-96. <https://doi.org/10.14513/actatechjaur.v9.n1.400>
150. Даніленко Е. І., Рибкін В.В. Правила розрахунків залізничної колії на міцність і стійкість. ЦП-0117. Київ : Транспорт України, 2004. 64 с.
151. Potapov D., Vitolberg V., Shumyk D., Boyko V., Kulik S. Study into stresses in rail track elements from high-speed rolling stock in Ukrainian main lines. *AIP Conf. Proc.* 2023. Vol. 2684. 020010. <https://doi.org/10.1063/5.0120022>
152. Kurhan D., Fischer S. Modeling of the Dynamic Rail Deflection using Elastic Wave Propagation, *J. Appl. Comput. Mech.* 2022. Vol. 8(1). P. 379-387. <https://doi.org/10.22055/JACM.2021.38826.3290>
153. Петренко В. Д., Тютюкін О. Л., Крисан В. І., Крисан В. В. Відновлення міцносних та деформативних характеристик земляного полотна та його основи армуванням ґрунтоцементними елементами. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*. 2019. № 16. С. 65–74. <https://doi.org/10.15802/bttrp2019/189681>

154. Петренко В. Д., Гузченко В. Т., Купрій В. П., Тютюкін О. Л. Правила улаштування основної площадки земляного полотна при виконанні капітального ремонту та модернізації колії. ЦП-0204. Київ : Укрзалізниця. Головне управління колійного господарства. 2009. 44 с.
155. Петренко В. Д., Гузченко В. Т., Тютюкін А. Л., Алхдур А. М. М. Результати аналізу параметрів експериментальних досліджень армування геотекстилем земляного полотна. *Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна*. 2010. № 34. С. 131–135.
156. Петренко В. Д., Гузченко В. Т., Тютюкін О. Л., Алхдур А. М. М., Ковалевич В. В. Порівняльний аналіз НДС земляного полотна при модернізації. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*. 2012. № 1. С. 69–74.
157. Tiutkin O., Keršys R., Neduzha L. Research of the strained state in the «subgrade – base» system at the variation of deformation parameters. *TRANSPORT MEANS 2020. Sustainability: Research and Solutions*. 2020. I. P. 446–451.
158. Pshinko O., Petrenko V., Tiutkin A., Andrieiev V., Hubar A., Ihnatenko D., Markul R. Comparative analysis of calculation results of supporting structure of soil-cement piles. *TRANSPORT MEANS 2019. Sustainability: Research and Solutions*. 2019. II. P. 820–828.
159. Alkhdour A., Tiutkin O., Dubinchyk O., Miroshnyk V. Regularities of the strain state of the embankment when varying the vertical element length of strengthening. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2024. Vol. 1348. 012016. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1348/1/012016>
160. Andrieiev V., Tiutkin O., Hubar O., Markul R. Comparative Analysis of the Results of Calculating the Stability of a Reinforced Subgrade with Geosynthetic Materials. *TRANSPORT MEANS 2021. Sustainability: Research and Solutions*. I. P. 531–535.
161. Abusharar S., Zheng J., Chen B., Yin J. A simplified method for analysis of a piled embankment reinforced with geosynthetics. *Geotextiles and Geomembranes*. 2008. 27(1). P. 39–52. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2008.05.002>
162. Fischer S. Investigation of the Horizontal Track Geometry regarding Geogrid Reinforcement under Ballast. *Acta Polytechnica Hungarica*. 2022. Vol. 19(3). P. 89–101. <http://doi.org/10.12700/APH.19.3.2022.3.8>
163. Pham T. Analysis of geosynthetic-reinforced pile-supported embankment with soil-structure interaction models. *Computers and Geotechnics*. 2020. Vol. 121. P. 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2020.103438>
164. Tiutkin O., Keršys R., Neduzha L. Comparative analysis of options for strengthening the railway subgrade with vertical elements. *TRANSPORT MEANS 2021. Sustainability: Research and Solutions*. 2021. II. P. 604–608.
165. Tiutkin O. L., Neduzha L., Kalivoda J. Finite-element Analysis of Strengthening the Subgrade on the Basis of Boring and Mixing Technology. *Transport Problems*. 2021. Vol. 16(2). P. 1–10. <http://doi.org/10.21307/tp-2021-034>

166. Briançon L., Simon B. Pile-supported embankment over soft soil for a high-speed line. *Geosynthetics International*. 2017. Vol. 24(3). P. 293–305. <http://dx.doi.org/10.1680/jgein.17.00002>
167. Hwang T.-H., Kim K.-H., Shin J.-H. Effective installation of micropiles to enhance bearing capacity of micropiled raft. *Soils and Foundations*. 2017. Vol. 57. P. 36–49. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2017.01.003>
168. Alsirawan R. Review of Geosynthetic-Reinforced Pile-Supported (GRPS) embankments – parametric study and design methods. *Acta Technica Jaurinensis*. 2021. Vol. 14(1). P. 36-59. <https://doi.org/10.14513/actatechjaur.00566>
169. Петренко В. Д., Андреев В. С., Харченко В. В. Порівняльний аналіз технологій влаштування мікропаль під час підсилення слабких ґрунтових основ. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*. 2021. № 19. С. 69–77. <https://doi.org/10.15802/bttrp2021/233978>
170. Петренко В. Д., Крисан В. І., Крисан В. В., Коновал В. М. Науково-технічне обґрунтування підсилення ґрунтових основ армованими ґрунтоцементними палями. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*. 2022. № 21. С. 70–79. <https://doi.org/10.15802/bttrp2022/258267>
171. Крисан В. І., Крисан В. В., Петренко В. Д., Тютюкін О. Л. Аналіз результатів випробування підсилення земляного полотна армованими ґрунтоцементними палями. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*. 2023. № 23. С. 45–53. <https://doi.org/10.15802/bttrp2023/281128>
172. Tiutkin O., Autelitano F., Giuliani F., Neduzha L. Stress-strain behavior of railway embankments stabilized with grouted micropiles. *Alexandria Engineering Journal*. 2024. 102. P. 75–81. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2024.05.088>
173. Tiutkin O., Radkevych A., Dubinchyk O., Kharchenko V. Parametric analysis of a strain state of a soil base strengthened with vertical elements. *Mining of Mineral Deposits*. 2024. 18(2). P. 104–112. <https://doi.org/10.33271/mining18.02.104>
174. Kendall M. G. Rank correlation methods. London : Charles Griffin. 1970. 272 p.
175. Дубінчик О. І., Мірошник В. А., Тютюкін О. Л. Обґрунтування концепцій підсилення земляного полотна в Україні та Європейському Союзі. *Мости і тунелі: теорія, дослідження, практика*. 2023. № 24. С. 22–30. <https://doi.org/10.15802/bttrp2023/291779>
176. Петренко В. Д., Тютюкін О. Л., Кулаженко Є. Ю., Кулаженко О. М. Математичне моделювання земляного полотна залізниць на основі методу скінченних елементів: навчальний посібник. – Дніпро: Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. 2018. 70 с.
177. Kurhan D. Entropy Application for Simulation the Ballast State as a Railway Element. *Acta Polytechnica Hungarica*. 2023. Vol. 20(1). P. 63-77. <https://doi.org/10.12700/APH.20.1.2023.20.5>

Наукове видання

**Курган Микола Борисович,
Курган Дмитро Миколайович,
Тютькін Олексій Леонідович**

**Теоретичне та практичне обґрунтування перебудови
мережі залізниць України на європейський стандарт**

Монографія

Комп'ютерна верстка *Н. П. Хмелевська*

Формат 60x84 ¹/₈. Папір офсетний. Гарнітура TimesNewRoman.
Друк цифровий. Умов. друк. арк. 32.0, Обл.-вид. арк. 29.75.
Наклад 300 прим. Зам. № 20

Видавництво «Журфонд»
49001, Дніпро, вул. Старокозацька, 8.
Свідоцтво про внесення до Державного реєстру
ДК № 684 від 21.11.2001 р.

Віддруковано:
ФОП Удовиченко О.М. 49080, м. Дніпро,
вул. Донецьке шосе, 15, кв. 531. Тел.: (056) 785-22-31.
Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи
до Державного реєстру ДК №3660 від 28.12.2009 р.

