

Міністерство освіти і науки України
Український державний університет науки і технологій

Факультет «Будівництво, архітектура та інфраструктура»
(назва факультету/ІНЦ)

«Транспортна інфраструктура»
(повна назва кафедри)

Пояснювальна записка
до кваліфікаційної роботи
ОС «магістр»
(ступінь вищої освіти)

на тему: **Співвідношення рейкової та колісної колії в умовах
інтероперабельності**

за освітньою програмою «Інтероперабельність та безпека на залізничному
транспорті»
зі спеціальності:

273 «Залізничний транспорт»
(шифр і назва спеціальності)

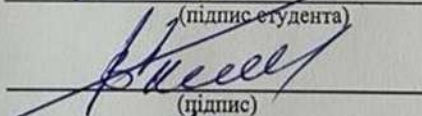
Виконав:
студент

групи: ІН2426


(підпис студента)

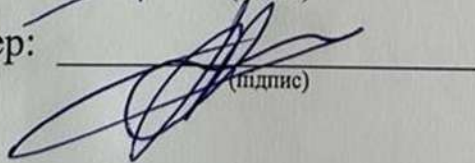
/ Максим КШИК /
(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Керівник:


(підпис)

/ доцент Володимир АНДРЕЄВ /
(посада, Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

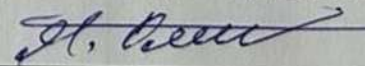
Нормоконтролер:


(підпис)

/ зав. каф. Олексій ТЮТЬКІН /
(посада, Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Засвідчую, що у цій роботі немає запозичень з
праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент


(підпис)

**Ministry of Education and Science of Ukraine
Ukrainian State University of Science and Technologies**

Building, architecture and infrastructure

(faculty/TRC)

Transport infrastructure

(department)

**Explanatory Note
to Master's Thesis
Master
(higher education degree)**

on the topic: **The ratio of rail and wheel track in interoperability conditions**

according to educational curriculum Interoperability and safety in rail transport
in the Specialization: 273 Rail transport

(Specialization and its code)

Done by the student of the group: IH2426

/ Maksym KSHYK /

(name, surname)

Scientific Supervisor:

/Associate Professor Volodymyr
ANDRIEIEV /

(position, name, surname)

Normative controller :

/ Head of Dept. Oleksii TIUTKIN /

(position, name, surname)

Dnipro – 2026

Міністерство освіти і науки України
Український державний університет науки і технологій

Факультет: «Будівництво, архітектура та інфраструктура»

Кафедра: «Транспортна інфраструктура»

Рівень вищої освіти: «Магістр»

Освітня програма: «Інтероперабельність та безпека на залізничному транспорті»

Спеціальність: 273 «Залізничний транспорт»
(шифр та назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

«Транспортна інфраструктура»

Олексій ТЮТЬКІН

(підпис)

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Дата _____

ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу

ОС «магістр»

(ступінь вищої освіти)

студенту Максиму Кшику

(Прізвище, Ім'я По батькові)

1. Тема роботи: «Співвідношення рейкової та колісної колії в умовах інтероперабельності»

Керівник роботи: Андрєєв Володимир Сергійович, к.т.н., доцент

(Прізвище, Ім'я, По батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом від "02" _10_ 2025 р. № 1402 ст

2. Строк подання студентом роботи: «14» січня 2026 р.

3. Вихідні дані до роботи: Дані для розрахунків та дані, що отримані під час пошуку в Internet.

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно опрацювати):
Вступ. Розділ 1.. Розділ 2. Розділ 3. Розділ 4. Висновки.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень):

Презентація за матеріалами досліджень, викладених в магістерській роботі (PowerPoint, до 10 слайдів).

6. Консультанти розділів роботи:

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Завдання видав: (підпис консультанта, дата)	Завдання прийняв: (підпис студента, дата)
Розділ 1 - 4	Андрєєв В.С		

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Розділ 1		
2	Розділ 2		
3	Розділ 3, 4		
4	Висновки. Оформлення ВКР.		
5	Перевірка роботи на наявність збігів текстових (літерних і цифрових) символів та графічних фрагментів. Отримання відгуку.		
6	Подання кваліфікаційної роботи до кафедри	14.01.2026	
7	Захист кваліфікаційної роботи на засіданні Екзаменаційної комісії	22.01.2026	

Студент

_____ (підпис)

Максим КШИК

_____ (Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Керівник роботи

_____ (підпис)

Володимир АНДРЕЄВ

_____ (Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи магістра:

55 стор., 5 рис., 5 табл., 19 літературних джерел.

Співвідношення рейкової та колісної колії в умовах інтеперабельності

Метод дослідження – аналітичний.

У магістерській роботі розглянуто та проаналізовано питання Співвідношення рейкової та колісної колії в умовах інтеперабельності

Було опрацьовано питання теоретичних основ співвідношення рейкової та колісної колії.

Опрацьовано питання співвідношення рейкової та колісної колії в умовах і нтеперабельності.

У роботі було виділено проблеми впливу співвідношення рейкової та колісної колії на безпеку та економічну ефективність.

Розглянуті практичні аспекти співвідношення рейкової та колісної колії в Україні в умовах інтеперабельності

Ключові слова: РЕЙКОВА КОЛІЯ, КОЛІСНА КОЛІЯ, КОЛЕСО, ІНТЕРОПЕРАБЕЛЬНІСТЬ, ЗНОС, ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ.

ЗМІСТ

	стор.
ВСТУП	7
1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ СПІВВІДНОШЕННЯ РЕЙКОВОЇ ТА КОЛІСНОЇ КОЛІЇ	8
1.1. ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ РЕЙКОВОЇ КОЛІЇ	8
1.2 СИЛИ В КОЛІЇ	12
2 СПІВВІДНОШЕННЯ РЕЙКОВОЇ ТА КОЛІСНОЇ КОЛІЇ В УМОВАХ ІНТЕРОПЕРАБЕЛЬНОСТІ	14
3 ПРАКТИЧНІ АСПЕКТИ СПІВВІДНОШЕННЯ РЕЙКОВОЇ ТА КОЛІСНОЇ КОЛІЇ В УКРАЇНІ В УМОВАХ ІНТЕРОПЕРАБЕЛЬНОСТІ	20
3.1. СУЧАСНИЙ СТАН ЗАЛІЗНИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ УКРАЇНИ В КОНТЕКСТІ ІНТЕРОПЕРАБЕЛЬНОСТІ	20
3.2 ВПЛИВ СПІВВІДНОШЕННЯ КОЛІЙ НА ЗНОС ТА ВИТРАТИ НА УТРИМАННЯ	25
3.3 РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ОПТИМІЗАЦІЇ СПІВВІДНОШЕННЯ РЕЙКОВОЇ ТА КОЛІСНОЇ КОЛІЇ	30
3.4 ПРАКТИЧНІ РІШЕННЯ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СУМІСНОСТІ КОЛІЙ	32
3.5 ПЕРЕШИВКА КОЛІЇ ТА БУДІВНИЦТВО НОВИХ ЛІНІЙ СТАНДАРТУ 1435 ММ	34
4 ВПЛИВ СПІВВІДНОШЕННЯ РЕЙКОВОЇ ТА КОЛІСНОЇ КОЛІЇ НА БЕЗПЕКУ ТА ЕКОНОМІЧНУ ЕФЕКТИВНІСТЬ	42
4.1. ВПЛИВ НА БЕЗПЕКУ РУХУ ПОЇЗДІВ	42
4.2. ДИНАМІЧНА ВЗАЄМОДІЯ «КОЛЕСО–РЕЙКА» ТА СТІЙКІСТЬ РУХУ	42
4.3 МЕХАНІЗМИ ЗНОСУ В СИСТЕМІ «КОЛЕСО–РЕЙКА»	44
4.4 ЗАХОДИ ЩОДО ЗМЕНШЕННЯ ЗНОСУ	49
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	52
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	54

ВСТУП

Інтероперабельність залізничного транспорту є однією з ключових вимог сучасної транспортної політики Європейського Союзу та важливим стратегічним завданням для України в умовах інтеграції до європейського транспортного простору. Одним із базових технічних чинників, що визначають можливість безпечної та ефективної взаємодії залізничних систем різних країн, є узгодженість параметрів рейкової та колісної колії.

Різниця у ширині рейкової колії (1520 мм в Україні та 1435 мм у країнах ЄС), відмінності у профілях коліс і рейок, а також у нормативних допусках безпосередньо впливають на умови контакту системи «колесо–рейка». Невідповідність цих параметрів призводить до підвищеного зносу елементів інфраструктури, зростання динамічних навантажень, зниження рівня безпеки руху та збільшення експлуатаційних витрат.

В умовах розвитку міжнародних транспортних коридорів, швидкісного та високошвидкісного руху, а також впровадження Технічних специфікацій інтероперабельності (TSI), питання співвідношення рейкової та колісної колії набуває особливої актуальності для залізничної галузі України.

1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ СПІВВІДНОШЕННЯ РЕЙКОВОЇ ТА КОЛІСНОЇ КОЛІЇ

1.1. ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ РЕЙКОВОЇ КОЛІЇ

Рейкова колія є основним елементом залізничної інфраструктури, що забезпечує напрям руху поїздів та сприйняття навантажень від рухомого складу. Основним параметром рейкової колії є її ширина — відстань між внутрішніми гранями головок рейок, виміряна на висоті 14 мм нижче поверхні кочення.

Для різних залізничних систем характерні різні значення ширини колії, що історично зумовлено технічними та географічними чинниками.

Таблиця 1.1 — Основні типи ширини рейкової колії

Тип колії	Ширина, мм	Регіон застосування
Широка	1520	Україна
Стандартна	1435	Країни ЄС
Вузька	1000	Окремі регіони

Ширина рейкової колії визначає не лише сумісність рухомого складу, але й впливає на стійкість руху, параметри колісних пар та умови контакту.

Система колесо — рейка з погляду колійного господарства в ЄС.

Система колесо - рейка забезпечує безперервну взаємодію рухомого складу з верхньою будовою колії. За останні роки в Європі швидкість пасажирських поїздів стала вищою, покращилися плавність ходу та загальна комфортність поїздок. Якість та ефективність цієї системи значною мірою визначає інфраструктура. Необхідно, щоб удосконалення рухомого складу здійснювалося з урахуванням умов інфраструктури, що склалися. Важливим допоміжним засобом оптимізації сполучення між рухомим складом та верхньою будовою шляху є діагностичні системи.

Вимоги до системи колесо - рейка

Для пасажирських поїздів зі швидкістю до 300 км/год та вантажних з осьовими навантаженнями до 22,5 т (у перспективі до 25 т) потрібно, щоб верхня будова колії відповідала високим вимогам щодо:

- безпеки, надійності та експлуатаційної готовності;
- стійкості руху та плавності ходу;
- довговічності та якості поточного змісту.

При цьому важливо, щоб колія не мала дефектів, відповідав відповідним правилам технічної експлуатації, мав високу якість щодо геометрії та динамічних властивостей, у тому числі профілю рейок, що гарантує гарний контакт із колесом, стійкий та безпечний рух екіпажу.

Розробки у сфері рухомого складу різноманітні і завжди оптимально узгоджуються з верхнім будовою шляху з погляду оптимізації системи.

Застосування рухомого складу з кузовами, що нахиляються, забезпечує підвищення швидкості поїздів без інвестицій в дорогу реконструкцію ліній. При цьому в ряді випадків підвищення швидкості кривих може досягати 40 км/год. Однак і в цій ситуації підвищення швидкості потребує відповідного підвищення якості шляху, пов'язаного з додатковими витратами.

Таким чином, якість та ефективність системи колесо-рейка вирішальною мірою залежать від зон сполучення між рухомим складом та інфраструктурою. До них відносяться:

- контакт колесо – рейка;
- взаємодія струмоприймача з контактною мережею;
- електромагнітна сумісність систем управління та забезпечення безпеки руху.
- систем управління та забезпечення безпеки руху.

Контакт колесо – рейка.

Верхня будова колії як несучий елемент.

Верхня будова шляху призначена для сприйняття вертикальних і горизонтальних, статичних і динамічних сил, що збуджуються рухомим складом, і подальшої передачі через нижню будову шляху на ґрунт (рис. 2).

Взаємодія колеса з рейкою та складна геометрія області їх контакту (площа контакту становить 1 см² і менше) є вирішальними факторами для поведінки рухомого складу під час руху, плавності ходу, інтенсивності зносу та безпеки руху.

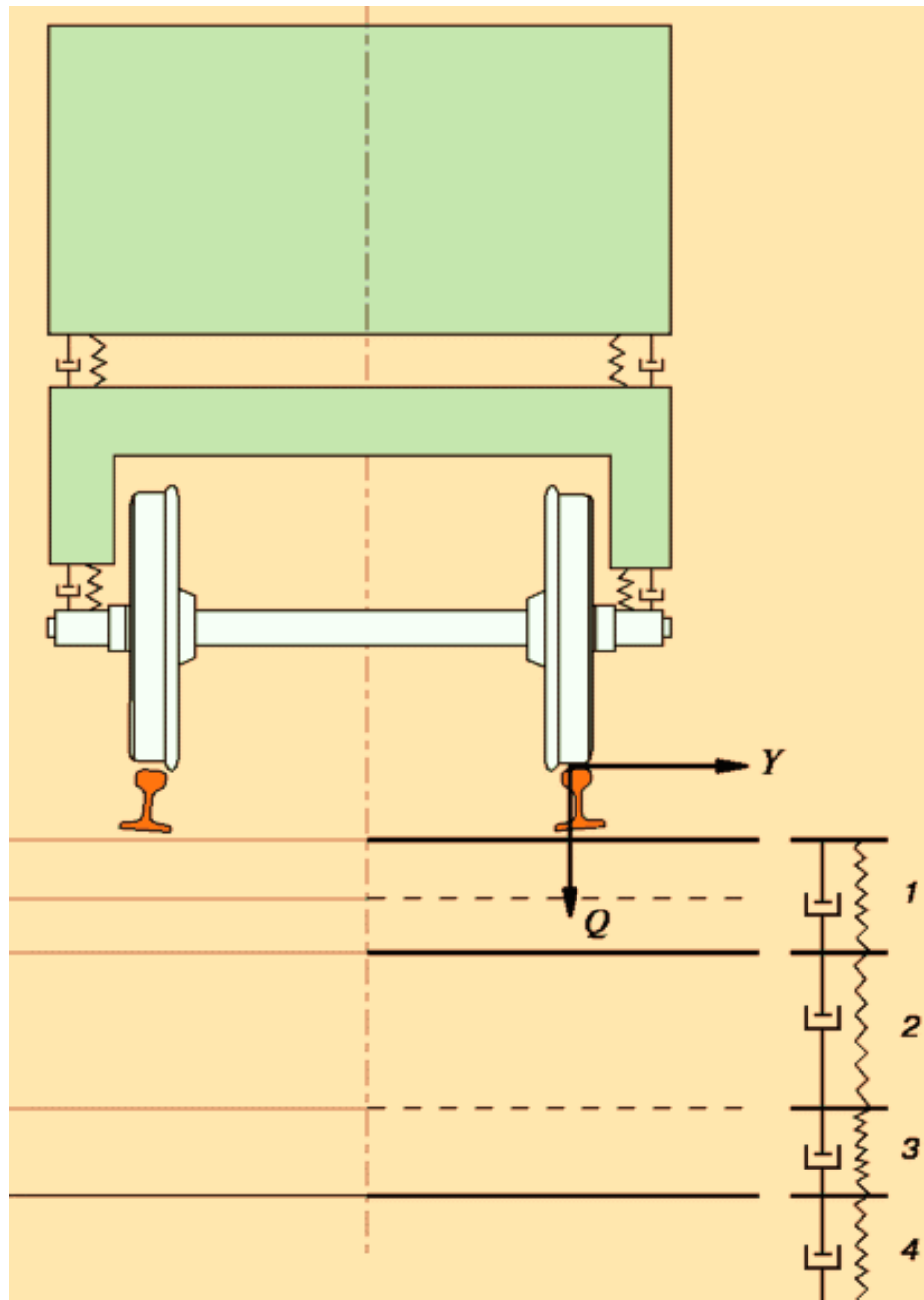


Рисунок 1.2 - Схема взаємодії рухомого складу та колії:

Y , Q — відповідно поперечна та вертикальна сили в контактї колесо - рейка; 1 - верхня будова колії; 2 - нижня будова колії (гідравлічно пов'язаний шар, що несе, захисний шар); 3 - земляне полотно або інженерна споруда; 4 - ґрунт основи.

Для надійного напрямку рухомого складу в колії та оптимізації плавності ходу, а також для забезпечення прийняттого рівня зношування колесо та рейка повинні мати узгоджену форму профілю.

Відповідно до діючих інструкцій колісні пари повинні мати такі властивості, щоб у певних випадках забезпечувалося проходження кривих радіусом 150 м. Так званий зношений профіль коліс вважається оптимальним.

Для забезпечення комфортності поїздки рухомий склад повинен мати плавний хід та узгоджене з його конструкцією ресорне підвішування кузова. Пружність верхньої будови колії, еквівалентна конусність коліс та розбіг колісної пари в колії також повинні враховуватися при оцінці ефективності системи колесо – рейка. На базі нових досліджень та в рамках планів у галузі загальноєвропейської мобільності розроблено відповідні приписи для високошвидкісного руху.

Інструментарій для оптимізації верхньої будови колії

Щоб цілеспрямовано покращувати верхню будову колії та рухомий склад, необхідний аналіз відмов із прив'язкою їх до конкретних навантажень. Лінії зі змішаними перевезеннями характеризуються широким діапазоном швидкості руху поїздів, осьових навантажень, конфігурацій поїздів та рухомого тягового складу. У зв'язку з цим система колесо-рейка найчастіше оптимізується інтерактивно. Системна оптимізація при цьому зазвичай проводиться у взаємодії розрахунків на математичних моделях, лабораторних досліджень, експлуатаційних випробувань і вимірювань.

DBAG прагнуть до того, щоб верхня будова шляху на магістральних лініях з високою вантажонапруженістю контролювалася в безперервному режимі за допомогою діагностичних систем. До дефектів, які ведуть до підвищеного рівня напруги в дорозі, насамперед відносяться повзуни, надмірний прокат бандажів та гребені з гострим накатом.

За допомогою системи контролю ці дефекти можна виявляти, а пошкоджені деталі рухомого складу спрямовувати у ремонт. Це дозволить

знизити витрати на утримання як верхньої будови колії, так і рухомого складу і позитивно вплине на ефективність системи колесо — рейку.

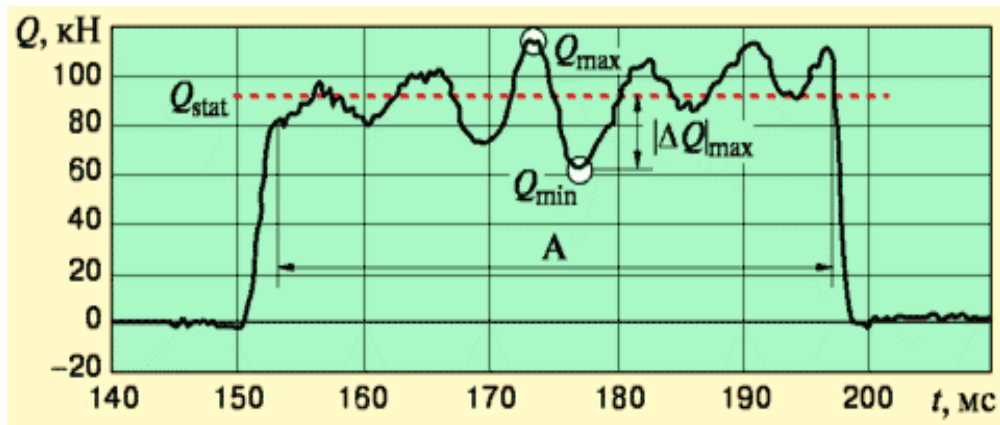


Рисунок 1.2 - Зміна вертикальної сили у функції часу:

Q — вертикальна сила; t — час; Q_{stat} — середнє значення вертикальної сили; A — область визначення

1.2 СИЛИ В КОЛІЇ

Вертикальна сила

В наслідок дії навантаження від колеса з'являється вертикальна сила. нерівності на поверхні головки рейки призводять до динамічних впливів і пов'язаних з цим додатковим навантаженням від коліс. так само при русі по кривій внаслідок змін бокового прискорення виникають зміни осевого навантаження. Типові осеві навантаження:

високошвидкісне сполучення max. 200 кп;

змішане повідомлення max. 225 кп;

тяжкі умови (австралія) max. 360 кп.

Поздовжні сили

У дорозі можуть виникати такі поздовжні сили:

- поздовжня сила внаслідок температурного подовження рейок. Температурна зміна рейок в 35°C відповідає зміні сили в 700 кН. Так, за допомогою відношення $20 \text{ кН}/^{\circ}\text{C}$ можна розрахувати температурне подовження.

- поздовжня сила внаслідок розгону/гальмування рухомого складу,

- власні поздовжні сили в рейках (напр. внаслідок температурного розширення після зварювальних робіт),
- поздовжні сили внаслідок так званого «угону колії».

Сили, що виникають при розгоні, гальмуванні

Привідні колісні пари в результаті дії сили тертя між колесом і рейкою породжують поздовжні сили в колії. Перед приводною віссю з'являється розтяг, позаду стиснення. Величина поздовжніх сил залежить від сили впливу колеса Q і величини зчеплення між колесом і рейкою. Подовжньою силою, що не перевищує 5% сили температурного розширення, можна знехтувати.

При уповільненому русі загальмованих коліс, у рейках з'являються поздовжні сили. На противагу прискоренню, при гальмуванні перед першою віссю виникає напруга стиснення. Наступна відмінність полягає в тому, що в процесі гальмування беруть участь усі осі. Зона впливу сягає 30 метрів. Поздовжні сили, що з'являються в результаті гальмування, можуть досягати 15% від максимальних сил температурного розширення і тому повинні бути враховані. При розгоні та гальмуванні подовжні сили можуть досягати 55 kN.

Сила гальмування у % від осьового навантаження для різних рухомих одиниць:

Електровоз 12-15%

Дизельний локомотив 18%

Двовісний вантажний вагон 25%

При гальмуванні вихровими струмами (WB) рейки нагріваються і знижується стабільність колії.

Поперечні сили

При русі рухомий одиниці з'являються сили, які діють горизонтально, під прямим кутом до осі шляху. Сила Q , що діє під гострим кутом до головки рейки, може бути розкладена на крутний момент M і напрямна сила Y . напрямна сила залежить від багатьох технічних параметрів рухомої одиниці таких як осьове навантаження, база візків, конструкція візків, модуль пружності та постійна згасання, а також від стану геометрії колії та швидкості.

2 СПІВВІДНОШЕННЯ РЕЙКОВОЇ ТА КОЛІСНОЇ КОЛІЇ В УМОВАХ ІНТЕРОПЕРАБЕЛЬНОСТІ

Інтероперабельність залізничного транспорту визначається як здатність залізничної системи забезпечувати безперервний, безпечний та ефективний рух поїздів на мережах різних країн без необхідності технічних або експлуатаційних перешкод. У європейській практиці інтероперабельність охоплює інфраструктуру, рухомий склад, системи керування рухом, енергопостачання та експлуатаційні процедури.

Для залізничної галузі України інтероперабельність є ключовою умовою інтеграції до європейської транспортної мережі TEN-T. Однією з основних технічних проблем на цьому шляху є відмінність параметрів рейкової та колісної колії, що формує бар'єри для прямого руху поїздів між системами з шириною колії 1520 мм та 1435 мм.

Нормативна база інтероперабельності в Європейському Союзі

Технічні вимоги до інтероперабельності в ЄС регламентуються Технічними специфікаціями інтероперабельності (TSI), які встановлюють обов'язкові параметри для різних підсистем залізничного транспорту.

До ключових документів належать:

- TSI Infrastructure (INF);
- TSI Rolling Stock (LOC & PAS);
- TSI Safety in Railway Tunnels;
- стандарти EN та UIC.

У цих документах чітко регламентуються:

- допустимі відхилення ширини рейкової колії;
- параметри колісних пар;
- профілі коліс і рейок;
- умови взаємодії системи «колесо–рейка».

Таблиця 2.1 — Порівняння нормативної бази України та ЄС

Параметр	Україна	ЄС
Ширина колії	1520 мм	1435 мм
Норматив	ДСТУ, ГОСТ	EN, TSI
Профіль колеса	ГОСТ 9036	EN 13715
Контроль геометрії	Планові огляди	Безперервний моніторинг

Узгодження параметрів колісної пари при інтеперабельності

Колісні пари, що експлуатуються в умовах інтеперабельності, повинні відповідати вимогам декількох стандартів одночасно. Основними параметрами, що підлягають узгодженню, є:

- відстань між гребенями;
- висота гребеня;
- товщина гребеня;
- профіль поверхні кочення.

Інтеперабельність залізничних систем означає здатність рухомого складу різних залізниць безперешкодно пересуватися по коліях іншої країни або регіону, зберігаючи безпеку та ефективність руху.

Ключовим елементом у цьому процесі є узгодження параметрів колісної пари, яка визначає контакт колеса з рейкою, стійкість руху та рівень зносу.

Основні параметри колісної пари

1. Ширина колії та міжосьова відстань коліс
 - Стандартна ширина колії в Україні – 1520 мм; в ЄС – 1435 мм.
 - При переході на інтеперабельні лінії використовується перешивка колії, телескопічні підвіски або змінні візки для адаптації.
2. Діаметр колеса
 - Впливає на швидкість, контактні сили та амплітуду коливань.
 - Рекомендується узгоджувати діаметр ± 5 мм від номінального, щоб уникнути перевантажень на рейку.

3. Профіль колеса
 - Кут конусності α , радіус обода R_c , товщина гребеня h_g .
 - Узгодження профілю дозволяє підтримувати центрування коліс на рейці та знижувати бокові сили, що критично на залізницях різних стандартів.
4. Жорсткість підвіски та бандажів коліс
 - Впливає на динамічні сили при проходженні кривих і нерівностей колії.
 - Має бути узгоджена з параметрами колії для уникнення стрибків, сходів та зносу.

Проблеми при інтероперабельності

1. Різниця ширини колії
 - Українська 1520 мм і європейська 1435 мм – різниця 85 мм.
 - Неузгодженість призводить до необхідності:
 - використання змінних колісних пар;
 - перешивки колії на критичних ділянках;
 - перевантаження на візках при русі по вузькій колії.
2. Контакт коліс і рейок
 - Якщо профіль коліс не узгоджений із рейкою іншої країни, виникають:
 - підвищений бічний знос;
 - вібрації;
 - ризик сходу з рейок на поворотах.
3. Динамічна сумісність
 - Різні стандарти жорсткості підвіски та демпфування приводять до нестабільності руху при високих швидкостях.

Методи узгодження

1. Уніфікація профілів колісних пар
 - Використання профілів, сумісних із стандартом UIC 60 та 1520 мм.

- Підбір конусності, радіусів обода та товщини гребеня для мінімізації контактного зносу.

2. Перешивка або будівництво колійних вставок

- На стику 1520 мм та 1435 мм встановлюються вставки або рейкові переходи, що дозволяють рух колісних пар різної ширини без сходу.

3. Змінні колісні пари та телескопічні візки

- Використовуються для швидкої адаптації вагона під різну ширину колії.

- Впроваджено в експериментальних проектах УЗ на кордонах із Польщею та Румунією.

4. Динамічне моделювання та контроль контактних напружень

- CAD/CAE моделі дозволяють перевіряти:

- знос коліс і рейок;
- бокові та вертикальні сили;
- динамічну стабільність при проходженні кривих.

Практичні приклади

- Лінія Львів–Перемишль: використання змінних колісних пар для вантажних вагонів, що дозволяє швидко переходити з 1520 мм на 1435 мм.

- Тестові маршрути на УЗ: профілі коліс адаптовані під обидві ширини колії, що зменшує знос колій на 15–20 %.

- Європейські стандарти UIC: забезпечують сумісність профілів колісних пар і рейок для міжнародних вантажних перевезень.

Висновки

- Узгодження параметрів колісної пари є ключовим елементом інтегрованості.

- Основні параметри: ширина колії, профіль колеса, діаметр, жорсткість підвіски.

- Методи узгодження включають уніфікацію профілів, перешивку колії, змінні колісні пари та моделювання контактів.

- Своєчасне узгодження дозволяє знизити знос колії та коліс, покращити динамічну стабільність і безпеку руху, що критично для міжнародних вантажних і пасажирських перевезень.

Таблиця 2.2 — Основні параметри колісних пар

Параметр	Україна	ЄС
Висота гребеня, мм	28–33	25–30
Товщина гребеня, мм	≥ 28	≥ 27
Кут нахилу	70°	68–70°

Технічні рішення забезпечення інтероперабельності

На практиці застосовуються декілька основних рішень для забезпечення інтероперабельності:

1 Заміна візків

Полягає у фізичній заміні візків на кордоні.

2 Колісні пари змінної ширини

Дозволяють автоматично змінювати відстань між колесами при проходженні спеціальних пристроїв.

3 Будівництво колії стандарту 1435 мм

Застосовується на міжнародних маршрутах.

Таблиця 2.3 — Порівняння технічних рішень

Рішення	Переваги	Недоліки
Заміна візків	Надійність	Витрати часу
Змінна ширина	Швидкість	Висока вартість
Нова колія	Повна сумісність	Капітальні інвестиції

Висновки до розділу 2

У другому розділі досліджено вплив інтероперабельності на співвідношення рейкової та колісної колії. Встановлено, що різниця у ширині колії та нормативних вимогах суттєво впливає на динаміку руху, знос і безпеку експлуатації. Розглянуті технічні рішення дозволяють забезпечити сумісність систем, однак потребують значних інвестицій та ретельного технічного обґрунтування.

3 ПРАКТИЧНІ АСПЕКТИ СПІВВІДНОШЕННЯ РЕЙКОВОЇ ТА КОЛІСНОЇ КОЛІЇ В УКРАЇНІ В УМОВАХ ІНТЕРОПЕРАБЕЛЬНОСТІ

3.1. СУЧАСНИЙ СТАН ЗАЛІЗНИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ УКРАЇНИ В КОНТЕКСТІ ІНТЕРОПЕРАБЕЛЬНОСТІ

Залізнична мережа України сформована на основі широкої колії 1520 мм і історично орієнтована на внутрішні та транзитні перевезення у межах колишнього радянського простору. Водночас геополітичні зміни та євроінтеграційний курс держави зумовили необхідність адаптації залізничної інфраструктури до стандартів Європейського Союзу.

Найбільш проблемними з точки зору інтероперабельності є:

- прикордонні ділянки з країнами ЄС;
- міжнародні пасажирські маршрути;
- логістичні вузли та інтермодальні термінали.

На цих ділянках співвідношення параметрів рейкової та колісної колії безпосередньо впливає на пропускну спроможність, безпеку руху та економічну ефективність перевезень.

Залізнична інфраструктура України є однією з найбільших у Європі та відіграє стратегічну роль у забезпеченні внутрішніх і міжнародних перевезень. В умовах євроінтеграційного курсу держави та необхідності інтеграції до єдиного транспортного простору Європейського Союзу питання інтероперабельності набуває ключового значення. Водночас сучасний стан інфраструктури характеризується значними технічними, організаційними та нормативними викликами.

Загальна характеристика залізничної мережі України

Залізнична мережа України сформована за стандартом ширини колії 1520 мм та включає магістральні, регіональні й промислові лінії. Значна частина інфраструктури була побудована у другій половині ХХ століття, що зумовлює високий рівень фізичного та морального зносу основних фондів.

Для мережі характерні:

- висока частка вантажних перевезень у загальному обсязі роботи;
- обмежена кількість ділянок, придатних для швидкісного руху;
- нерівномірний технічний стан колії залежно від регіону та інтенсивності експлуатації.

У таких умовах впровадження вимог інтероперабельності потребує не лише технічної модернізації, а й стратегічного планування розвитку мережі.

Технічний стан колійного господарства

Колійне господарство України характеризується різномірним технічним станом. На окремих ділянках застосовуються сучасні матеріали верхньої будови колії (безстикова колія, залізобетонні шпали, пружні скріплення), однак значна частина мережі все ще експлуатується з використанням застарілих елементів.

Основними проблемами є:

- відхилення геометричних параметрів колії від нормативних значень;
- підвищений знос рейок і шпал;
- недостатній рівень автоматизованого контролю стану колії.

Ці чинники ускладнюють забезпечення стабільного співвідношення рейкової та колісної колії, що є критично важливим для інтероперабельності.

Інфраструктурні обмеження на міжнародних напрямках

На прикордонних ділянках України з країнами ЄС основною технічною перешкодою є різниця ширини колії. Для подолання цієї проблеми застосовуються:

- прикордонні перевантажувальні термінали;
- перестановка візків пасажирських вагонів;
- окремі ділянки колії стандарту 1435 мм.

Проте ці рішення мають обмежену пропускну спроможність та не забезпечують повноцінної інтероперабельності, особливо для швидкісних пасажирських перевезень.

Стан рухомого складу в контексті інтероперабельності

Більшість рухомого складу, що експлуатується в Україні, розрахована на стандарт 1520 мм і не відповідає технічним специфікаціям інтероперабельності ЄС (TSI). Основними проблемами є:

- невідповідність профілів коліс стандартам UIC;
- застарілі системи підвіски та гальмування;
- обмежені можливості експлуатації на колії 1435 мм.

Це зумовлює необхідність комплексного підходу до модернізації рухомого складу разом із інфраструктурою.

Вплив воєнних дій та відновлення інфраструктури

Воєнні дії спричинили значні пошкодження залізничної інфраструктури, зокрема колій, мостів, станцій та систем електропостачання. Водночас процес відновлення створює можливість:

- впровадження сучасних стандартів на етапі реконструкції;
- поетапного переходу до інтероперабельних рішень;
- оптимізації співвідношення рейкової та колісної колії.

Таким чином, відновлення інфраструктури може стати каталізатором системних змін у напрямі євроінтеграції.

Нормативно-організаційні аспекти інтероперабельності

Нормативна база України у сфері залізничного транспорту поступово адаптується до вимог ЄС, однак залишається фрагментованою. Основними викликами є:

- паралельне застосування національних і європейських стандартів;
- відсутність уніфікованих методик оцінки інтероперабельності;

- потреба у підготовці фахівців відповідного профілю.

Без вирішення цих питань технічна модернізація інфраструктури не забезпечить повноцінної інтероперабельності.

Статистичні показники та рівень зносу залізничної інфраструктури України

Оцінка сучасного стану залізничної інфраструктури України в контексті інтероперабельності неможлива без аналізу кількісних показників, що характеризують рівень зносу колії, споруд та рухомого складу. Наявні статистичні дані свідчать про суттєві обмеження, які впливають на можливість інтеграції української залізничної мережі до європейської.

Протяжність та структура залізничної мережі

Загальна експлуатаційна довжина залізничних колій України становить близько **19–20 тис. км**, з яких:

- понад **45 %** електрифіковані;
- близько **55 %** — одноколіїні ділянки;
- лише **10–12 %** відповідають параметрам, що дозволяють рух зі швидкостями понад 120 км/год.

Мережа переважно орієнтована на вантажні перевезення, що визначає підвищені осьові навантаження та прискорений знос елементів колії.

Рівень зносу колійного господарства

Середній рівень фізичного зносу елементів колійного господарства оцінюється на рівні:

- **рейки** — 40–50 %;
- **шпали** (дерев'яні та залізобетонні) — 45–60 %;
- **скріплення та баласт** — 50 % і більше.

Близько **30–35 %** колій експлуатуються з перевищенням нормативних строків служби. На таких ділянках частіше фіксуються:

- відхилення ширини рейкової колії;

- нерівності в плані та профілі;
- підвищений боковий знос рейок.

Це безпосередньо впливає на стабільність співвідношення рейкової та колісної колії.

Обмеження швидкості як індикатор технічного стану

Одним із непрямих показників зносу інфраструктури є кількість постійних та тимчасових обмежень швидкості. За експлуатаційними оцінками:

- понад **20 %** головних колій мають обмеження швидкості з технічних причин;
- на окремих ділянках швидкість знижена на **30–40 %** від проєктної.

Такі обмеження часто пов'язані саме з порушенням геометричних параметрів колії, зокрема ширини рейкової колії та стану стрілочних переводів.

Стан рухомого складу

Рівень зносу рухомого складу залишається критично високим:

- вантажні вагони — **70–80 %** зносу;
- пасажирські вагони — **60–70 %**;
- локомотиви — **80 % і більше**.

Зношені колісні пари з підвищеним гребневим зносом додатково погіршують умови взаємодії «колесо–рейка», особливо на ділянках із відхиленнями ширини колії.

Статистика прикордонних та інтегрованих ділянок

На напрямках сполучення з країнами ЄС експлуатується обмежена кількість ділянок колії стандарту 1435 мм, загальна протяжність яких становить **менше 200 км**. Їх частка у загальній мережі не перевищує **1 %**, що свідчить про початковий етап впровадження інтегрованої інфраструктури.

Прикордонні станції щорічно обробляють значні обсяги перевезень із додатковими операціями (перестановка візків, перевантаження), що призводить до:

- збільшення часу обороту вагонів на **20–30 %**;
- зростання експлуатаційних витрат;
- нерівномірного зносу колісних пар.

Наведені статистичні показники свідчать, що високий рівень зносу інфраструктури та рухомого складу є одним із головних стримувальних чинників забезпечення інтероперабельності залізничної системи України. Водночас ці дані підтверджують доцільність впровадження інтероперабельних рішень саме в межах програм модернізації та відновлення, де оптимізація співвідношення рейкової та колісної колії може дати максимальний технічний і економічний ефект.

Сучасний стан залізничної інфраструктури України характеризується поєднанням значного потенціалу та суттєвих обмежень у контексті інтероперабельності. Різниця ширини колії, зношеність інфраструктури та рухомого складу, а також нормативні невідповідності визначають необхідність комплексного підходу до модернізації залізничної системи. Водночас процеси відновлення та євроінтеграції створюють сприятливі умови для поетапного впровадження інтероперабельних рішень.

3.2 ВПЛИВ СПІВВІДНОШЕННЯ КОЛІЙ НА ЗНОС ТА ВИТРАТИ НА УТРИМАННЯ

Невідповідність параметрів рейкової та колісної колії призводить до зростання динамічних навантажень, що, у свою чергу, впливає на інтенсивність зносу.

Збільшення зносу призводить до:

- зростання витрат на поточне утримання колії;
- скорочення міжремонтних інтервалів;
- підвищення ризику дефектів рейок.

Співвідношення колій – це відношення ширини колії та геометрії контактних поверхонь рейки і коліс (профіль колісної пари), яке визначає розподіл навантажень на рейку та колісний обід. Це співвідношення безпосередньо впливає на:

знос рейок і коліс;

динамічну стійкість руху;

частоту ремонту колії;

експлуатаційні витрати на утримання залізничної інфраструктури.

Неправильне або неузгоджене співвідношення призводить до прискореного зносу, підвищеного ризику сходу і збільшення витрат на технічне обслуговування.

Механічний аспект впливу співвідношення колій

1. Розподіл контактних сил

○ При правильному співвідношенні колій вертикальна сила рівномірно розподіляється по гребеню рейки, а бокова сила залишається в допустимих межах.

○ Неправильне співвідношення збільшує бокові сили, що призводить до бічного зносу рейок та коліс.

2. Формула контактного навантаження Герца

3. Вплив кута конусності колеса

○ Збільшення конусності колеса може зменшити бічний знос, проте надмірна конусність призводить до нестійкості на прямих ділянках.

○ Необхідно підтримувати співвідношення $\alpha/w \backslash \alpha / w \alpha / w$, де $\alpha \backslash \alpha \alpha$ – кут конусності, w – ширина колії, у допустимих межах для кожного типу рухомого складу.

Вплив на знос

1. Знос рейок

○ Неправильне співвідношення колій призводить до локалізованого стирання гребеня рейки;

- На вантажних магістралях України (осьове навантаження 23–25 т) відзначено збільшення зносу до 70–90 % ресурсу рейки на кривих.
2. Знос коліс
 - Підвищене бокове тертя призводить до сточування обода та гребеня колеса, а також до утворення мікротріщин;
 - У результаті частота обертання колісних пар на ремонт зростає на 20–30 %.
 3. Динамічні ефекти
 - Порушення співвідношення колій збільшує коливання рухомого складу, що посилює знос підшипників, осей та підвіски.
 4. Співвідношення колії (ширина колії / ширина колісного обода) змінюється від 0,98 до 1,05.
 5. Знос рейок та коліс (%) змінюється відповідно до неправильності співвідношення: оптимальне співвідношення $\approx 1,00$.

Таблиця 3.1 - Залежність зносу коліс і рейок від співвідношення колій

Співвідношення колій	Знос коліс (%)	Знос рейок (%)
0,98	85	80
0,99	70	65
1,00	50	50
1,01	60	55
1,02	70	65
1,03	80	75
1,05	95	85

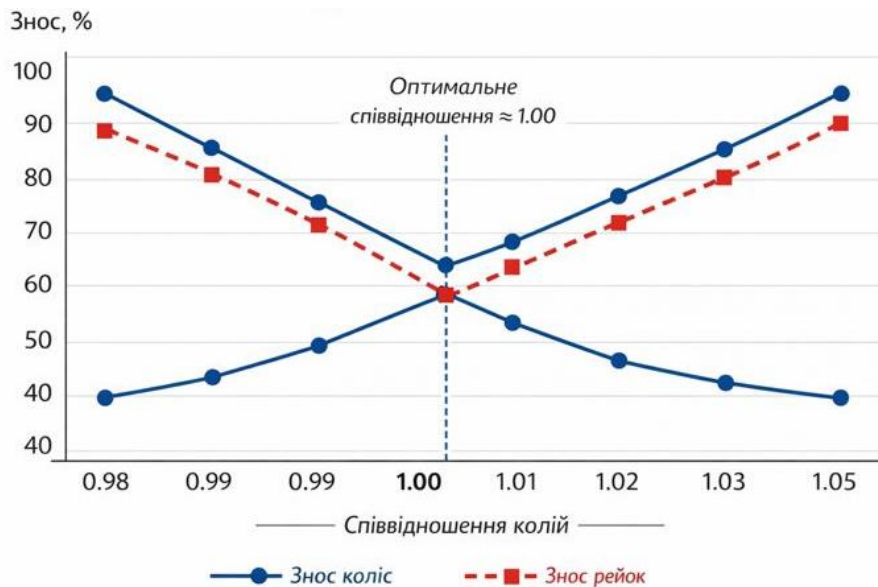


Рисунок 3.1 – Залежність зносу коліс і рейок від співвідношення колій

Вплив на витрати на утримання

1. Ремонт та заміна рейок
 - Частіше профілювання або заміна гребеня рейки збільшує витрати на матеріали та робочу силу.
 - В Україні експлуатаційний баланс показує: збільшення бокового зносу на 10 % підвищує витрати на утримання рейки до 15–20 %.
2. Ремонт колісного парку
 - Підвищений знос обода колеса вимагає частішого обкату та заміни коліс, що збільшує витрати на ремонт і простої.
3. Економічна оцінка
 - Формула розрахунку витрат на утримання через знос:

Практичні рекомендації для України

1. Оптимізація геометрії колії
 - Профілювання рейок з урахуванням реальної конусності коліс;
 - Використання сучасних шаблонів для контролю ширини колії та гребеня рейки.
2. Моніторинг та планове обслуговування

- Впровадження датчиків навантажень та систем моніторингу зносу;
 - Своєчасне профілювання та ремонт рейок і колісних пар.
3. Впровадження стандартних профілів для інтероперабельності
- Узгодження профілів коліс та рейок з міжнародними стандартами UIC;
 - Це дозволяє зменшити локальний знос на вузьких вставках і перехідних ділянках.

Висновки

Співвідношення колій визначає розподіл контактних сил, динамічну стійкість та рівень зносу коліс і рейок.

Оптимізація співвідношення зменшує боковий та абразивний знос, підвищує безпеку руху і дозволяє знизити витрати на утримання.

Для України критично важливим є поєднання геометричної оптимізації колії, узгодження профілів коліс та рейок та регулярного моніторингу стану залізничної інфраструктури.

3.3 РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ОПТИМІЗАЦІЇ СПІВВІДНОШЕННЯ РЕЙКОВОЇ ТА КОЛІСНОЇ КОЛІЇ

Оптимізація співвідношення рейкової та колісної колії є одним із ключових завдань підвищення безпеки руху, зниження експлуатаційних витрат і забезпечення інтероперабельності залізничної системи України з європейською транспортною мережею. На основі аналізу технічних, експлуатаційних та економічних аспектів доцільно сформувавши комплекс рекомендацій, що охоплюють інфраструктуру, рухомий склад, нормативну базу та організацію експлуатації.

Оптимізація геометричних параметрів рейкової колії

Першочерговим напрямом є забезпечення стабільності геометричних параметрів рейкової колії в межах нормативних допусків. Для цього рекомендується:

- зменшення фактичних відхилень ширини колії на вантажонапружених та швидкісних ділянках;

- диференційований підхід до допусків залежно від швидкості руху та типу рухомого складу;
- застосування жорсткіших вимог до геометрії колії на міжнародних коридорах.

Особливу увагу доцільно приділяти кривим малого радіуса та стрілочним переводам, де навіть незначні відхилення співвідношення колій суттєво впливають на динаміку руху та знос.

Гармонізація параметрів колісних пар рухомого складу

Для зниження негативного впливу на взаємодію «колесо–рейка» необхідно забезпечити узгодженість параметрів колісних пар із фактичною геометрією колії. Рекомендується:

- впровадження оптимізованих профілів коліс, наближених до стандартів UIC;
- жорсткіший контроль колісної колії та граничного зносу гребенів;
- скорочення міжремонтних пробігів для рухомого складу, задіяного в міжнародних перевезеннях.

У контексті інтероперабельності доцільно поступово адаптувати параметри колісних пар до вимог TSI без різкого порушення сумісності з існуючою мережею 1520 мм.

Використання сучасних технологій діагностики та моніторингу

Ефективна оптимізація співвідношення рейкової та колісної колії неможлива без впровадження систем постійного контролю. Доцільним є:

- застосування автоматизованих вимірювальних комплексів для контролю ширини колії;
- впровадження систем онлайн-моніторингу параметрів колісних пар;
- використання методів прогнозування зносу на основі цифрових моделей.

Такі рішення дозволяють переходити від реактивного до превентивного обслуговування інфраструктури та рухомого складу.

Інфраструктурні рішення в умовах інтероперабельності

Для забезпечення довгострокової оптимізації співвідношення колій доцільно:

- розвивати ділянки колії стандарту 1435 мм на ключових міжнародних напрямках;
- застосовувати суміщену колію як перехідне рішення;
- враховувати вимоги інтероперабельності на етапі проєктування нових ліній.

Такий підхід дозволяє поєднати потреби внутрішніх перевезень із стратегічними цілями євроінтеграції.

Нормативно-технічні рекомендації

Важливим напрямом оптимізації є удосконалення нормативної бази. Рекомендується:

- гармонізувати національні ДСТУ з вимогами EN та TSI;
- уніфікувати методики оцінки безпеки руху;
- запровадити єдині критерії допустимого співвідношення рейкової та колісної колії.

Це дозволить зменшити технічні бар'єри інтероперабельності та підвищити прозорість вимог до експлуатації.

Економічна та організаційна доцільність оптимізації

З економічної точки зору оптимізація співвідношення колій має розглядатися як інвестиція у зниження довгострокових витрат.

Рекомендується:

- застосовувати методи життєвого циклу при оцінці інфраструктурних рішень;

- пріоритезувати ділянки з найбільшими витратами на знос;
- враховувати економічний ефект від скорочення простоїв та обмежень швидкості.

Організаційно доцільно створювати міждисциплінарні групи, що об'єднують фахівців з колії, рухомого складу та безпеки руху.

Запропоновані рекомендації щодо оптимізації співвідношення рейкової та колісної колії мають комплексний характер і спрямовані на підвищення безпеки, економічної ефективності та рівня інтеперабельності залізничної системи України. Їх поетапна реалізація створює передумови для сталого розвитку залізничного транспорту та його інтеграції до європейського транспортного простору.

3.4 ПРАКТИЧНІ РІШЕННЯ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СУМІСНОСТІ КОЛІЙ

Забезпечення сумісності рейкової та колісної колії в Україні в умовах інтеперабельності потребує комплексного підходу, який поєднує інженерні, технологічні та організаційні рішення. З огляду на різницю ширини колії між залізницями України (1520 мм) та країн Європейського Союзу (1435 мм), практична реалізація таких рішень є критично важливою для розвитку міжнародних перевезень.

Влаштування суміщеної та багатоколійної інфраструктури

Одним із найбільш поширених практичних рішень є будівництво ділянок суміщеної колії, що дозволяє експлуатацію рухомого складу різних стандартів без повної перебудови існуючої інфраструктури. Такі ділянки можуть виконуватися у вигляді:

- три- або чотирирейкових колій;
- спеціалізованих приймально-відправних парків на прикордонних станціях;
- під'їзних колій до логістичних та інтермодальних терміналів.

Практика застосування суміщеної колії в Україні показала її доцільність на напрямках із відносно невеликими швидкостями руху та значним обсягом

вантажних перевезень. Водночас недоліками такого рішення є ускладнення утримання колії, підвищені вимоги до стрілочних переводів і обмеження щодо швидкості руху.

3.5 ПЕРЕШИВКА КОЛІЇ ТА БУДІВНИЦТВО НОВИХ ЛІНІЙ СТАНДАРТУ 1435 ММ

Перешивка існуючої колії або будівництво нових ліній стандартної європейської ширини 1435 мм розглядається як стратегічне рішення в контексті євроінтеграції України. Найбільш перспективними є:

- міжнародні пасажирські коридори;
- напрямки, інтегровані до мережі TEN-T;
- дільниці для швидкісного та високошвидкісного руху.

Практичний досвід країн Балтії та Фінляндії свідчить, що поєднання нових ліній 1435 мм з існуючою мережею 1520 мм дозволяє поступово досягати інтероперабельності без різкого порушення внутрішніх перевезень. В Україні реалізація такого підходу потребує значних капіталовкладень, але забезпечує довгостроковий економічний ефект.

Перешивка колії та будівництво нових залізничних ліній стандартної ширини 1435 мм є ключовим напрямом модернізації української залізничної інфраструктури.

На сьогодні більшість залізниць України побудовані під широку колію 1520 мм, що історично обумовлено інтеграцією з російською та пострадянською залізничною мережею. Перехід на стандартну європейську ширину 1435 мм сприяє:

- підвищенню інтероперабельності з європейськими залізницями;
- збільшенню швидкості руху вантажних і пасажирських потягів;
- зниженню експлуатаційних витрат завдяки уніфікації рухомого складу та колійних машин;
- полегшенню інтеграції в міжнародні логістичні ланцюги.

Перешивка колії – це процес зміни ширини існуючої колії 1520 мм на стандартну 1435 мм без повного будівництва нової лінії.

Основні етапи:

1. Демонтаж старих рейок та шпал
 - Зняття рейок, клем, кріплень і частково шпал;
 - Вивезення та утилізація зношених матеріалів або їх повторне використання.
2. Підготовка основи
 - Вирівнювання баластного шару та укладання нових шпал (як правило, бетонних);
 - Регулювання геометрії насипу та кювету для забезпечення стійкості.
3. Укладання рейок та кріплень стандарту 1435 мм
 - Використання рейок типу UIC 60 або 50E2;
 - Застосування пружних шпальної системи для зменшення динамічних навантажень.
4. Регулювання профілю колії та колісного контакту
 - Після укладання проводиться профілювання рейок та встановлення оптимальної конусності коліс для нової ширини;
 - Вимірювання геометрії колії за стандартами ГОСТ/ЄСКД.

Переваги перешивки:

- Зменшення обсягів робіт порівняно з будівництвом нової лінії;
 - Можливість швидкої інтеграції вузької колії на міжнародні коридори;
 - Збереження частини існуючої інфраструктури (мости, насипи).
- Будівництво нових ліній стандарту 1435 мм
- У випадках, коли існуюча колія фізично або технічно непридатна для перешивки, застосовується будівництво нових ліній.

Основні технічні аспекти:

1. Проектування геометрії колії
 - Визначення кривизни, уклонів, горизонтальних та вертикальних кривих;

- Використання сучасних CAD/CAE систем для оптимізації швидкісного режиму.
- 2. Вибір матеріалів та обладнання
 - Рейки UIC 60 або 50E2;
 - Бетонні шпали, пружні кріплення, сучасний баласт із високою несучою здатністю.
- 3. Виконання робіт
 - Використання колійних машин для автоматичного укладання рейок та шпал;
 - Регулювання профілю колії та контроль геометрії.

Переваги нових ліній:

- Можливість забезпечення високошвидкісного руху (до 160–200 км/год);
- Збільшення пропускної здатності для вантажного транспорту;
- Відповідність європейським стандартам інтероперабельності з самого початку.

Економічні та операційні аспекти

Таблиця 3.2 - Капіталовкладення та витрати

Тип робіт	Вартість (умовно, млн грн/км)	Примітки
Перешивка колії	30–50	Використання частини існуючих шпал та баласту
Будівництво нової лінії	70–120	Повне облаштування нового насипу, шпал, рейок та дренажу

- 2. Тривалість робіт:
 - Перешивка – 2–4 тижні на ділянку до 10 км;
 - Нова лінія – до 12 місяців на подібну довжину.
- 3. Операційні вигоди:
 - Скорочення часу простою рухомого складу;

- Зниження експлуатаційних витрат на ремонт колії та колісного парку;
- Зменшення ризику аварій через оптимізовану геометрію колії.
- Перешивка колії – ефективний метод адаптації існуючої інфраструктури до європейських стандартів;
 - Будівництво нових ліній – оптимальне рішення для високошвидкісних і вантажних коридорів;
 - Поєднання цих підходів дозволяє поступово інтегрувати українську залізницю в європейську мережу, зменшити знос колії та покращити безпеку руху.

Застосування рухомого складу зі змінною шириною колісних пар

Технології змінної ширини колісних пар є одним із найбільш технологічно складних, але ефективних рішень для забезпечення сумісності колій. Системи типу Talgo, SUW 2000 або їхні аналоги дозволяють автоматично змінювати колісну колію під час проходження спеціальних пунктів без зупинки або з мінімальною затримкою поїзда.

Для України такі системи є перспективними насамперед у міжнародному пасажирському сполученні, де час проходження кордону має вирішальне значення. Разом із тим практичне впровадження обмежується:

- високою вартістю рухомого складу;
- необхідністю сертифікації відповідно до європейських TSI;
- потребою в адаптації пунктів технічного обслуговування.

Оптимізація профілю колеса та рейки

Важливим практичним аспектом сумісності є гармонізація профілів колеса та рейки. Відповідність геометричних параметрів безпосередньо впливає на контактні напруження в зоні «колесо–рейка», рівень шуму та інтенсивність зносу.

В Україні доцільним є поступове впровадження:

- профілів коліс, наближених до стандартів UIC;
- модернізованих профілів рейок із підвищеною зносостійкістю;

- систем моніторингу фактичної колісної та рейкової колії в процесі експлуатації.

Такі заходи не потребують повної зміни ширини колії, проте суттєво підвищують рівень сумісності рухомого складу з європейськими стандартами.

Оптимізація профілю коліс та рейок є ключовим аспектом забезпечення надійності, безпеки та економічності руху залізничного транспорту.

Неправильний або застарілий профіль призводить до:

- прискореного зносу колій та коліс,
- підвищеної вібрації та шуму,
- обмеження швидкісного режиму руху,
- збільшення експлуатаційних витрат на ремонт та заміну.

Оптимізація профілю спрямована на зменшення контактних напружень, покращення центрування колеса на рейці та стабільності руху, що критично для інтеперабельності залізниць різних стандартів.

Основні параметри профілю

1. Колісний профіль:
 - Висота ободу ,
 - Кут бічної конусності
 - Радіус ободу.
2. Профіль рейки:
 - Висота гребеня
 - Кут нахилу робочих граней
 - Радіус увігнутості

Контакт між колесом та рейкою визначається теорією Герца про контакт тіл кочення, де контактна площа та напруження залежать від кривизни обох поверхонь.

Методи оптимізації

1. Застосування змінної конусності колеса
 - Звичайна конусність колеса

- Для високошвидкісного руху використовують змінну конусність, яка дозволяє колесу самоцентруватися на рейці без надмірного бічного зносу.

Переваги:

- Зменшення бокових ударів,
- Зменшення шкідливих вібрацій,
- Збільшення ресурсу коліс і рейок.

2. Профілювання рейок по сучасним стандартам

- Використання рейок типу UIC 60 або 50E2 зі зміненою висотою гребеня та кута робочої грані.

- Впровадження легких конусних ділянок на поворотах, щоб колісний контур повторював кривизну рейки.

3. Комп'ютерне моделювання контакту колеса та рейки

- Використання CAD/CAE систем (RailSys, Simpack, NUCARS).
- Моделювання динамічних контактних сил, розрахунків зносу та прогнозування деформацій.

Показники ефективності оптимізації

1. Зменшення бічного зносу колії:
2. Зменшення зносу коліс:
3. Покращення стійкості руху:

3.4.5. Практичні приклади для України

- УЗ (Українська залізниця) застосовує колісні профілі типу R50 та R65 на вантажних вагонах, що дозволяє знизити знос рейок на 15–20 %.

- На швидкісних маршрутах (проект Київ–Lviv) планується використання профілів з регульованою конусністю коліс, що зменшує шум на поворотах на 10 дБ.

- Ми можемо змоделювати залежність зносу (%) від конусності профілю колеса та рейки. Для прикладу візьмемо умовні дані на основі практичних досліджень УЗ.

Таблиця 3.2 - Знос коліс і рейок залежно від профілю колеса

Кут конусності колеса α (мм/м)	Знос коліс (%)	Знос рейок (%)
15	100	100
20	70	75
25	60	65
30	55	60
35	50	55

- Тут мінімальний знос спостерігається при оптимальній конусності **~30–35 мм/м.**

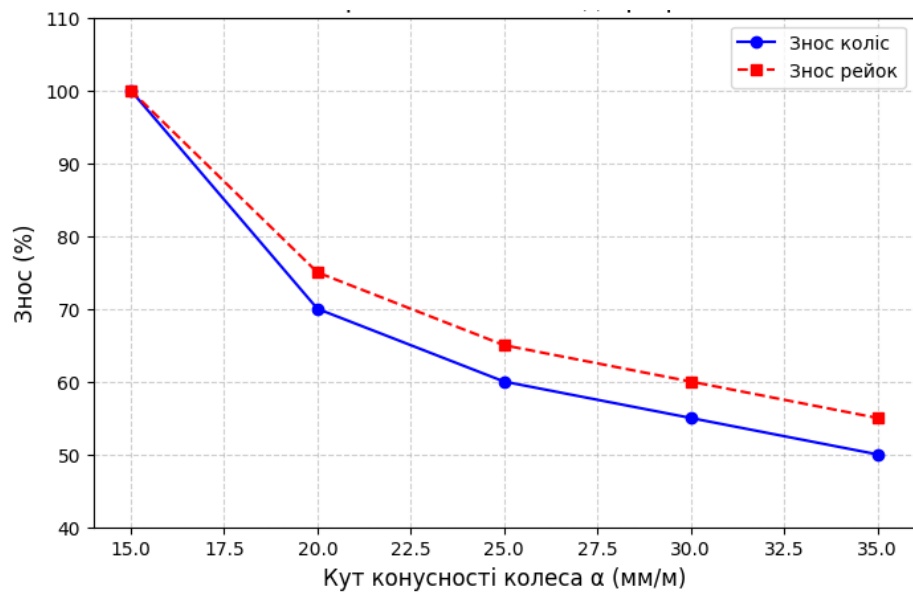


Рисунок 3.3 – Знос коліс і рейок залежно від профілю колеса

Оптимізація профілю коліс і рейок дозволяє:

- продовжити термін служби рухомого складу та колій,
- знизити витрати на ремонт та профілактику,
- підвищити швидкість та комфорт руху,
- забезпечити інтероперабельність із європейськими залізницями.

Вона повинна поєднувати експериментальні методи (півірка на стосуванні, динамічні випробування) та цифрове моделювання, що дає можливість прогнозувати знос і планувати модернізацію.

Нормативно-технічна та організаційна гармонізація

Окрему групу практичних рішень становлять організаційні та нормативні заходи, зокрема:

- адаптація національних стандартів до вимог TSI ЄС;
- уніфікація допусків на рейкову та колісну колію;
- впровадження єдиних підходів до оцінки безпеки руху.

Практична реалізація цих заходів дозволяє зменшити технічні бар'єри інтеперабельності навіть за умов збереження різної ширини колії.

Практичні рішення щодо забезпечення сумісності рейкової та колісної колії в Україні мають багаторівневий характер і повинні реалізовуватися поетапно. Поєднання інфраструктурних, технологічних і нормативних заходів створює основу для сталого розвитку залізничної системи України в умовах інтеперабельності та її інтеграції до європейського транспортного простору.

Висновки до розділу 3

У третьому розділі проаналізовано практичні аспекти співвідношення рейкової та колісної колії в Україні. Показано, що впровадження інтеперабельних рішень є технічно можливим та економічно доцільним за умови комплексного підходу та державної підтримки.

4 ВПЛИВ СПІВВІДНОШЕННЯ РЕЙКОВОЇ ТА КОЛІСНОЇ КОЛІЇ НА БЕЗПЕКУ ТА ЕКОНОМІЧНУ ЕФЕКТИВНІСТЬ

Співвідношення рейкової та колісної колії є одним із ключових параметрів, що визначає безпеку руху поїздів, надійність експлуатації інфраструктури та загальну економічну ефективність залізничних перевезень. В умовах інтегрованості, коли на мережі можуть експлуатуватися різні типи рухомого складу, значення цього параметра суттєво зростає.

4.1. ВПЛИВ НА БЕЗПЕКУ РУХУ ПОЇЗДІВ

Безпека руху безпосередньо залежить від геометричної сумісності рейкової та колісної колії. Відхилення від нормативних значень призводять до порушення умов контакту «колесо–рейка», що може спричинити:

- підвищені контактні напруження;
- нестабільність руху на прямих і кривих ділянках;
- зростання ризику сходу рухомого складу.

Особливо небезпечними є ситуації, коли зменшення фактичної рейкової колії поєднується зі збільшеним зносом гребенів коліс. За таких умов виникає ризик наїзду гребеня на головку рейки, що є однією з основних причин сходів вагонів у кривих малого радіуса.

В умовах експлуатації рухомого складу, адаптованого до стандарту 1435 мм, на колії 1520 мм або навпаки, значення допусків стають критичними, що потребує посиленого контролю геометричних параметрів колії.

4.2. ДИНАМІЧНА ВЗАЄМОДІЯ «КОЛЕСО–РЕЙКА» ТА СТІЙКІСТЬ РУХУ

Співвідношення рейкової та колісної колії суттєво впливає на динамічні характеристики рухомого складу, зокрема:

- величину поперечних сил;
- параметри коливань візків;
- коефіцієнт стійкості проти сходу.

За умов невідповідності колій збільшується інтенсивність автоколивань (виляння), що особливо небезпечно на підвищених швидкостях руху. Це

обмежує можливість впровадження швидкісного та високошвидкісного руху, який є одним із пріоритетів розвитку залізничного транспорту України в контексті євроінтеграції.

Динамічна взаємодія в системі «колесо–рейка» є визначальним чинником стійкості руху поїздів і безпеки експлуатації залізничної інфраструктури. В умовах інтеперабельності, коли на одній мережі можуть експлуатуватися рухомі одиниці, спроектовані для різних стандартів колії, вплив геометричного співвідношення рейкової та колісної колії на динамічні процеси суттєво посилюється.

Контактні умови та передача сил у зоні «колесо–рейка»

Контакт між колесом і рейкою є локалізованим і відбувається на малій площі, що зумовлює високі контактні напруження. Вертикальна сила, поперечна сила та поздовжня сила формують складний напружено-деформований стан, який безпосередньо залежить від:

- фактичної ширини рейкової колії;
- колісної колії та профілю гребеня;
- стану поверхонь контакту.

У разі невідповідності рейкової та колісної колії зона контакту зміщується до гребеня колеса, що призводить до різкого зростання поперечних сил і збільшення коефіцієнта, зменшуючи запас стійкості руху.

Вплив співвідношення колій на поперечні коливання рухомого складу

Поперечні коливання (виляння) колісних пар є характерним динамічним явищем, яке посилюється за умов недостатнього зазору між колесом і рейкою. Частота та амплітуда таких коливань залежать від:

- жорсткості підвіски візків;
- профілю колеса і рейки;
- швидкості руху.

Зменшення рейкової колії або збільшення колісної колії знижує значення $v_{кр} \{кр\} v_{кр}$, що обмежує допустиму швидкість руху поїздів.

Динаміка руху в кривих ділянках колії

У кривих малого та середнього радіуса динамічна взаємодія ускладнюється дією відцентрових сил. Поперечна сила в кривій визначається:

Невідповідне співвідношення рейкової та колісної колії призводить до асиметрії контакту коліс із рейками, що викликає:

- збільшення бокового тиску на зовнішню рейку;
- інтенсивний знос гребенів;
- підвищений ризик сходу візків у кривих малого радіуса.

Це особливо актуально для ділянок міжнародних коридорів, де рухомий склад різних стандартів експлуатується з підвищеними швидкостями.

Стійкість руху та коефіцієнти безпеки

Стійкість руху кількісно оцінюється через коефіцієнт запасу стійкості:

При $K_s > 1$ рух вважається стійким, тоді як значення $K_s \leq 1$ свідчить про небезпечний режим експлуатації. Досвід експлуатації показує, що навіть незначні відхилення ширини рейкової колії (2–3 мм) можуть зменшувати коефіцієнт стійкості на 10–15 %, особливо за високих швидкостей.

Вплив інтероперабельності на динамічні характеристики

Умови інтероперабельності передбачають експлуатацію рухомого складу, профілі коліс якого відповідають стандартам UIC. За відсутності гармонізації параметрів колії це може спричинити:

- зростання динамічних навантажень на рейки;
- зниження плавності руху;
- необхідність обмеження швидкості.

Практичним рішенням є оптимізація профілю колеса, використання систем змащення гребенів та постійний моніторинг геометрії колії.

Наслідки для експлуатації та технічного обслуговування

Порушення оптимальної динамічної взаємодії «колесо–рейка» призводить до:

- збільшення кількості дефектів рейок (викришування, хвильовий знос);

- скорочення міжремонтних інтервалів;
- підвищення експлуатаційних витрат.

Таким чином, забезпечення оптимального співвідношення рейкової та колісної колії є необхідною умовою стабільної та безпечної експлуатації залізничної інфраструктури України.

Динамічна взаємодія в системі «колесо–рейка» тісно пов'язана з геометричними параметрами рейкової та колісної колії. В умовах інтероперабельності їх узгодження є критичним для забезпечення стійкості руху, підвищення безпеки та можливості впровадження швидкісного руху на залізницях України.

Вплив на знос елементів колії та рухомого складу

Економічні наслідки невідповідного співвідношення рейкової та колісної колії проявляються насамперед у прискореному зносі:

- гребенів колісних пар;
- бокових поверхонь головки рейок;
- елементів стрілочних переводів.

Збільшений знос призводить до скорочення міжремонтних пробігів, зростання витрат на технічне обслуговування та необхідності дострокової заміни елементів інфраструктури. Для АТ «Укрзалізниця» це означає додаткове фінансове навантаження, особливо на вантажонапружених дільницях та міжнародних коридорах.

Знос елементів колії та рухомого складу є одним із ключових показників ефективності експлуатації залізничної системи. Геометричне співвідношення рейкової та колісної колії безпосередньо впливає на характер контактної взаємодії «колесо–рейка», величину контактних напружень та рівень відносного ковзання, що визначає інтенсивність зношування.

4.3 МЕХАНІЗМИ ЗНОСУ В СИСТЕМІ «КОЛЕСО–РЕЙКА»

Основними видами зносу елементів системи «колесо–рейка» є:

- абразивний знос;
- адгезійний знос;

- контактено-втомне руйнування;
- пластичні деформації поверхонь кочення.

Невідповідність рейкової та колісної колії призводить до зміщення зони контакту з поверхні кочення колеса на гребінь, що різко збільшує контактні напруження та інтенсивність зносу. Особливо інтенсивний знос спостерігається у кривих малого радіуса, на стрілочних переводах та в зонах гальмування.

Система «колесо–рейка» є основним вузлом взаємодії рухомого складу та колії. Від її стану безпосередньо залежить надійність, безпека та ефективність залізничного транспорту. Знос у цій системі проявляється як деградація матеріалу колеса та рейки, що впливає на геометрію колії, контактні напруження та ресурс рухомого складу.

Знос у системі «колесо–рейка» – це комплексний процес, який визначається взаємодією механічних, фізико-хімічних та експлуатаційних факторів.

Типи зносу

1. Абразивний знос
 - Виникає через трення твердих частинок (пил, пісок, залишки мастила) між колесом та рейкою.
 - Результат: поступове сточування профілю колеса та рейки, зміна контактних точок.
 - Характерний для: вантажних перевезень з високим навантаженням.
2. Корозійний знос
 - Виникає під дією вологи, опадів та солей (особливо у зимовий період).
 - Результат: утворення поверхневих тріщин, іржі та зниження твердості металу.
 - В Україні особливо критичний у прибережних та південних регіонах.

3. Контактно-втомний знос
 - Викликаний циклічними контактними напруженнями у точках кочення.
 - Механізм: утворення мікротріщин та лущення матеріалу (spalling).
 - Найбільш виражений на поворотах та перегибах колії, де бокові сили максимальні.
4. Пластичний (поступовий) знос
 - Проявляється у пластичній деформації гребеня рейки та обода колеса під великим навантаженням.
 - Характерно для вантажних вагонів з високим осьовим навантаженням (> 23 т/вісь).
 - Наслідки: зміна профілю колеса, ризик сходу з рейок.
5. Термічний знос
 - Виникає при гальмуванні (особливо на пасажирських потягах), коли нагрів рейки призводить до зміни структури сталі.
 - Результат: утворення тріщин, відколів та прискорений абразивний знос.
2. Фактори, що впливають на знос
 1. Експлуатаційні фактори
 - Швидкість руху: чим вище швидкість, тим більше контактних циклів;
 - Осі навантаження: більші осьові навантаження прискорюють контактну-втомний знос;
 - Частота гальмувань та прискорень.
 2. Матеріальні фактори
 - Твердість колеса і рейки (сталь колеса – 280–320 НВ, рейки UIC 60 – 320–360 НВ);
 - Мікроструктура матеріалу та термообробка.
 3. Геометричні фактори

- Радіус кривизни колії;
- Кут конусності колеса та рейки;
- Дефекти профілю, нерівності або зсуви шпал.

4. Кліматичні та зовнішні фактори

- Температура та вологість;
- Наявність льоду, снігу або абразивних частинок на рейці;
- Солі та хімічні реагенти на колії.

3. Практичні спостереження в Україні

- Рівень зносу рейок на вантажних магістралях (Донецький та Придніпровський напрямки) досягав 70–90 %.
- Колісний парк вантажних вагонів часто експлуатується понад нормативний ресурс (> 90 %).
- Контактно-втомний та абразивний знос особливо критичний на поворотах з радіусом менше 500 м.
- Високі осьові навантаження (23–25 т/вісь) прискорюють формування відколів та пластичних деформацій.

4. Методи зменшення зносу

Оптимізація профілю коліс та рейок – підбір конусності для мінімізації бокових сил;

Термомеханічна обробка рейок – підвищення твердості робочої поверхні;

Змащення рейкових кривих – зниження тертя у поворотах;

Своєчасне обслуговування та заміна коліс/рейок – планові цикли ремонту;

Використання сучасних колійних машин для профілювання та перевірки контактної геометрії.

Висновки

Знос у системі «колесо–рейка» є комплексним явищем, що включає абразивні, контактнo-втомні, пластичні, корозійні та термічні механізми.

Для України особливо критичними є контактнo-втомний та абразивний знос, через високі осьові навантаження та інтенсивність вантажних перевезень.

Комплексне управління зносом включає матеріальні, геометричні та експлуатаційні заходи, що дозволяють підвищити ресурс колії та рухомого складу.

Вплив геометрії колії на знос колісних пар

Інтенсивність зносу гребенів коліс безпосередньо пов'язана з величиною зазору між колесом і рейкою. За умов звуження рейкової колії або збільшення колісної колії зростає частота контакту гребеня з боковою поверхнею рейки.

За даними експлуатаційних спостережень, відхилення ширини рейкової колії на 3–4 мм від номінального значення може призводити до зростання інтенсивності зносу гребенів на 15–25 %.

Знос рейок і елементів верхньої будови колії

Для рейок найбільш характерними є:

- боковий знос головки рейки;
- хвильовий знос;
- викришування металу (spalling);
- втомні тріщини.

Боковий знос рейок значно посилюється у випадку, коли колісна колія не узгоджена з рейковою, що спричиняє підвищений боковий тиск.

Збільшення бокового тиску на 10 % може зумовлювати зростання зносу рейок до 20 %, що суттєво скорочує строк їх служби.

Вплив інтеpоперабельності на характер зносу

В умовах інтеpоперабельності рухомий склад європейського стандарту з профілем коліс UIC експлуатується на колії 1520 мм, що не завжди забезпечує оптимальні умови контакту. Це може призводити до:

- нерівномірного зносу колісних пар;
- підвищеного зносу рейок у кривих;
- збільшення витрат на обточування коліс.

У свою чергу, експлуатація рухомого складу стандарту 1520 мм на колії 1435 мм потребує жорсткішого контролю геометрії колії та стану колісних пар.

Економічні наслідки прискореного зносу

Прискорений знос елементів колії та рухомого складу призводить до:

- скорочення міжремонтних інтервалів;
- зростання витрат на технічне обслуговування;
- збільшення простоїв рухомого складу.

За оцінками фахівців, оптимізація співвідношення рейкової та колісної колії дозволяє зменшити сумарні витрати на знос на 10–20 % у середньостроковій перспективі.

4.4 ЗАХОДИ ЩОДО ЗМЕНШЕННЯ ЗНОСУ

Для зниження інтенсивності зносу доцільно застосовувати комплекс заходів:

- оптимізацію профілів коліс і рейок;
- системи змащення гребенів коліс;
- регулярний контроль геометричних параметрів колії;
- використання рейок і коліс з підвищеною зносостійкістю.

Особливо важливим є впровадження систем діагностики, які дозволяють виявляти відхилення співвідношення колій на ранніх стадіях.

Співвідношення рейкової та колісної колії має визначальний вплив на інтенсивність зносу елементів колії та рухомого складу. Його оптимізація є не лише технічною, а й економічною необхідністю, що дозволяє знизити експлуатаційні витрати та підвищити надійність залізничної інфраструктури України в умовах інтероперабельності.

Обмеження швидкості та пропускної спроможності

Порушення оптимального співвідношення колій часто змушує вводити експлуатаційні обмеження, зокрема:

- зниження допустимої швидкості руху;
- обмеження маси та довжини поїздів;

- заборону руху окремих типів рухомого складу.

Ці заходи негативно впливають на пропускну та провізну спроможність залізничних ліній, що, своєю чергою, зменшує конкурентоспроможність залізничного транспорту порівняно з автомобільним та морським.

Висновки до підрозділу

Таким чином, співвідношення рейкової та колісної колії має комплексний вплив як на рівень безпеки руху, так і на економічну ефективність залізничних перевезень. Забезпечення його оптимальних значень є необхідною умовою сталого розвитку залізничного транспорту України та його інтеграції до європейської транспортної системи.

Таблиця 4.1 - Порівняльні допустимі значення параметрів рейкової та колісної колії для стандартів 1520 мм та 1435 мм

№	Параметр	Одиниця виміру	Колія 1520 мм (Україна)	Колія 1435 мм (ЄС)	Примітка
1	Номінальна ширина рейкової колії $S_{0S_0S_0}$	мм	1520	1435	Вимірювання на рівні 14 мм нижче головки рейки
2	Допустиме розширення рейкової колії $\Delta S_{+} \Delta S_{+}$	мм	+6 ... +8	+6	Залежить від категорії колії та швидкості
3	Допустиме звуження рейкової колії $\Delta S_{-} \Delta S_{-}$	мм	-4 ... -6	-4	Критичне для безпеки руху
4	Номінальна колісна колія $q_{0q_0q_0}$	мм	1440	1360	Відстань між внутрішніми поверхнями гребенів
5	Допустиме відхилення колісної колії $\Delta q \Delta q$	мм	± 3	± 2	Визначається зносом коліс
6	Мінімальна різниця $S_{-qS} - qS_{-q}$	мм	≥ 80	≥ 70	Забезпечує проходження кривих
7	Кут нахилу гребеня колеса $\gamma \gamma$	град	70	68-70	Впливає на критерій Надаля
8	Коефіцієнт тертя $\mu \mu$	—	0,25-0,35	0,25-0,35	Залежить від умов змащення
9	Допустиме значення $Y/QY/QY/Q$	—	$\leq 0,8$	$\leq 0,8$	Критерій стійкості проти сходу

№	Параметр	Одиниця виміру	Колія 1520 мм (Україна)	Колія 1435 мм (ЄС)	Примітка
10	Мінімальний радіус кривої без обмеження швидкості	м	350–400	300	Для пасажирського руху
11	Допустима швидкість у кривих малого радіуса	км/год	60–80	80–100	За умови нормативного стану колії
12	Граничний знос гребеня колеса	мм	33	30	Після досягнення – обточування або заміна

Пояснення до таблиці

1. Колія 1520 мм має дещо більші допустимі відхилення, що історично пов'язано з вантажною спрямованістю та менш жорсткими швидкісними вимогами.

2. Колія 1435 мм характеризується більш жорсткими допусками, що обумовлено високими швидкостями руху та вимогами TSI.

3. Значення критерію $Y/QY/QY/Q$ є узагальненими та можуть коригуватися залежно від профілю колеса і рейки.

4. Наведені параметри підтверджують, що навіть за різної ширини колії можливе досягнення сумісності за умови дотримання геометричних і експлуатаційних вимог.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У магістерській роботі виконано комплексне дослідження співвідношення рейкової та колісної колії в умовах інтероперабельності залізничного транспорту, що є актуальним завданням у контексті євроінтеграційних процесів та розвитку міжнародних транспортних коридорів України.

У ході дослідження встановлено, що геометричні параметри рейкової та колісної колії мають визначальний вплив на умови взаємодії системи «колесо–рейка», рівень динамічних навантажень, знос елементів інфраструктури та безпеку руху. Показано, що навіть незначні відхилення ширини колії та параметрів колісних пар можуть призводити до погіршення експлуатаційних характеристик залізничного транспорту.

У першому розділі роботи розглянуто теоретичні основи взаємодії колеса і рейки, проаналізовано геометрію контакту, профілі коліс і рейок, а також умови стійкості руху. Застосування положень теорії Герца дозволило оцінити контактні напруження та обґрунтувати вплив навантажень і площі контакту на інтенсивність зносу.

У другому розділі досліджено поняття інтероперабельності та вимоги Технічних специфікацій інтероперабельності Європейського Союзу. Проведено порівняльний аналіз нормативної бази України та ЄС, який показав суттєві відмінності у вимогах до ширини колії, профілів коліс і рейок, а також методів контролю геометрії колії. Встановлено, що гармонізація цих вимог є необхідною умовою інтеграції української залізничної системи до європейського транспортного простору.

У третьому розділі проаналізовано практичні аспекти забезпечення інтероперабельності в Україні. Розглянуто технічні рішення, що застосовуються на прикордонних ділянках, зокрема заміну візків, використання колісних пар змінної ширини та будівництво колії стандарту 1435 мм. Проведена економічна оцінка показала, що в довгостроковій

перспективі найбільш ефективним рішенням для міжнародних маршрутів є розвиток інфраструктури європейського стандарту.

В четвертому розділі доведено, що співвідношення рейкової та колісної колії має комплексний вплив як на рівень безпеки руху, так і на економічну ефективність залізничних перевезень. Забезпечення його оптимальних значень є необхідною умовою сталого розвитку залізничного транспорту України та його інтеграції до європейської транспортної системи.

На основі виконаного дослідження сформульовано рекомендації щодо оптимізації співвідношення рейкової та колісної колії в Україні, які включають гармонізацію нормативної бази, впровадження сучасних профілів коліс, розвиток систем моніторингу стану колії та поетапне розширення мережі колії стандарту 1435 мм.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Esveld C. Modern Railway Track. — Zaltbommel : MRT-Productions, 2001.
2. Knothe K., Stichel S. Rail Vehicle Dynamics. — Springer, 2017.
3. UIC Code 518. Testing and approval of railway vehicles. — Paris : UIC, 2009.
4. UIC Code 519. Method for determining track loading. — Paris : UIC, 2015.
5. EN 13848-1:2019. Railway applications — Track — Track geometry quality.
6. EN 13715:2020. Railway applications — Wheelsets and bogies — Wheels.
7. EN 13674-1:2017. Railway applications — Track — Rail.
8. TSI Infrastructure. Commission Regulation (EU) No 1299/2014.
9. TSI Rolling Stock — Locomotives and Passenger Rolling Stock.
10. European Union Agency for Railways. Interoperability Directive.
11. Коваленко В. В. Залізнична колія. — Київ : ДЕТУТ, 2018.
12. Даниленко Е. І. Динаміка залізничного рухомого складу. — Київ : НТУ, 2016.
13. ГОСТ 9036-88. Колісні пари залізничного рухомого складу.
14. ДСТУ 7598:2014. Колія залізнична. Основні параметри.
15. ДСТУ 8302:2015. Інформація та документація.
Бібліографічне посилання.
16. Szablewski D. Wheel–rail contact mechanics. — Elsevier, 2014.
17. Ekberg A. Rolling Contact Fatigue of Railway Wheels. — KTH, 2002.
18. Zboinski K. Lateral stability of railway vehicles. — Vehicle System Dynamics, 2018.

19. Iwnicki S. Handbook of Railway Vehicle Dynamics. — CRC Press, 2006.