

Міністерство освіти і науки України
Український державний університет науки і технологій

Факультет «Будівництво, архітектура та інфраструктура»
Кафедра «Транспортна інфраструктура»

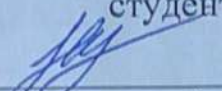
Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи
магістр
(ступінь вищої освіти)

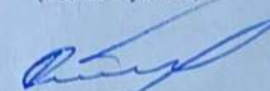
на тему: Закономірності впливу швидкості руху на вартість перебудови кривих при проектуванні реконструкції ділянки залізниці

за освітньою програмою: Залізничні споруди та колійне господарство
зі спеціальності: 273 «Залізничний транспорт»
(шифр і назва спеціальності)

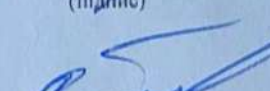
Виконав:

студент групи: КГ2421
 Микола НАДТОЧІЙ
(підпис студента) (Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

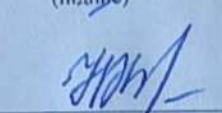
Керівник:

 Доцент Сергій БАЙДАК
(підпис) (посада, Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Нормоконтролер:

 Доцент Сергій БАЙДАК
(підпис) (посада, Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Консультант:

 Ст. викладач Неля ХМЕЛЕВСЬКА
(підпис) (посада, Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

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

Студент


(підпис)

Дніпро – 2025 рік

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

Building, architecture and infrastructure

(faculty)

Transport infrastructure

(department)

Explanatory Note

to Master's Thesis

magistr

(higher education degree)

on the topic: Relationships between train speed and the cost of curve realignment in railway upgrading design

according to educational curriculum: Railway constructions and track management

in the Speciality: 273 «Railway transport»

Done by the student of the group: KG2421

/ Mykola Nadtochii/

(name, surname)

Scientific Supervisor:

/ Associate Professor Sergiy BAIDAK /

(position, name, surname)

Normative controller:

/ Associate Professor Sergiy BAIDAK/

(position, name, surname)

Supervisors:

/ Senior Lecturer Nelia KHMELEVSKA /

(position, name, surname)

Dnipro – 2025

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: Залізничні споруди та колійне господарство

Спеціальність: Залізничний транспорт

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Завідувач кафедри

Олексій ТЮТЬКІН

(підпис)

«___» _____ 2025 р.

З А В Д А Н Н Я

на кваліфікаційну роботу _____
магістр
(ступінь вищої освіти)

студенту **Надточію Миколі Анатолійовичу**

Тема роботи: Закономірності впливу швидкості руху на вартість перебудови кривих при проєктуванні реконструкції ділянки залізниці

Керівник роботи: Байдак Сергій Юрійович, к.т.н.

Затверджена наказом від 02.10.2025 №1401 ст.

2. Строк подання студентом роботи – 15 січня 2025 р.

3. Вихідні дані:

Район проєктування – Київська області	Довжина прийм.-відправн. колій – 850 м	
Початковий пункт – ст. Київ	Ширина земляного полотна – 11 м	
Кінцевий пункт – ст. Фастів	Верхня будова колії:	
Довжина лінії, км – 63.5	Тип рейок – Р65	Баласт, см
Керівний уклон, ‰ – 9‰.	Тип шпал – залізобетонні	щебінь – 30-35 пісок – 20
Кількість головних колій – 2	Маса поїзда:	
Вид тяги – Електрична Локомотиви – ВЛ80, ЧС8	вантажного – 4000/3700, пасажирського – 1000	

4. Вантажонапруженість на 10-й рік експлуатації: 25/21 млн. ткм/км

5. Зміст розрахунково-пояснювальної записки:

1 Огляд наукових досліджень за зазначеною проблемою.

2 Характеристика технічного стану

3 Тягові розрахунки

4. Реконструкція плану

5. Охорона праці

Перелік графічного матеріалу: Графіки залежності тягово-енергетичних показників від максимальної швидкості. Презентація на 12-15 слайдах

5. Консультанти розділів роботи:			
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Завдання видав:	Завдання прийняв:
		(підпис, дата)	(підпис, дата)
1-3, 5	Байдак Сергій Юрійович, доцент		
4	Хмелевська Неля Петрівна, ст. викл		

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Відсотки
1	Огляд наукових досліджень за зазначеною проблемою.	02.10.2025	10
2	Аналіз колійної інфраструктури, профілю і плану ділянки залізниці	16.10.2025	15
3	Допустимі швидкості руху поїздів для існуючого технічного стану ділянки	01.11.2025	20
4	Виконання тягових розрахунків. Аналіз можливих варіантів підвищення швидкості на перегонах і станціях.	20.11.2025	35
5	Реконструкція плану залізниці.	11.12.2025	10
7	Подання кваліфікаційної роботи до кафедри.	15.01.2026	10
8	Захист кваліфікаційної роботи на засіданні Екзаменаційної комісії.	За розкладом ЕК	100

Завдання прийняв до виконання

(підпис)

Микола НАДТОЧІЙ

Керівник магістерської роботи

(підпис)

Сергій БАЙДАК

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи магістра:

60 с., 33 рис., 6 табл., 3 додатки, 23 джерел.

Найменування роботи: «Закономірності впливу швидкості руху на вартість перебудови кривих при проектуванні реконструкції ділянки залізниці»

Об'єкт досліджень є процес впливу геометричних параметрів кривих залізничної колії на допустиму швидкість руху поїздів.

Предмет досліджень – є обмеження швидкості руху на існуючій залізничній дільниці Київ – Фастів, зумовлені параметрами плану лінії, а також обсяги та вартість робіт з перебудови кривих при підвищенні швидкості руху.

Метою магістерської роботи є розроблення технічно та економічно обґрунтованих заходів щодо підвищення швидкості руху поїздів на дільниці Київ – Фастів шляхом оптимізації параметрів плану залізничної колії та оцінювання доцільності перебудови кривих.

Стисла характеристика роботи.

У магістерській роботі виконано аналіз інфраструктури, поздовжнього профілю та плану залізничної лінії Київ – Фастів, за результатами якого встановлено основні причини, що стримують підвищення швидкості руху поїздів до 160 км/год. Запропоновано комплекс заходів, спрямованих на підвищення швидкості руху, зокрема коригування параметрів кругових і перехідних кривих, а також варіанти їх перебудови з різними рівнями втручання в існуючу інфраструктуру.

Дослідження ґрунтуються на аналізі фактичних даних поздовжнього профілю та плану колії, обмежень швидкості руху, закладених у графіку руху поїздів, а також на результатах тягових і геометричних розрахунків. Розрахунки виконано з використанням електронно-обчислювальної техніки із застосуванням програмних комплексів MoveRW, RWPlan та Microsoft Excel.

Ключові слова: залізнична колія, реконструкція залізничної ділянки, план лінії, максимальна швидкість, тягово-енергетичні показники, оптимізація плану колії.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
1 ОГЛЯД НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ЗА ЗАЗНАЧЕНОЮ ПРОБЛЕМОЮ	9
1.1 Теоретичні основи впливу швидкості на геометрію залізничних кривих	9
1.2 Вартісні аспекти реконструкції залізничних кривих	10
1.3 Наукові напрями дослідження впливу швидкості на вимоги до кривих	11
2 ХАРАКТЕРИСТИКА ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ДІЛЯНКИ.....	15
2.1 Загальна характеристика ділянки Київ – Фастів	15
2.2 Норми проектування ДБН.....	17
2.3 Характеристика плану та профілю лінії	19
3 ТЯГОВІ РОЗРАХУНКИ	23
3.1 Основні параметри тягових розрахунків	23
3.2 Додаткові параметри тягових розрахунків	26
3.3 Результати тягових розрахунків.....	27
3.4 Варіанти підвищення швидкості руху на ділянці	33
4 РЕКОНСТРУКЦІЯ ПЛАНУ ЗАЛІЗНИЦІ	39
4.1 Визначення максимально допустимих швидкостей руху в кривих	39
4.2 Технологія розрахунку об'ємів та вартості робіт при перебудові плану лінії	42
4.3 Вплив максимальної швидкості руху на вартість перебудови кривих	44
4.4 Ефективність від збільшення швидкості.....	49
5 ОХОРОНА ПРАЦІ ПРИ ВИКОНАННІ РОБІТ З РЕКОНСТРУКЦІЇ ПЛАНУ КОЛІЇ.....	51
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	55
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	57
ДОДАТКИ.....	60

ВСТУП

Сучасний розвиток залізничного транспорту в Україні характеризується необхідністю підвищення швидкостей руху поїздів, зростанням обсягів перевезень та інтеграцією транспортної системи до європейської мережі. У цих умовах особливої актуальності набуває реконструкція існуючих ділянок залізниці, геометричні параметри яких не відповідають сучасним вимогам щодо швидкості руху, безпеки та економічної ефективності експлуатації.

Одним із ключових факторів, що обмежує допустиму швидкість руху поїздів, є план залізничної колії, зокрема параметри кругових і перехідних кривих. Зі зростанням проектною швидкості руху підвищуються вимоги до радіусів кривих, довжин перехідних кривих, величини підвищення зовнішньої рейки та умов взаємодії колії й рухомого складу. Це, у свою чергу, призводить до ускладнення проектних рішень та істотного збільшення вартості реконструкції залізничних ділянок.

Проблема оптимального вибору швидкості руху при проектуванні реконструкції полягає в необхідності досягнення компромісу між технічними вимогами до геометрії колії та економічними можливостями реалізації проекту. Підвищення швидкості потребує значні обсяги земляних робіт, переукладання колії, перебудову штучних споруд і комунікацій, що істотно впливає на загальну вартість проекту. Водночас недостатнє підвищення швидкості не забезпечує повного використання потенціалу залізничної інфраструктури та знижує конкурентоспроможність залізничного транспорту.

Аналіз наукових досліджень свідчить, що питання впливу швидкості руху на параметри кривих залізничної колії розглядається досить широко, проте закономірності впливу підвищення швидкості руху поїздів саме на вартість перебудови кривих у межах конкретних ділянок залізниці потребують подальшого узагальнення та систематизації з урахуванням сучасних нормативних вимог і технологій проектування.

У зв'язку з цим дослідження закономірностей впливу швидкості руху на

вартість перебудови кривих при проєктуванні реконструкції ділянки залізниці є актуальним науково-практичним завданням, спрямованим на підвищення ефективності проєктних рішень та обґрунтований вибір раціональних параметрів реконструкції.

Ділянка залізниці Київ – Фастів є однією з ключових складових транспортної інфраструктури центрального регіону України та відіграє важливу роль у забезпеченні приміського, міжрегіонального та вантажного сполучення. Вона характеризується високою інтенсивністю руху та підвищеними вимогами до пропускної і провізної спроможності.

Підвищення швидкості руху поїздів на ділянці Київ – Фастів безпосередньо впливає на вимоги до геометричних параметрів кривих, зокрема на збільшення радіусів кругових кривих, довжин перехідних кривих і величин підвищення зовнішньої рейки. Реалізація таких рішень супроводжується зростанням обсягів земляних робіт, переукладанням колії, коригуванням поздовжнього профілю, а в окремих випадках – перебудовою штучних споруд та об'єктів інфраструктури, що істотно впливає на загальну вартість реконструкції.

1 ОГЛЯД НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ЗА ЗАЗНАЧЕНОЮ ПРОБЛЕМОЮ

1.1 Теоретичні основи впливу швидкості на геометрію залізничних кривих

Геометрія залізничних кривих є одним із ключових факторів, що визначає безпеку та швидкість руху поїздів, а також необхідні технічні й фінансові параметри реконструкції колії. Допустима швидкість руху в кривих визначається взаємодією таких параметрів, як радіус кривої, довжина перехідної кривої, величина підвищення зовнішньої рейки та непогашене поперечне прискорення.

Згідно з класичними теоретичними положеннями при підвищенні швидкості руху вимоги до радіуса кривої зростають нелінійно. Так, багато наукових досліджень підтверджують, що підвищення швидкості руху поїздів з 80 до 120 км/год потребує збільшення радіусів кривих у 1,6–2 рази, а при переході до швидкостей 160 км/год – у 3–4 рази, що обумовлено нормативними обмеженнями щодо величини непогашеного поперечного прискорення та умов динамічної взаємодії рухомого складу з колією [1, 2]. Це безпосередньо впливає на обсяги земляних робіт, величину зміщення осі колії, необхідність перебудови штучних споруд і, відповідно, призводить до зростання вартості реконструкції залізничної інфраструктури.

Дослідження впливу геометрії плану на динаміку руху активно проводяться українськими та міжнародними вченими. У роботах Кургана М. Б., Кургана Д. М., Байдака С. Ю. та співавторів доведено, що збільшення радіуса кривої на 15 - 40% дозволяє зменшити непогашене прискорення на 20 -35%, а це, у свою чергу, дає змогу підвищити максимальну допустиму швидкість без додаткового посилення верхньої будови колії.

У більш сучасних працях значна увага приділяється впливу динамічних сил взаємодій між колесом і рейкою, бокових сил та поведінки колії при експлуатації в кривих, що має суттєвий вплив на безпеку руху поїздів. Так, у фундаментальній праці Modern Railway Track описано різні динамічні аспекти колії і контакт колеса/рейки, що істотно впливають на поведінку поїзда при

високих швидкостях (Esveld, 2001) [3]. Аналогічно, в Track Compendium висвітлюються механізми контактних сил, їх причини та вплив на стабільність руху (Lichtberger, 2011). Огляд літератури з моніторингу стану колії також підкреслює, що дефекти геометрії приводять до наростання коливань і динамічних ефектів, що негативно впливають на безпеку та вимагають реконструкції (de Melo et al., 2020) [4].

Таким чином, аналіз наукових джерел свідчить, що:

- підвищення швидкості руху безпосередньо вимагає збільшення радіусів кривих та перехідних кривих;
- недостатні геометричні параметри плану призводять до обмеження швидкості та збільшення експлуатаційних витрат;
- реконструкція кривих у складних за топографією районах є суттєвим фактором вартості проєкту;
- цифрові інструменти моделювання RWPlan, MoveRW, та ін. суттєво підвищують точність оцінки параметрів та ефективність проєктних рішень.

Отже, закономірності впливу швидкості на геометрію кривих та їх реконструкцію є комплексним техніко-економічним завданням, що потребує врахування як динамічних характеристик руху, так і обсягів будівельно-монтажних робіт.

1.2 Вартісні аспекти реконструкції залізничних кривих

Підвищення швидкості руху на існуючих залізничних лініях є одним із найефективніших шляхів зростання пропускної та провізної спроможності, скорочення часу доставки пасажирів і вантажів та інтеграції національної мережі до європейських транспортних коридорів. Водночас збільшення швидкості суттєво підвищує вимоги до геометрії колії, насамперед у плані: радіусів кругових кривих, параметрів перехідних кривих, величин підвищення зовнішньої рейки. Саме тому перебудова кривих (зміна їхніх геометричних параметрів і положення осі колії) часто стає ключовим елементом проєктів реконструкції ділянок під швидкісний рух і водночас – найбільш витратною складовою, оскільки спричиняє комплексні роботи: земляні, колійні, штучні та

суміжні роботи (переулаштування контактної мережі, СЦБ, водовідведення тощо).

Дослідження у сфері економічної оцінки реконструкції плану колії показують, що найбільший вплив на вартість мають:

- збільшення радіуса кривої;
- подовження перехідних кривих;
- вирівнювання осі колії та переміщення об'єктів інфраструктури;
- підсилення верхньої будови колії у разі підвищення швидкостей руху пасажирських поїздів.

Публікації Кургана М. Б., Байдака С. Ю., Хмелевської Н. П. доводять, що саме геометрія плану є ключовим фактором витрат на реконструкцію. Ділянки з малими радіусами формують «бар'єрні місця», де вартість реконструкції зростає в 2–5 разів порівняно з рівнинними ділянками [5, 6].

1.3 Наукові напрями дослідження впливу швидкості на вимоги до кривих

У науковій і нормативно-методичній літературі простежуються кілька сталих напрямів, які безпосередньо формують підхід до оцінювання вартості перебудови кривих залежно від заданої швидкості:

1. Динаміка взаємодії «колесо–рейка» та безпека руху в кривих.

Дослідження в цьому напрямі показують, що зі зростанням швидкості у кривих збільшуються бічні сили, поперечні прискорення та коливання кузова, що впливає на ризики сходу з рейок, інтенсивність зносу гребнів і головки рейки, а також на потребу в точнішому призначенні підвищення зовнішньої рейки й параметрів перехідної кривої відповідно до структури поїздопотoku [7]. У роботах із залізничної динаміки [8, 9] підкреслюється важливість обмеження невірноваженого прискорення та забезпечення плавності зміни кривизни – саме ці показники є «містком» між вимогами до швидкості та необхідністю перебудови плану.

2. Геометрія кривих та критерії комфортності й плавності руху.

Класичні та сучасні підходи дозволяють дійти наступного висновку: для

підвищених швидкостей недостатньо лише збільшити радіус. Потрібно також забезпечити раціональну довжину перехідних кривих, узгодити підвищення (та його наростання) з динамічними обмеженнями, а також мінімізувати недостатньо плавні переходи в плані, зокрема у місцях стикування прямої – перехідної й кругової кривої). Саме ці вимоги часто зумовлюють необхідність зміщення осі колії, розширення земляного полотна, перенесення споруд і комунікацій – тобто формують вартість перебудови.

3. Експлуатаційна надійність та утримання колії.

У дослідженнях із колійного господарства та технічного утримання доводиться, що підвищення швидкості в кривих без покращення геометрії колії приводить до прискореного накопичення відхилень у плані й профілі, частішої потреби у виправках, більш інтенсивного зносу рейок і мастильних матеріалів (при лубрикації в кривих малих радіусів), а також до збільшення витрат на поточне утримання. Відповідно, перебудова кривих може розглядатися не тільки як капітальні витрати, а й як інвестиція у зниження майбутніх експлуатаційних витрат.

4. Проектування реконструкції в обмежених умовах існуючого коридору.

Окремі наукові дослідження присвячено перебудові кривих на діючих лініях за умови обмеженої смуги відведення, щільної забудови, наявності мостів, труб, переїздів, платформ, стрілочних переводів та інженерних мереж. У таких випадках збільшення радіуса кривої може бути технічно можливим лише за рахунок локальних «розширень» коридору, перебудови штучних споруд або застосування компромісних рішень (зменшення швидкості на окремих кривих, застосування більшої величини підвищення у межах допустимого, оптимізація складових кривих тощо). Це формує нерівномірність вартості: одна й та сама «цільова швидкість» може вимагати від мінімальних коригувань до повної перебудови плану лінії.

У наукових публікаціях і методиках можна виділити кілька підходів.

Нормативно-розрахунковий підхід. Вихідним є визначення допустимих параметрів кривих для заданої швидкості за нормами (обмеження

неврівноваженого прискорення, максимального підвищення, темпу наростання підвищення, мінімальної довжини перехідної). Далі порівнюють існуючі параметри ділянки з необхідними, і на цій основі визначають недостатність величини існуючого радіуса, довжини перехідних кривих та потребу в зміщенні осі. Цей підхід добре формалізується й дозволяє отримати закономірності такого типу, як зі збільшенням швидкості зростає мінімально потрібна величина радіусу, а отже – і ймовірність виходу за межі існуючої смуги відведення під залізницю та збільшення вартості.

Моделювання динаміки та обмежень по комфорту й безпеці руху.

На практиці одна й та сама геометрія кривих може давати різні показники комфорту залежно від стану колії, типу рухомого складу, режимів руху, нерівностей. Тому в сучасних роботах застосовують моделі руху та динаміки, які уточнюють граничні швидкості в конкретних кривих і дозволяють обґрунтувати вище перераховані параметри, де перебудова критично необхідна, а де допустимі локальні заходи (підвищення зовнішньої рейки, шліфування рейок, стабілізація колії тощо). Для економічної частини важливо, що такий підхід допомагає уникати перевитрат капітальних вкладень там, де максимально допустима швидкість може бути забезпечена без радикальної зміни плану.

Параметричні та статистичні залежності вартості. У прикладних дослідженнях часто формують емпіричні залежності між зміною радіуса, зміщенням осі колії, довжиною перехідної кривої та укрупненими показниками вартості (наприклад, вартість 1 м зміщення осі на 1 км кривої з урахуванням типу ґрунтів, наявності штучних споруд, інженерних мереж). Цінність такого підходу – у можливості швидкого порівняння варіантів швидкості (наприклад, 120/140/160 км/год) та визначення «порогів», після яких вартість зростає стрибкоподібно через необхідність перебудови споруд.

Оптимізаційні методи та цифрове проектування. Сучасні CAD/BIM- та спеціалізовані системи для плану та профілю дозволяють виконувати автоматизовану оптимізацію траси: мінімізувати сумарні відхилення, обсяги земляних робіт, кількість можливих варіантів перебудови об'єктів

інфраструктури, одночасно задовольняючи обмеження щодо швидкості. У наукових роботах доводиться, що цифрові методи скорочують кількість ітерацій та підвищують обґрунтованість рішень, а також дозволяють розглядати кілька сценаріїв швидкості як множину альтернатив із подальшим економічним порівнянням.

Проведений аналіз наукових досліджень з окресленої проблеми показав, що підвищення швидкості руху поїздів зумовлює посилення вимог до геометричних параметрів кривих, а їх перебудова є одним із ключових чинників зростання вартості реконструкції. Найбільш перспективним слід вважати комплексний підхід, який поєднує нормативно-розрахункове визначення необхідних параметрів кривих для заданих швидкостей руху, ідентифікацію бар'єрних кривих та оцінювання технічних варіантів їх перебудови, а також аналіз обсягів робіт і відповідних витрат.

2 ХАРАКТЕРИСТИКА ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ДІЛЯНКИ

2.1 Загальна характеристика ділянки Київ – Фастів

Ділянка залізниці Київ – Фастів є важливою складовою транспортної інфраструктури центральної частини України та входить до системи підходів до Київського залізничного вузла. Вона забезпечує інтенсивне приміське, пасажирське та вантажне сполучення між столицею та південно-західними регіонами країни, а також виконує функцію транзитного коридору для поїздів далекого сполучення (рисунок 2.1).

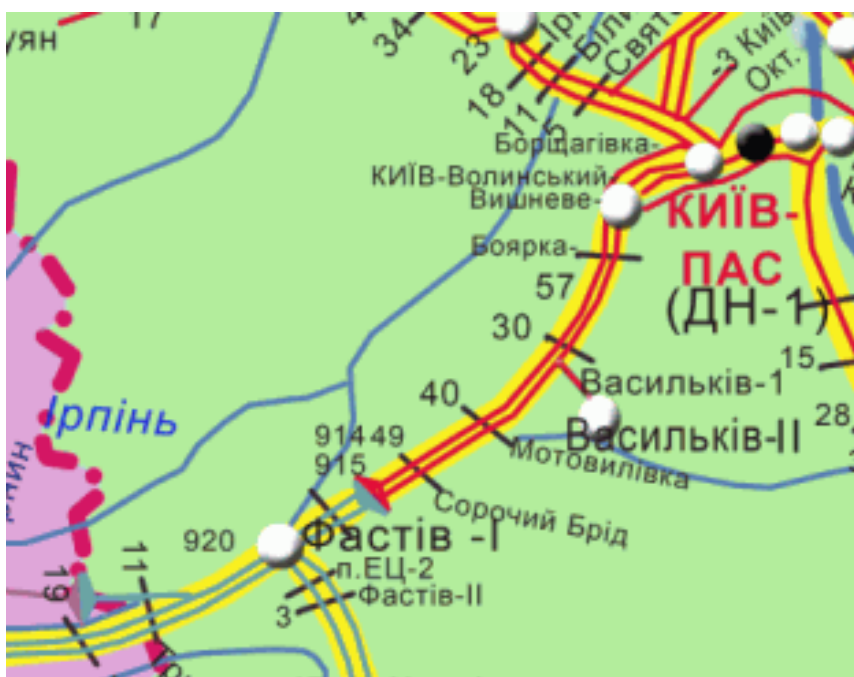


Рисунок 2.1 – Схема ділянки Київ – Фастів

Ділянка Київ – Фастів Південно-Західної залізниці знаходиться у Київській області. Ділянка Київ – Фастів – двоколійна, електрифікована є частиною напрямку Київ – Львів. Довжина ділянки – 72,7 км.

У технічному відношенні ділянка Київ – Фастів належить до електрифікованих ліній загального користування та експлуатується в умовах змішаного руху поїздів різних категорій. Значна частка приміських електропоїздів, а також пасажирських і вантажних поїздів зумовлює підвищені вимоги до пропускної спроможності, стабільності графіка руху та надійності інфраструктури.

На дільниці розташовані 6 проміжні станцій: Сорочий Брод, Мотовилівка, Васильків, Боярка, Жуляни.

Максимально допустима швидкість на ділянці становить 120 км/год для пасажирських та 80 км/год для вантажних поїздів.

Але, згідно з наказом начальника залізниці на деяких перегонах та станціях діють такі обмеження швидкості (по головних коліях) [11]:

Таблиця 2.1 – Обмеження швидкостей на ділянці Київ – Фастів

Станції/перегони	Пасажирський рух, км/год	Вантажний рух, км/год
Київ	70	70
Київ - Київ Пасажирський	100	80
Київ Пасажирський	60	60
Київ Пасажирський - Київ Волинський	120	80
Київ Волинський	70	70
Київ Волинський - Жуляни	120	80
Жуляни	100	80
Жуляни - Боярка	120	80
Боярка	100	80
Боярка - Васильків	120	80
Васильків	80	80
Васильків - Мотовилівка	120	80
Мотовилівка	80	80
Мотовилівка - Сорочий Брод	120	80
Сорочий Брод	100	80
Сорочий Брод - Фастів	120	80
Фастів	70	70

Тяга електрична, локомотиви для пасажирських перевезень ЧС8, для вантажних ВЛ80, вагони чотиривісні.

Маса поїздів складає 4600/3700т та 1000 т для вантажних та пасажирських відповідно.

Система СЦБ автоблокування.

На головних коліях укладені рейки Р65 з залізобетонними шпалами на щебеному баласті. Висота щебенового баласту складає 30-35 см, а піщаної подушки – 20 см. Епюра шпал становить 1840 шт/км та 1600 шт/км.

Переважна частина земляного полотна – насипи, найбільший насип – 15 м. Ширина земляного полотна 11 м.

2.2 Норми проєктування ДБН

Проектні рішення при реконструкції ділянки залізниці Київ – Фастів приймаються відповідно до вимог чинних державних будівельних норм України для залізниць колії 1520 мм та інших нормативних документів, що регламентують проєктування, будівництво і експлуатацію залізничної інфраструктури [10].

Нормативами встановлено, що параметри плану та поздовжнього профілю залізничної колії визначаються категорією лінії, проєктною швидкістю руху, вантажонапруженістю та умовами експлуатації. За наявних вихідних даних ділянка Київ – Фастів відноситься до ліній I категорії.

При реконструкції існуючої залізничної ділянки поздовжній профіль колії повинен забезпечувати безпеку руху поїздів, необхідну пропускну та провізну спроможність, а також можливість реалізації проєктних швидкостей руху відповідно до категорії лінії. Основні параметри поздовжнього профілю визначаються з урахуванням характеру руху, вантажонапруженості та техніко-економічної доцільності проєктних рішень.

У процесі реконструкції, за можливості, поздовжній профіль зберігають без істотних змін. Коригування ухилів допускається лише у випадках, коли існуючі параметри не відповідають нормативним вимогам або перешкоджають підвищенню швидкості руху поїздів. Керівний ухил приймається з урахуванням умов тяги вантажних поїздів та забезпечення стійкої експлуатації лінії у змішаному пасажирсько-вантажному русі.

Поздовжній профіль слід проєктувати елементами максимально можливої довжини з мінімальною алгебраїчною різницею ухилів суміжних

ділянок. У місцях переломів профілю для забезпечення плавності руху поїздів передбачаються вертикальні криві нормативних радіусів, які обираються залежно від проєктної швидкості руху та категорії лінії.

Вертикальні криві повинні розташовуватися поза межами перехідних кривих плану колії, а також за межами прогонових споруд мостів і шляхопроводів. Розміщення вертикальних кривих має забезпечувати комфорт руху пасажирських поїздів, зниження динамічних навантажень на колію та елементи рухомого складу.

Виправлення поздовжнього профілю при реконструкції, як правило, здійснюється шляхом підйомки колії за рахунок досипання баласту. У технічно обґрунтованих випадках допускається зниження рівня колії шляхом вибірки баласту або часткової зрізки земляного полотна з дотриманням нормативних вимог до габаритів і водовідведення.

Дотримання нормативних вимог до поздовжнього профілю залізничної лінії створює передумови для забезпечення підвищення швидкостей руху поїздів і стабільної експлуатації ділянки в умовах інтенсивного змішаного руху. Разом з тим, можливість реалізації підвищених швидкостей визначається не лише параметрами поздовжнього профілю, а й геометрією плану колії.

План залізничної колії при реконструкції повинен забезпечувати безпечний і плавний рух поїздів, можливість реалізації встановлених проєктних швидкостей, а також відповідати вимогам експлуатаційної надійності та економічної доцільності. Геометричні параметри плану колії приймаються відповідно до вимог чинних державних будівельних норм України для залізниць колії 1520 мм з урахуванням категорії лінії, проєктної швидкості руху та умов експлуатації [10].

При реконструкції існуючих ліній перевага надається збереженню наявного плану колії, якщо його параметри відповідають нормативним вимогам або допускають реалізацію проєктних швидкостей без погіршення умов безпеки та комфорту руху.

Перехідні криві є обов'язковими елементами плану колії та

застосовуються для з'єднання прямих і кругових ділянок, а також кривих різних радіусів. Їх параметри визначаються залежно від проєктної швидкості руху, величини підвищення зовнішньої рейки та допустимої швидкості зміни поперечного прискорення.

Підвищення зовнішньої рейки в кругових кривих повинно забезпечувати рівномірний розподіл навантажень між рейковими нитками, дотримання нормативних значень непогашених відцентрових прискорень та стабільну роботу колії в умовах змішаного пасажирсько-вантажного руху. При цьому підвищення не повинно перевищувати допустимих значень для руху вантажних поїздів з урахуванням їх швидкостей.

У випадках, коли існуючі криві не відповідають нормативним вимогам і обмежують реалізацію проєктної швидкості руху, передбачаються заходи з їх перебудови, зокрема збільшення радіусів або коригування параметрів перехідних кривих. Доцільність перебудови плану колії визначається на основі техніко-економічного аналізу з урахуванням обсягів робіт і вартості реконструкції.

Таким чином, загальні вимоги ДБН [10] до плану колії при реконструкції спрямовані на забезпечення нормативних швидкостей руху, безпеки та плавності руху поїздів, а також на оптимізацію проєктних рішень з позицій технічної та економічної ефективності.

2.3 Характеристика плану та профілю лінії

За характером геометрії на ділянці Київ – Фастів зустрічаються як однорадіусні криві, так і складні криві, зокрема S-подібні криві, що складаються з двох послідовно розташованих кривих протилежного напрямку.

Однорадіусні криві характеризуються постійним радіусом по всій довжині кругової частини та, як правило, є більш сприятливими з точки зору реалізації підвищених швидкостей руху. Складові та S-подібні криві потребують особливої уваги при реконструкції та часто призводить до додаткових обмежень швидкості руху поїздів.

На досліджуваній ділянці криві різних радіусів становлять 21% від загальної довжини колії, тоді як прямі ділянки – 79%. Розподіл довжин прямих і кривих ділянок наведено на рисунку 2.2. Загальна довжина прямих становить 53 598 м, а сумарна довжина кривих – 16 802 м.

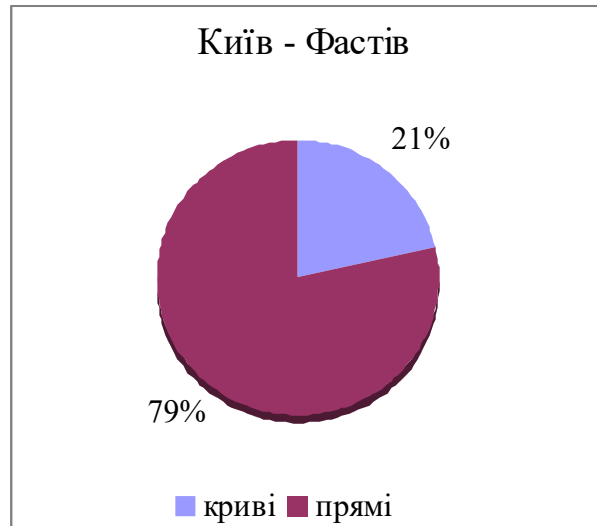


Рисунок 2.2 – Розподіл кривих та прямих

Розподіл кривих за діапазонами радіусів відносно загальної довжини ділянки представлений на рисунку 2.3. Аналіз гістограми показує, що переважна частина кривих має радіуси понад 1500 м, які сумарно становлять близько 11% довжини ділянки. Такі криві є сприятливими з точки зору реалізації підвищених швидкостей руху та, як правило, не потребують суттєвої перебудови.

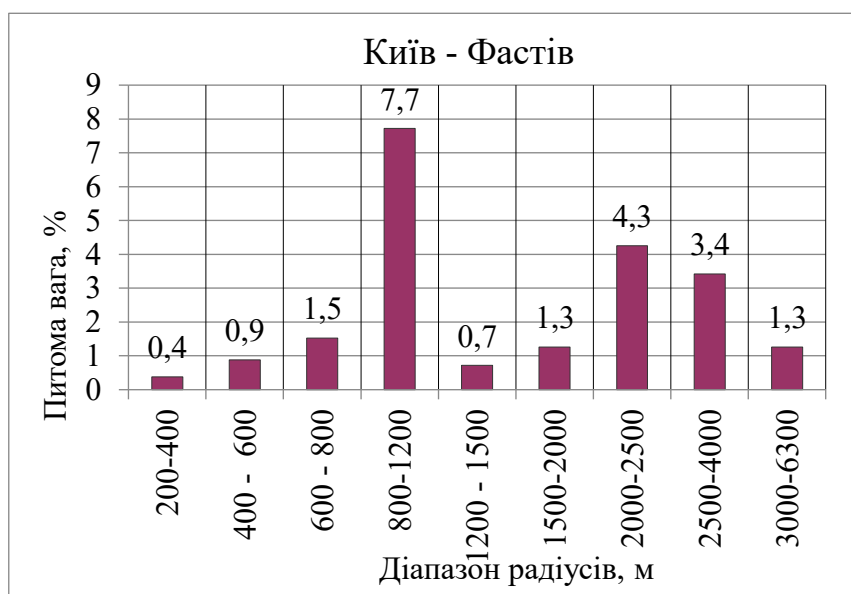


Рисунок 1.3 – Розподіл радіусів на ділянці

Криві малих і середніх радіусів зосереджені на окремих локальних ділянках і можуть виступати обмежувальними елементами плану колії. Саме ці криві потребують подальшого детального аналізу щодо можливості підвищення швидкості руху та доцільності їх перебудови в процесі реконструкції ділянки Київ – Фастів.

Таким чином, план залізниці на досліджуваній ділянці в цілому не є надмірно складним, однак наявність кривих з обмежувальними параметрами визначає необхідність їх інженерної оцінки з позицій впливу проєктної швидкості руху на обсяги та вартість реконструкції.

Керівний ухил на досліджуваній ділянці становить 9‰, а максимальний ухил досягає 10,7‰. Розподіл ухилів за довжиною колії наведено на рисунку 2.4.

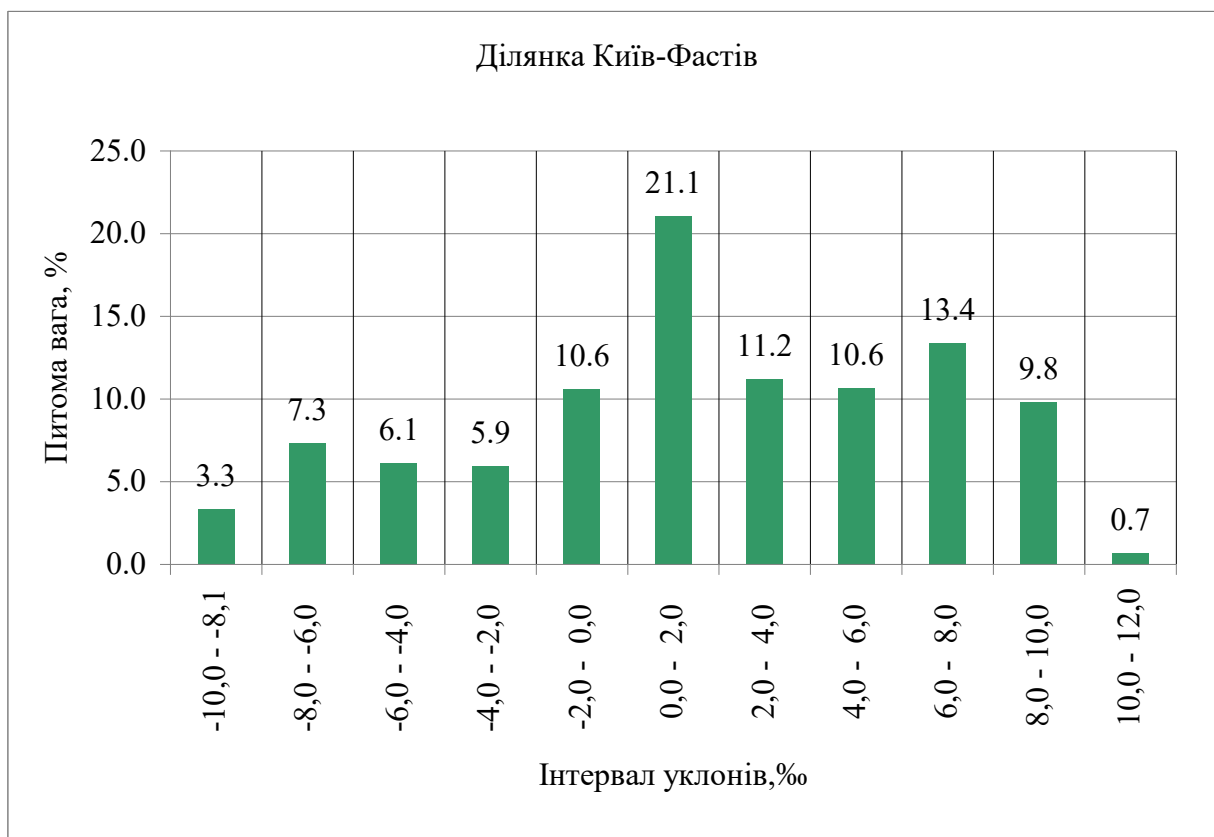


Рисунок 2.4 – Розподіл ухилів на ділянці

Аналіз гістограми показує, що на ділянці переважають ухили з інтервалу 0...2‰, частка яких становить близько 21% від загальної довжини лінії. Це свідчить про переважно пологий характер поздовжнього профілю та сприятливі умови для організації руху поїздів.

Ухили більшої крутизни, зокрема в інтервалах 8...10‰ та 10...12‰, а також відповідні спуски, мають незначну протяжність і в сукупності становлять близько 1% від загальної довжини ділянки. Такі ухили зосереджені на окремих локальних відрізках і не мають істотного впливу на пропускну та провізну спроможність лінії.

Таким чином, поздовжній профіль ділянки Київ – Фастів характеризується відносно спокійним рельєфом і не є визначальним фактором, що обмежує підвищення швидкості руху поїздів. Основні обмеження щодо реалізації проєктних швидкостей пов'язані з параметрами плану колії, що підтверджує доцільність подальшого аналізу кривих як основних бар'єрних елементів при реконструкції ділянки.

3 ТЯГОВІ РОЗРАХУНКИ

3.1 Основні параметри тягових розрахунків

Тягові розрахунки виконуються з метою оцінювання можливості реалізації заданих швидкостей руху поїздів на реконструйованій ділянці залізниці Київ – Фастів, а також визначення впливу параметрів плану і поздовжнього профілю колії на умови руху поїздів. Результати тягових розрахунків використовуються для обґрунтування допустимих швидкостей руху, мас поїздів та доцільності перебудови окремих елементів інфраструктури.

Тягові розрахунки використовуються для визначення характеру руху поїзда по перегону залежність швидкості від пройденого шляху, тобто, кривої швидкості $V(S)$. Маючи криву швидкості можна визначити швидкість у будь-якій точці, а також режим руху (тяга чи гальмування), що необхідно для правильного проектування профілю та плану нових і реконструкції існуючої лінії. По кривій швидкості можна легко визначити час руху поїзда, силу тяги локомотива в кожній точці та затрати механічної роботи з електроенергією.

Для тягових розрахунків використовується програмний комплекс «MoveRW» [12]. Цей вибір пов'язаний з тим, що комплекс програм дозволяє працювати з профілем, планом (RWPlan) [13], робити креслення (CadRW) [12], вирішувати гальмівну задачу (Tormoz-Put) [12]. та інше.

При виконанні тягових розрахунків враховуються основні сили, що діють на поїзд у процесі руху, зокрема:

- сила тяги локомотива;
- сили основного опору руху поїзда;
- додаткові опори, зумовлені ухилами та кривими плану колії;
- інерційні сили при розгоні та гальмуванні.

Основний опір руху поїзда визначається залежно від швидкості руху, маси поїзда та типу рухомого складу, тоді як додатковий опір враховує вплив ухилів поздовжнього профілю та кривих малого і середнього радіусів. Особлива увага приділяється ділянкам із несприятливим поєднанням кривих та ухилів, які

можуть обмежувати допустиму швидкість руху або вимагати коригування параметрів плану колії.

Таким чином, визначені основні параметри тягових розрахунків створюють базу для подальшого моделювання руху поїздів, побудови швидкісних та тягових діаграм і оцінювання впливу проєктної швидкості руху на необхідність перебудови кривих та загальну вартість реконструкції дільниці Київ – Фастів.

Для того, щоб працювати у програмі необхідно ввести дані з поздовжнього профілю. Вихідні дані вводяться у табличному вигляді у форматі: «ухил» «довжина». Необхідно ввести для кожного елемента ухили та довжину.

На рисунку 3.1 показано діалогове вікно програми з поздовжнім профілем. Необхідно ввести початок кілометражу, початкову відмітку, уклони, довжини елементів.

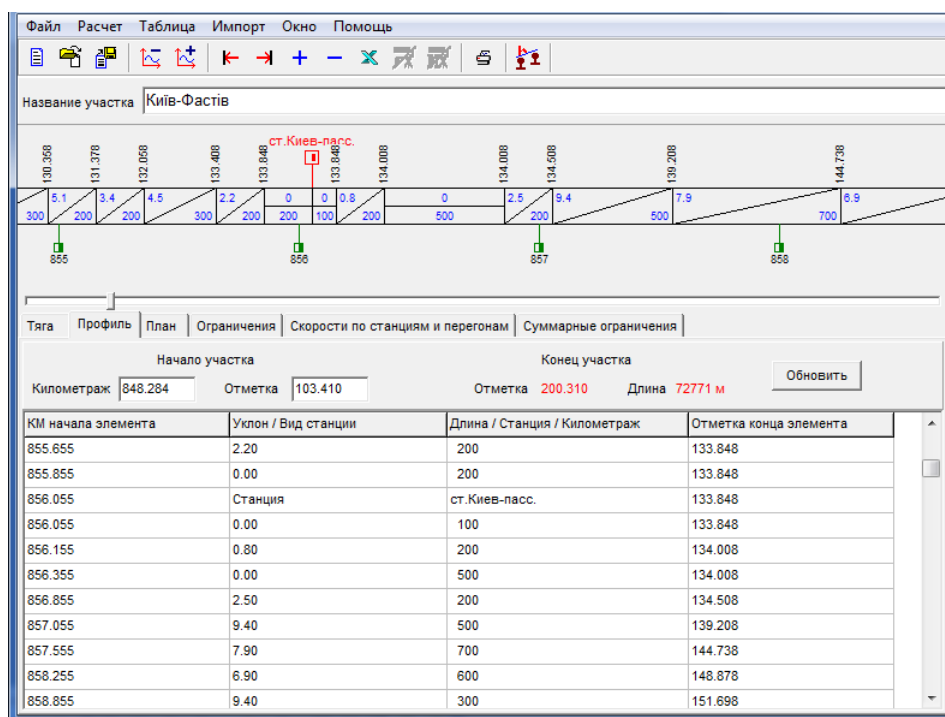


Рисунок 3.1 – Фрагмент параметрів профілю

План представляється параметрами слідкуючих чотирьох елементів: пряма; перехідна крива; кругова крива з поворотом праворуч або ліворуч та підвищення зовнішньої рейки (рисунок 3.2).

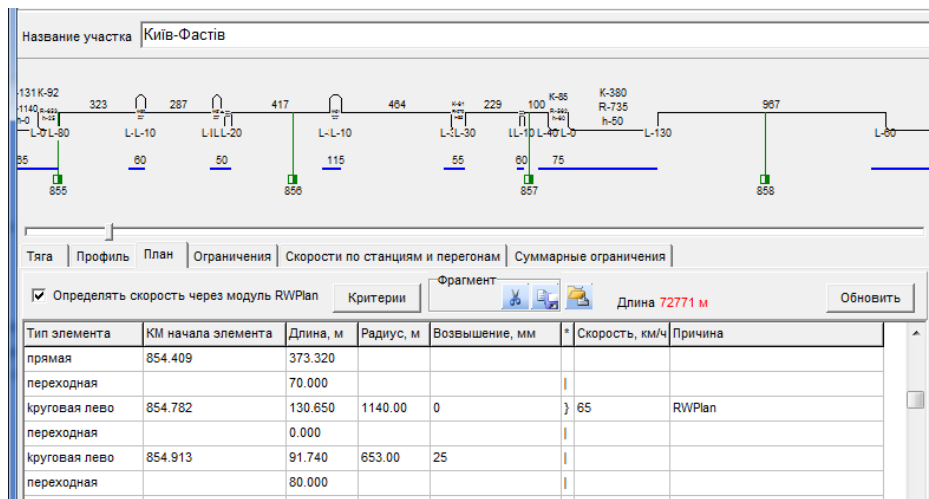


Рисунок 3.2 – Фрагмент плану лінії

Над таблицею з вихідними даними можна побачити графічну побудову плану лінії.

На розрахунки за допомогою програмного комплексу [12] впливає обмеження швидкості, які встановлено на станціях та перегонах.

Тяга Профиль План Ограничения Скорости по станциям и перегонам Суммарные			
120	Установить общую скорость для перегонов		40
Установить о			
Элемент	КМ	Длина, м	Скорость, км/ч
Перегон		4080	120
Граница станции		570	60
ст.Киев-пасс.	856.055		без остановки
Граница станции		1800	60
Перегон		4230	120
Граница станции		570	70
ст.Киев_волинский	862.655		без остановки
Граница станции		850	70
Перегон		3770	120
Граница станции		1150	100
ст.Жуляны	868.425		без остановки
Граница станции		1250	100
Перегон		7070	120
Граница станции		1450	80
ст.Боярка	878.195		без остановки
Граница станции		700	80
Перегон		12610	120

Рисунок 3.3 – Вікно обмеження швидкості по станціям та перегонам

3.2 Додаткові параметри тягових розрахунків

Окрім основних параметрів, у тягових розрахунках враховано додаткові експлуатаційні, геометричні та енергетичні параметри, що дозволяє більш повно оцінити умови руху поїздів і вплив проєктної швидкості на необхідність перебудови елементів плану колії.

Також задається тип локомотива, маса, довжина поїзда, початкові і кінцеві швидкості руху, мінімальна довжина ділянки обмеження швидкості, напрям руху.

Кожен локомотив має власні експлуатаційні характеристики, зокрема конструктивну та максимальну швидкості, масу, а також силу тяги, що визначають його можливості при веденні поїздів різної маси в конкретних умовах експлуатації.

В умовах роботи локомотива поряд із величиною сили тяги важливе значення має швидкість руху V , при якій ця сила може бути реалізована. У зв'язку з цим для оцінювання експлуатаційних властивостей локомотива істотне значення має характер залежності сили тяги від швидкості руху. Найбільша сила тяги необхідна від локомотива під час рушання з місця, розгону поїзда, а також при русі по найбільш крутих і затяжних підйомах.

Повна потужність локомотива використовується лише при певному співвідношенні між силою тяги та швидкістю руху. За інших режимів частина потужності залишається невикористаною, що зумовлено як обмеженнями тягового приводу, так і умовами руху поїзда. Крім того, реалізація постійної сили тяги на всіх швидкостях руху є неможливою та не відповідає змінному характеру поздовжнього профілю залізниці, який включає підйоми, спуски та горизонтальні ділянки.

При русі по підйомах від локомотива вимагається більша сила тяги, ніж при русі по спусках, що безпосередньо впливає на швидкісний режим руху поїзда. Зазвичай на підйомах швидкість руху зменшується, тоді як на спусках можливе її збільшення за рахунок зменшення тягового зусилля або переходу в режим вибігу.

На наступних рисунках (рис. 3.4, 3.5) наведено загальний вигляд та тягова характеристика локомотивів, що використовуються на дільниці Київ – Фастів, а також подано їх основні тягові та експлуатаційні характеристики, які використовуються при виконанні тягових розрахунків.

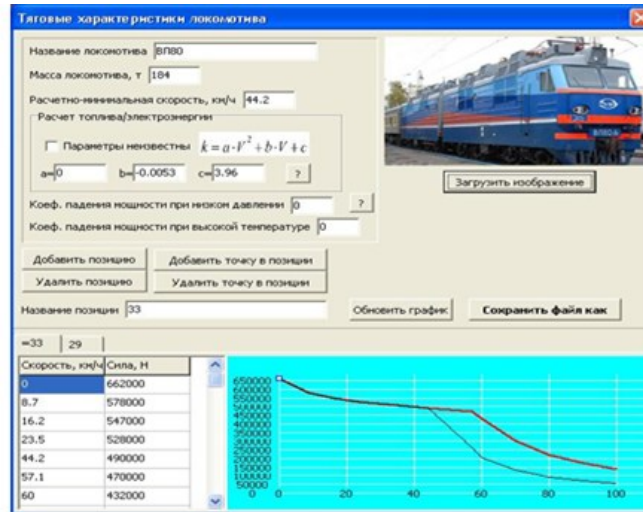


Рисунок 3.4 – Тягові характеристики вантажного локомотива ВЛ-80

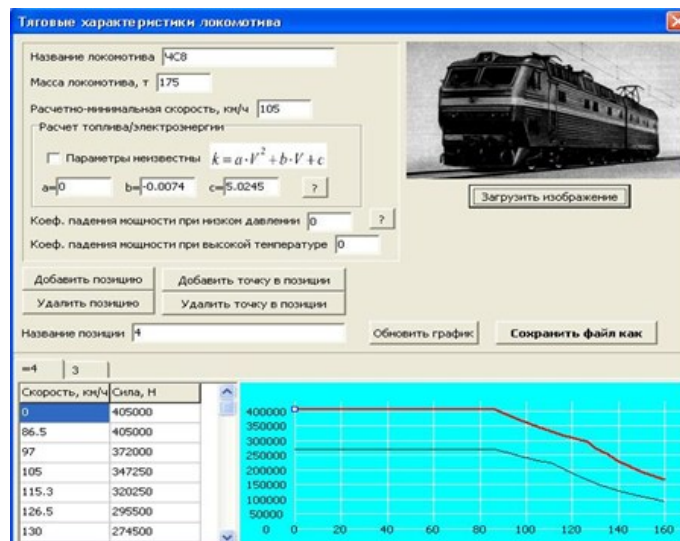


Рисунок 3.5 – Тягові характеристики пасажирського локомотива ЧС-8

3.3 Результати тягових розрахунків

Результатами тягових розрахунків є значення швидкості руху поїздів, режимів руху, механічної роботи, виконаної локомотивом, а також витрат електроенергії на кожному з елементів поздовжнього профілю лінії в обох напрямках руху.

Програмний комплекс MoveRW подає результати тягових розрахунків у табличному та графічному вигляді, що забезпечує наочне відображення процесу руху поїзда.

До основних показників, отриманих у результаті тягових розрахунків, належать: час ходу поїзда (хв), середня ходова швидкість (км/год), витрати електроенергії (кВт·год), механічна робота локомотива (10 кН·км), а також робота гальмівних сил (10 кН·км).

Результати тягових розрахунків для окремих перегонів дільниці наведені у таблиці 3.1, 3.2 для пасажирського та вантажного руху поїздів.

Таблиця 3.1 – Результати тягових розрахунків для пасажирського руху

Назва перегону	Напрямок руху	Відстань, м	$V_{\text{ср}}$, км/год	Витрати електроенергії кВт*год	Механ робота, 10 кНкм	Робота гальмівних сил 10кНкм	Час руху, хв
Київ Пасажирський – Київ Волинський	парна	6600	65	456.5	101.89	28.19	6.1
	непарна		67	169.1	38.57	84.18	5.9
Київ Волинський – Жуляни	парна	5770	91	328	75.95	20.11	3.8
	непарна		90	280.2	65.03	44.1	3.9
Жуляни – Боярка	парна	9770	102	278.2	65.21	32.25	5.8
	непарна		101	348	82.37	37.52	5.8
Боярка – Васильків	парна	14560	105	550.1	130.34	48.31	8.3
	непарна		106	522.6	123.64	49.14	8.3
Васильків – Мотовилівка	парна	9320	100	340.5	79.56	45.55	5.6
	непарна		100	422.9	99.51	40.75	5.6
Мотовилівка – Сорочий Брод	парна	9230	99	433.1	101.46	41.62	5.6
	непарна		99	321.6	75.31	45.16	5.6
Сорочий Брод – Фастів	парна	8130	92	414.1	97.37	61.28	5.3
	непарна		88	391.3	89.5	45.55	5.6

Таблиця 3.2 – Результати тягових розрахунків вантажного руху

Назва перегону	Напрямок руху	Відстань, м	V _{ср} , км/год	Витрати електроенергії кВт*год	Механ робота, 10 кНкм	Робота гальмівних сил 10кНкм	Час руху, хв
Київ Пасажирський – Київ Волинський	парна	6600	42	1174.6	315.81	1.97	9.4
	непарна		61	139.8	38.76	183.17	6.5
Київ Волинський – Жуляни	парна	5770	68	539.2	150.02	0	5.1
	непарна		74	188.6	52.84	46.98	4.7
Жуляни – Боярка	парна	9770	78	540.4	152.14	17.77	7.6
	непарна		78	449.2	126.71	22.09	7.5
Боярка – Васильків	парна	14560	76	944.9	265.39	41.93	11.5
	непарна		78	729.1	205.51	38.31	11.2
Васильків – Мотовилівка	парна	9320	77	427	120.22	35.97	7.2
	непарна		77	580.1	163.28	12.54	7.3
Мотовилівка – Сорочий Брод	парна	9230	76	730.1	205.01	16.07	7.3
	непарна		78	316.9	89.44	28.76	7.1
Сорочий Брод – Фастів	парна	8130	72	714.5	198.81	14.83	6.8
	непарна		75	361.5	101.6	67.87	6.5

На рисунках 3.6 – 3.8 зображені гістограми витрат електроенергії, середньоходової швидкості та витрати часу на перегонах для пасажирського рухомого складу.

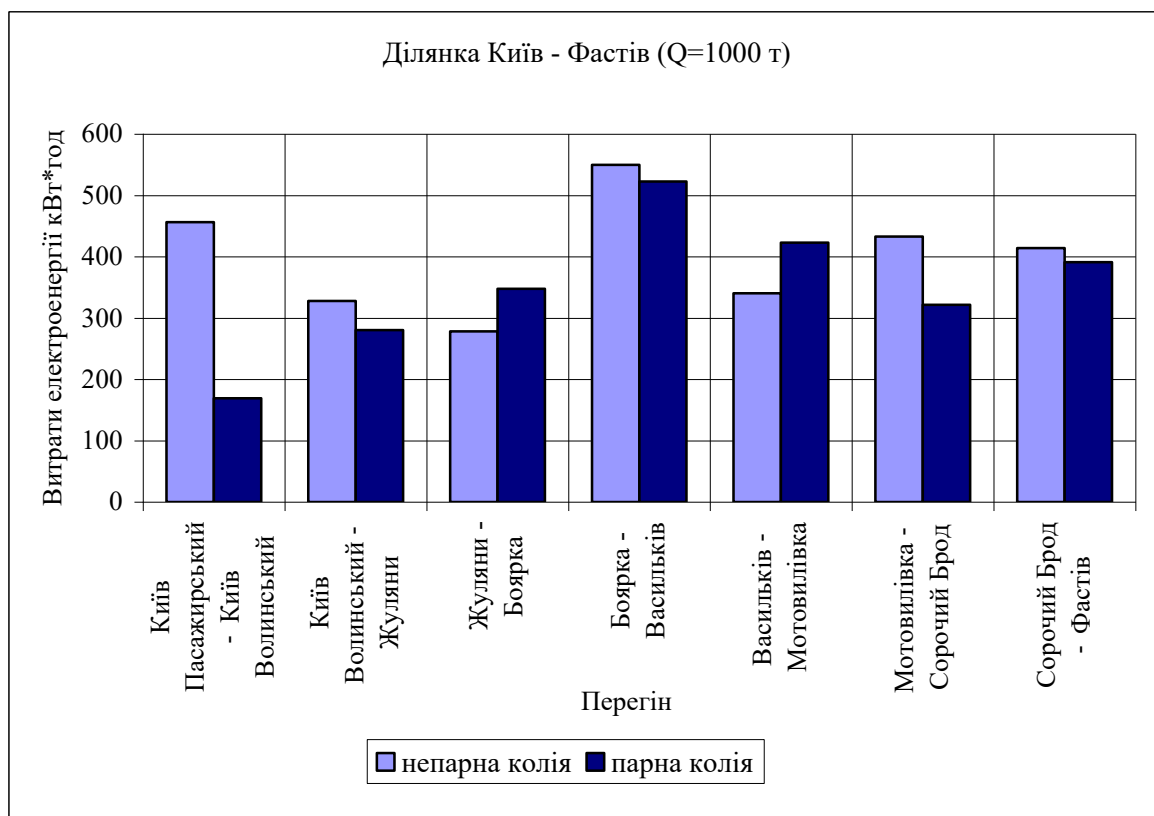


Рисунок 3.6 – Витрата електроенергії по перегонам

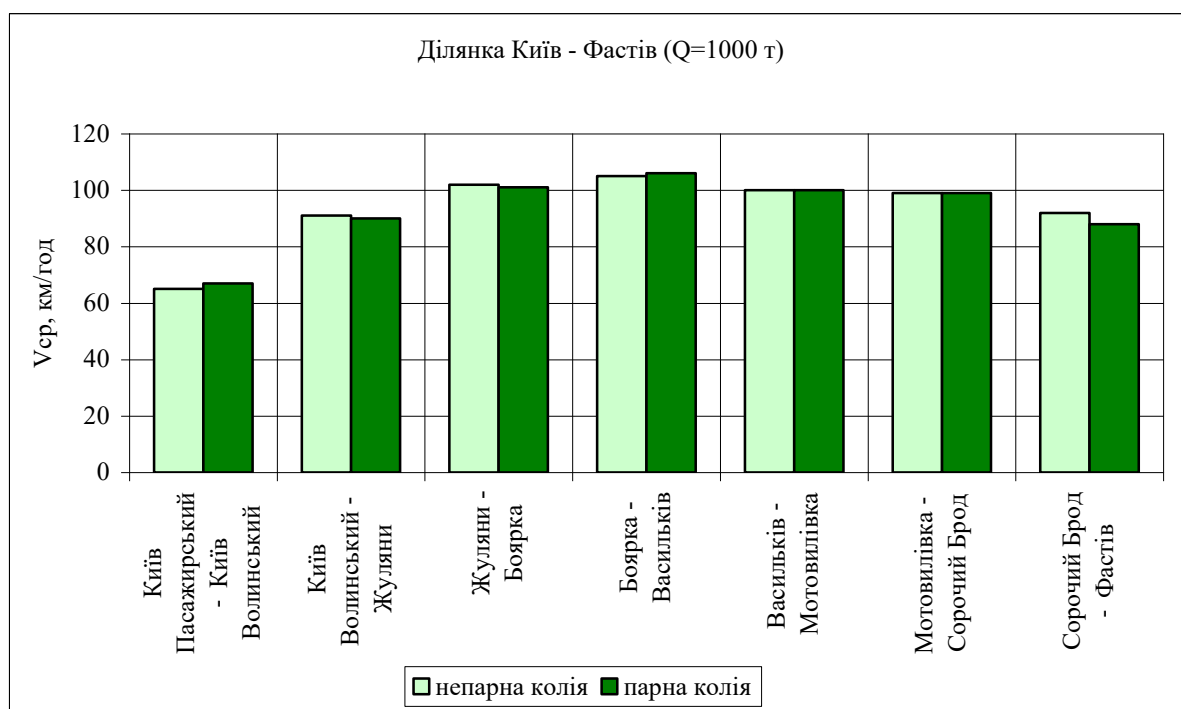


Рисунок 3.7 – Середньохорова швидкість по перегонам

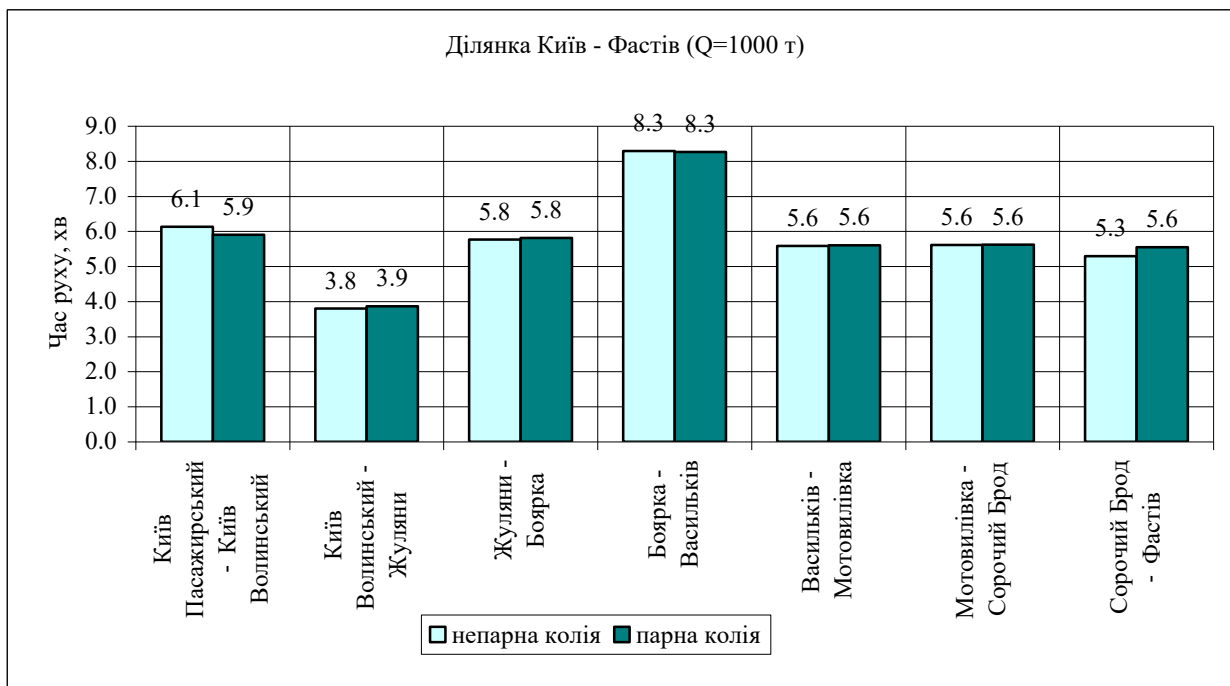


Рисунок 3.8 – Час руху по перегонам

На рисунках 3.9 – 3.11 зображені гістограми витрат електроенергії, середньоходнової швидкості та витрати часу на перегонах для вантажного рухомого складу.

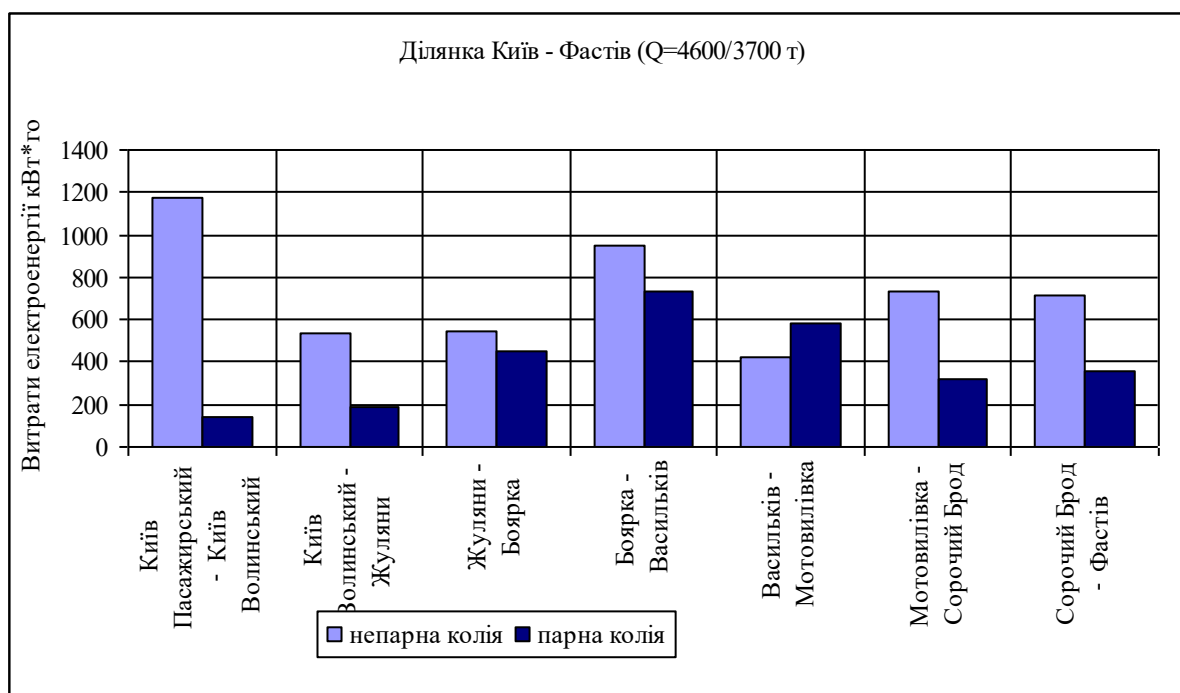


Рисунок 3.9 – Витрата електроенергії по перегонам

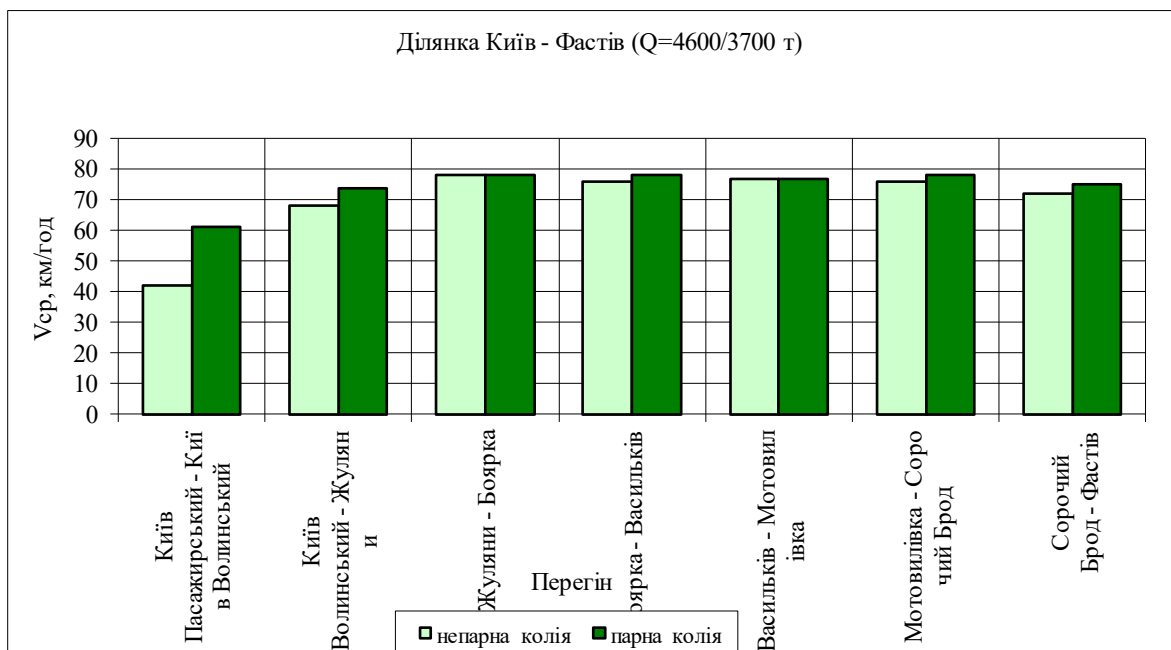


Рисунок 3.10 – Середньохорова швидкість по перегонам

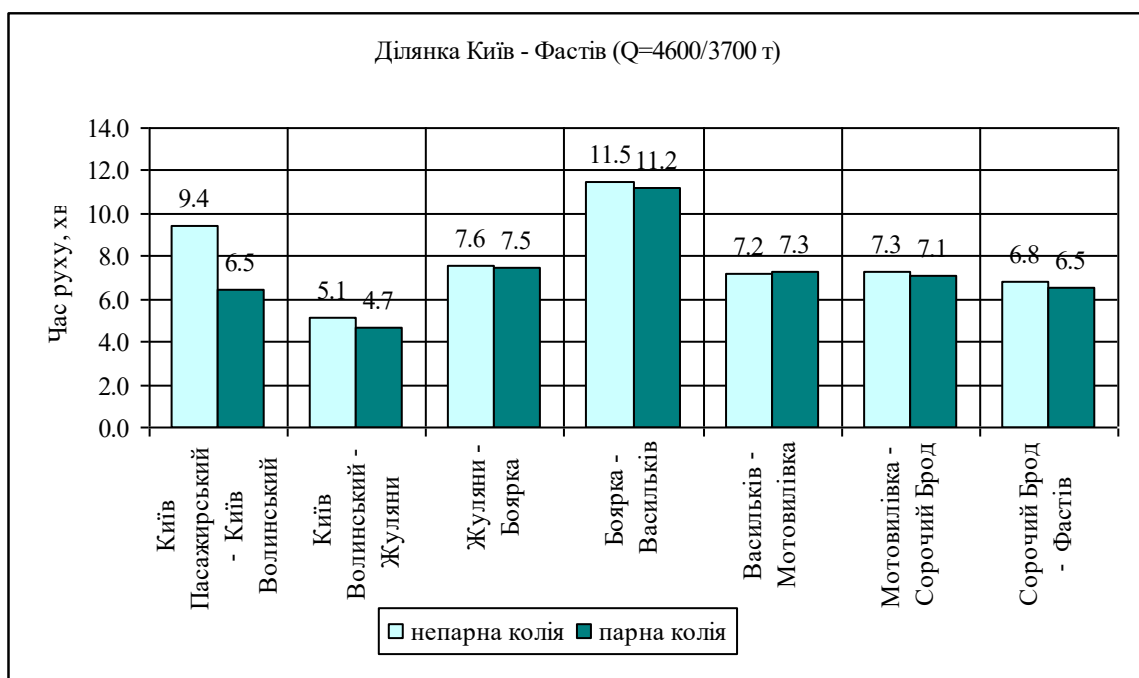


Рисунок 3.11 – Час руху по перегонам

Результати тягових розрахунків для пасажирського та вантажного руху поїздів на ділянці Київ – Фастів показали, що умови руху істотно залежать від типу поїзда, маси складу та параметрів плану і поздовжнього профілю колії.

Пасажирські поїзди характеризуються вищими середньоходовими швидкостями та меншими витратами електроенергії на одиницю довжини, що обумовлено меншою масою та інтенсивнішими режимами розгону.

Вантажний рух, у свою чергу, супроводжується значно більшими витратами електроенергії та механічною роботою локомотивів, особливо на перегонах із підйомами та несприятливим поєднанням ухилів і кривих плану колії. Виявлені відмінності між парним і непарним напрямками руху пояснюються асиметрією поздовжнього профілю та впливом спусків і підйомів на режими тяги і гальмування.

Загалом результати свідчать, що поздовжній профіль ділянки не є критичним обмеженням для організації руху поїздів, тоді як основний вплив на швидкісні та енергетичні показники мають параметри плану колії, зокрема криві малих і середніх радіусів. Отримані результати тягових розрахунків підтверджують доцільність подальшого аналізу перебудови кривих при підвищенні проєктної швидкості руху та слугують основою для економічного обґрунтування реконструкції ділянки Київ – Фастів.

3.4 Варіанти підвищення швидкості руху на ділянці

Для можливості реалізації максимальної швидкості необхідно вирішити низку питань, в тому числі, чи є достатньою потужність локомотивів при існуючих масах рухомого складу, чи є достатньою довжина перегонів для розгону поїзда і який повинен бути рівень швидкості при проходженні станцій.

Для досягнення підвищення швидкості на ділянці Київ – Фастів були виконані варіантні тягові розрахунки для пасажирського поїзду масою $Q=1000$ тонн з локомотивом ЧС4 відповідно для максимальної швидкості до 140 км/год і до 160 км/год за умови повного використання розрахункової сили тяги локомотива з метою найбільш повної реалізації допустимих швидкостей встановлених наказом начальника залізниці.

Бар'єрні місця на залізничних ділянках істотно впливають на швидкість руху, енерговитрати та пропускну спроможність і є одним із ключових стримувальних факторів ефективної експлуатації інфраструктури. Результати

тягових розрахунків показали, що усунення бар'єрних місць забезпечує зростання середньоходової швидкості, скорочення часу руху поїздів і зменшення витрат електроенергії.

В таблиці 3.3 наведені результати розрахунків для пасажирського руху для варіанти усунення обмеження по станціям та перегонам.

Таблиця 3.3 – Варіантні тягові розрахунки для пасажирського рухомого складу

Швидкість по станціям і перегонам		V _{max} , км/год	V _{ср} , км/год	Витрати електроенергії кВт*год	Механ робота , 10 кНкм	Робота гальмівних сил 10кНкм	Час руху, хв
$\frac{80}{120}$	непарна	120	89	2710,6	624,75	231,93	46,4
	парна	120	88	2024,4	470,71	293,02	46,7
$\frac{100}{140}$	непарна	140	100	2835,7	666,12	232,13	41,1
	парна	140	99	2139,1	509,26	289,84	41,5
$\frac{100}{160}$	непарна	160	100	2975,9	701,78	268,69	41,3
	парна	155	99	2172,1	517,74	301,09	41,8
$\frac{120}{140}$	непарна	140	107	2693,6	638,12	179,24	38,6
	парна	140	106	2014,9	484,32	240,15	38,9
$\frac{120}{160}$	непарна	160	107	2867,6	682,65	221,7	38,6
	парна	159	106	2102,3	507,09	262,1	38,9

На рисунках 3.12 – 3.14 графіки середньоходової швидкості, часу руху та витрати електроенергії для пасажирського руху.

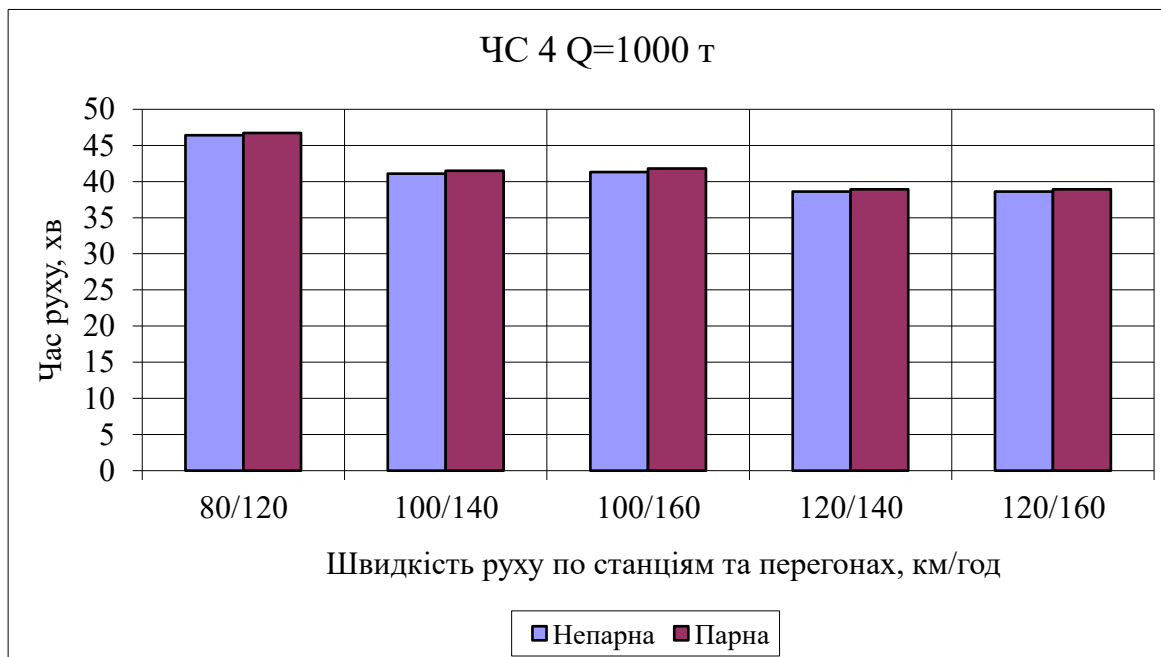


Рисунок 3.12– Час руху пасажирського поїзда

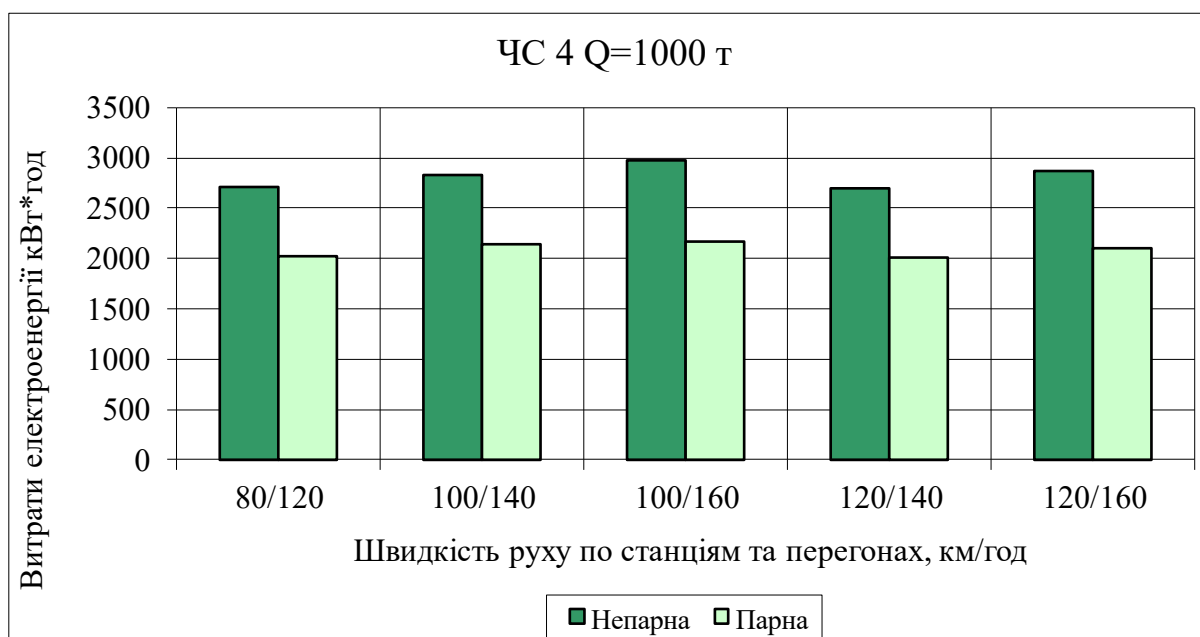


Рисунок 3.13 – Витрата електроенергії пасажирського поїзда

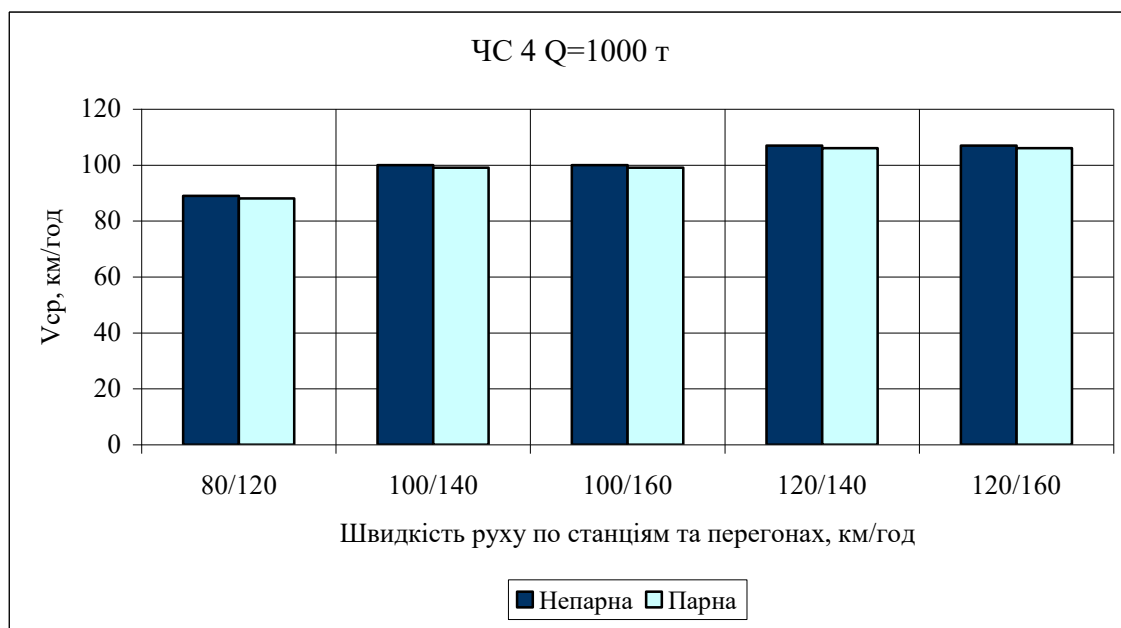


Рисунок 3.14 – Середньоходова швидкість пасажирського поїзда

Аналогічно виконувались розрахунки для вантажного руху. Результати наведені у таблиці 3.4

Таблиця 3.4 – Результати тягових розрахунків для поїзда з масою 4600/3600 т

Швидкість по станціям і перегонам		V _{max} , км/год	V _{ср} , км/год	Витрати електро-енергії кВт·год	Механ робота, 10 кН·км	Робота гальмівних сил, 10кН·км	Час руху, хв
$\frac{60}{80}$	непарний	80	65	4994,	1378,64	290,2	63,1
	парний	80	64	2264,2	629,31	550,47	64
$\frac{80}{80}$	непарний	80	70	4956,5	1378,07	266,37	58,3
	парний	80	75	1855,7	521,26	393,22	55,1
$\frac{80}{90}$	непарний	90	73	5357,8	1497,05	358,53	56,3
	парний	90	78	2184,6	617,77	471,1	52,9
$\frac{80}{100}$	непарний	100	76	4465,3	1254,15	331,89	54
	парний	100	79	2373,2	673,2	517,22	52,3

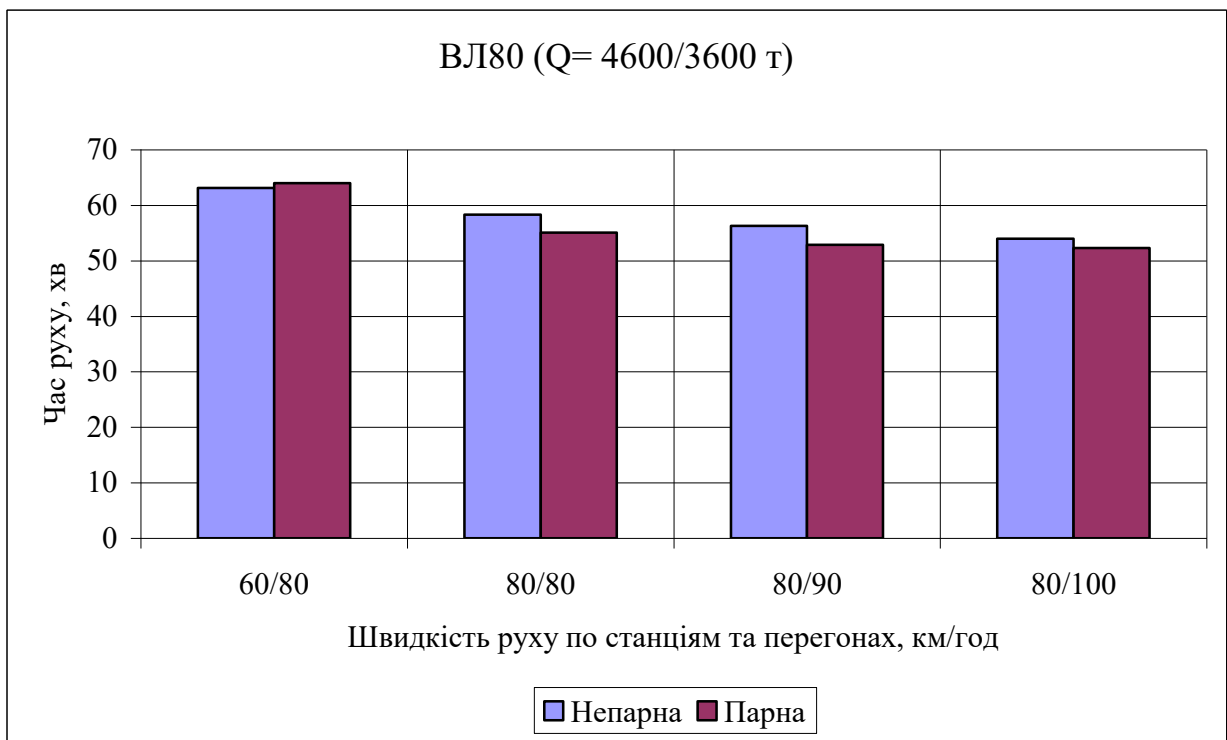


Рисунок 3.15 – Час руху вантажного поїзда з масою 4600/3600 т

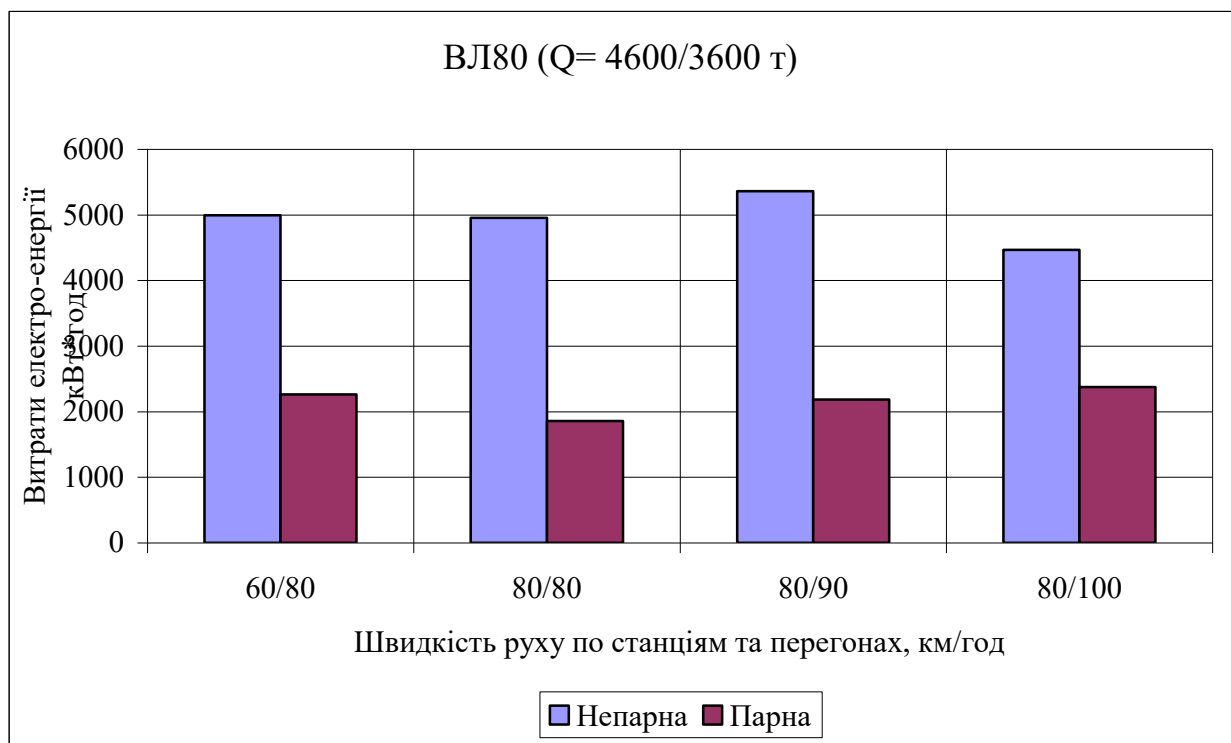


Рисунок 3.16 – Витрати електроенергії вантажного поїзда з масою 4600/3600 т

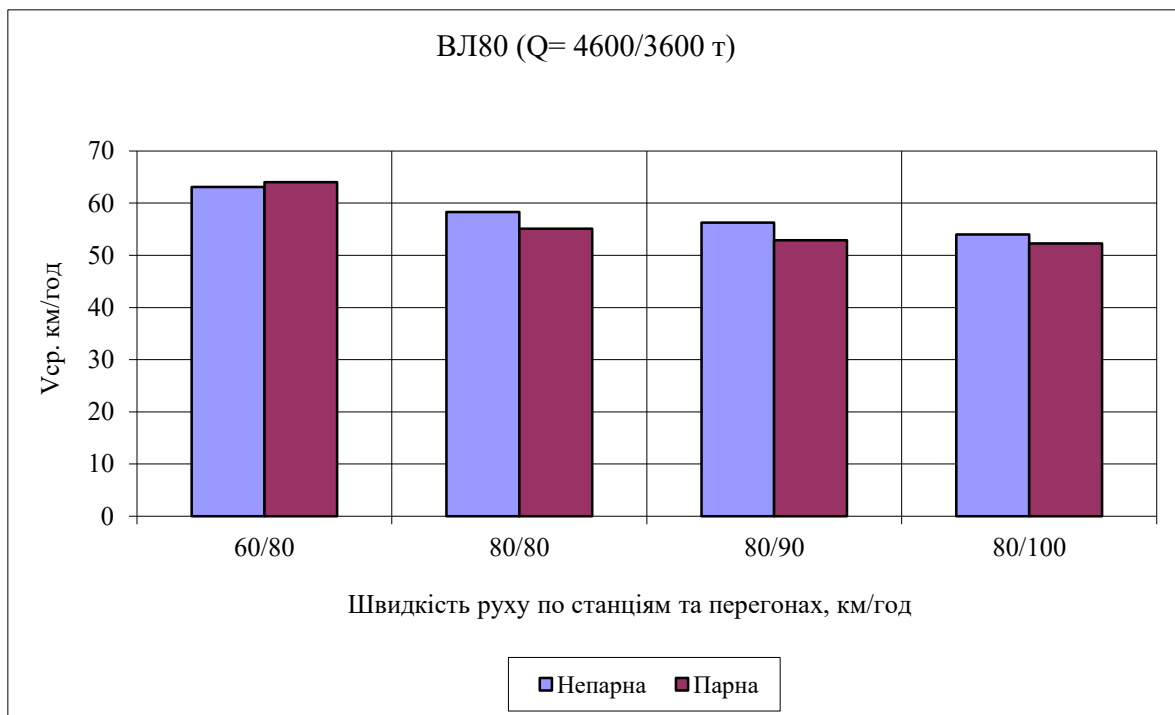


Рисунок 3.17 – Середньоходова швидкість вантажного поїзда з масою 4600/3600 т

Аналіз рисунків 3.15 – 3.17 показав, що після реконструкції на ділянці Київ – Фастів максимально допустима швидкість в діапазоні 120-140 км/год реалізується на 12.12%, в діапазона 140-160 км/год – 10.1%.

Таким чином, підвищення швидкості до 160 км/год необхідно розглянути перебудову кривих, які обмежують швидкість руху.

4 РЕКОНСТРУКЦІЯ ПЛАНУ ЗАЛІЗНИЦІ

4.1 Визначення максимально допустимих швидкостей руху в кривих

У процесі експлуатації залізничних ліній швидкість руху поїздів найчастіше обмежується параметрами кругових кривих. Допустимі швидкості руху поїздів у кривих ділянках колії встановлюються за умови забезпечення плавності ходу, безпеки руху та комфорту перевезення пасажирів. При цьому за допустиму швидкість в експлуатації приймається найменша з можливих, визначена з урахуванням геометричних параметрів кривих, величини підвищення зовнішньої рейки, допустимого непогашеного відцентрового прискорення та умов взаємодії колії і рухомого складу.

Розглядаються обмеження швидкості руху в кругових кривих, що мають перехідні криві, а також у кривих без перехідних кривих, для яких умови руху є менш сприятливими. Наявність перехідних кривих забезпечує поступову зміну кривизни та підвищення рейки, що дозволяє реалізувати вищі допустимі швидкості руху.

Відповідно до вимог ЦП-0236 [11] були визначені допустимі швидкості руху поїздів у кривих ділянках колії залежно від геометричних параметрів кривих та наявності перехідних кривих. Розрахунок допустимої швидкості руху виконується за нормативною залежністю:

$$V = 3,6 \cdot \sqrt{\left(R \left([\alpha_{Hn}] + \frac{(g \cdot h)}{S} \right) \right)} \quad (4.1)$$

Нижче наведено приклад розрахунку допустимої швидкості руху для одиночної кругової кривої, зображеної на рисунку 4.1.

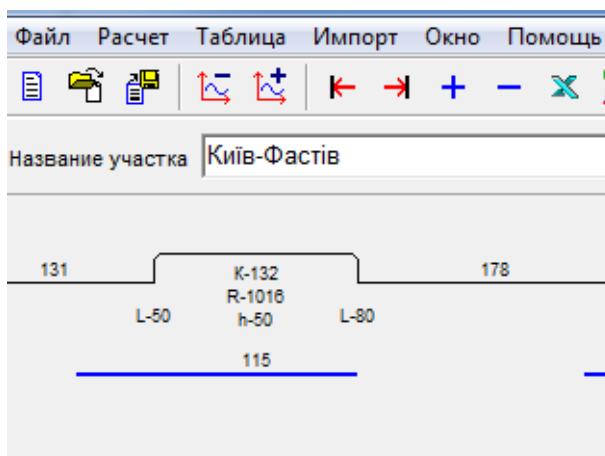


Рисунок 4.1 – Поодинокі крива

Допустима швидкість руху визначається за формулою (4.1):

$$V = 3,6 \cdot \sqrt{\left(R \left([\alpha_{Hn}] + \frac{(g \cdot h)}{S} \right) \right)} = 3,6 \cdot \sqrt{\left(1016 \cdot \left([0,7] + \frac{(9,81 \cdot 50)}{1600} \right) \right)} = 115 \text{ км/год}$$

n	L	R	K	h	i	НП	Va	Vk	Val2	Val1	НП2	VaП	НПС	VaS	Va2	max	Vгд
	50				1		124	120									
1		-1016	132	50		115										115	
	80				0,6		142	160									

Рисунок 4.2 – Визначення допустимої швидкості (RWPlan)

Необхідно визначити допустиму швидкість руху поїздів у сполученні кругових кривих, спрямованих в одну сторону, яке зображене на рисунку 4.3. Досліджувана складова крива розташована на 851–852 км дільниці Київ – Фастів і характеризується послідовним розташуванням кількох кругових кривих різних радіусів із перехідними та прямими вставками між ними.

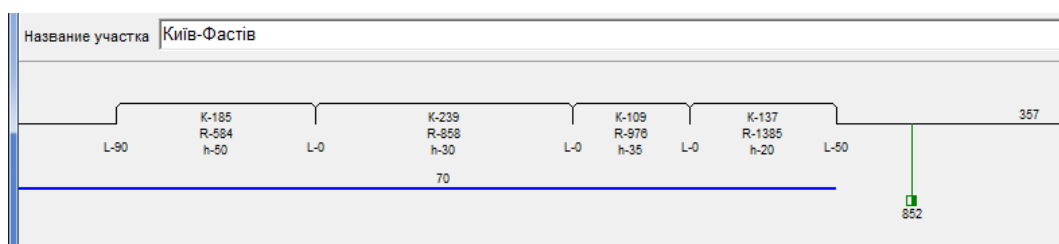


Рисунок 4.3 – Складова крива на 851 – 852 км

Для визначення допустимої швидкості руху в складових кривих

використовується методика, викладена в ЦП-0236, яка реалізована в програмному комплексі RWPlan. Особливістю цієї методики є врахування взаємного впливу суміжних кривих, величин підвищення зовнішньої рейки, довжин перехідних кривих та обмежень за непогашеним відцентровим прискоренням.

Допустима швидкість руху в складовій кривій визначається за найменшою допустимою швидкістю з усіх елементів сполучення, оскільки саме вона є визначальною для безпеки та плавності руху поїздів. Такий підхід відповідає нормативним вимогам і відображає реальні умови експлуатації залізничної колії.

Результати розрахунку допустимої швидкості руху для кожного елемента складової кривої наведені на рисунку 4.4. Аналіз отриманих даних показує, що визначальною є крива з найменшим радіусом, для якої допустима швидкість руху є мінімальною. Саме це значення приймається як допустима швидкість руху для всієї складової кривої.

Отримане значення допустимої швидкості використовується для подальшого аналізу відповідності фактичних швидкостей руху нормативним вимогам, а також для обґрунтування необхідності реконструкції плану колії з метою підвищення швидкості руху на досліджуваній ділянці.

Таблиця 4.4 – Допустимі швидкості для розглянутого прикладу

n	L	R	K	h	i	HP	Va	Vk	VaL2	VaL1	HP2	VaП	HP3	VaS	Va2	max	Vrp
1	90	-584	185	50	0,6	87	121	160								73	
2	0	-858	239	30	**	99		110			73				88	99	
3	0	-976	109	35	**	108		160							144	108	
4	0	-1385	137	20	**	122		120							128	120	
5	50				0,4	131	160										

Рисунок 4.4 – Визначення допустимої швидкості

Найменша допустима швидкість у розглянутому прикладі – 73 км/год.

Завдяки розробленому програмному забезпеченню MoveRW, RWPlan розрахунки виконуються автоматично. Розрахунок допустимих швидкостей для ділянки Київ – Фастів наведені у додатку В.

4.2 Технологія розрахунку об'ємів та вартості робіт при перебудові плану лінії

Ефективність проєктних рішень значною мірою визначає якість проєкту в цілому та доцільність його реалізації. При реконструкції плану залізничної лінії вибір оптимального варіанта перебудови кривих здійснюється на основі системи техніко-економічних показників, які комплексно характеризують кількісні та якісні властивості проєктних рішень. Сукупність цих показників дозволяє об'єктивно оцінити доцільність перебудови кривих та економічну ефективність реалізації проєкту.

Оцінювання ефективності проєктних рішень виконується з використанням показників загальної та порівняльної ефективності інвестиційних витрат. До показників загальної ефективності належать чистий дисконтований дохід, індекс прибутковості, внутрішня норма дохідності та строк окупності інвестицій. До порівняльних показників відносять порівняльний інтегральний ефект, приведені будівельно-експлуатаційні витрати, а також строк окупності додаткових капіталовкладень.

Інвестиційні витрати при реконструкції залізничної інфраструктури виступають у формі капіталовкладень, які включають витрати на виконання комплексу робіт з перебудови плану колії. До складу таких робіт належать земляні роботи, переукладання верхньої будови колії, коригування параметрів перехідних і кругових кривих, а також супутні роботи, пов'язані з відновленням інженерних елементів інфраструктури.

Розрахунок об'ємів і вартості робіт з перебудови кривих виконується з використанням програмного комплексу RWPlan, який реалізує методику, що передбачає врахування геометричних параметрів існуючих і проєктних кривих, величин зсуву осі колії та змін параметрів плану. На основі отриманих об'ємів робіт за нормативними показниками визначається вартість перебудови кривих для кожного варіанта реконструкції, яка розраховується за формулою (4.1) [15].

$$K = \sum_{i=1}^{i=4} a_i l_i + \sum_{i=5}^{i=7} a_i l_i + \sum_{i=8}^{i=10} a_i Q_i, \quad (4.1)$$

де $a_1, \dots, a_4$ – витрати на зміщення осі існуючої колії відповідно до 60 мм, 61-120 мм, 121-120 мм і більше 250 мм;

$l_1, \dots, l_4$ – довжина ділянок з відповідним діапазоном зсувів;

$a_5, \dots, a_7$ – витрати відповідно на перекладання верхньої будови колії, перенесення контактної мережі, пристроїв СЦБ;

$l_5, \dots, l_7$ – довжина ділянок перекладання колії, перенесення контактної мережі, кабелів СЦБ;

$a_8, \dots, a_{10}$ – вартість 1 м³ баласту, ґрунту для розширення існуючого земляного полотна та ґрунту для відсіпання земляного полотна на новій трасі;

$Q_8, \dots, Q_{10}$ – об'єм баласту, ґрунту для розширення існуючого земляного полотна та ґрунту для відсіпання нового земляного полотна.

Рисунок 4.5 – Алгоритм оцінки витрат

Алгоритм розрахунку вартості перебудови плану колії, що включає послідовність визначення об'ємів робіт, розрахунок капіталовкладень та порівняння варіантів проєктних рішень, наведено на рисунку 4.5. Отримані результати використовуються для подальшого вибору раціонального варіанта реконструкції, який забезпечує підвищення швидкості руху поїздів за мінімально

можливих інвестиційних витрат.

4.3 Вплив максимальної швидкості руху на вартість перебудови кривих

Об'єми та вартість робіт для окремих ділянок залізничної лінії залежно від встановленого рівня максимально допустимої швидкості руху були визначені з використанням програмного комплексу RWPlan. У процесі розрахунків прийнято нормативні параметри, що відповідають вимогам чинних інструктивних документів та методик [14, 15].

Зокрема, у розрахунках використано такі нормативні значення: допустиме непогашене відцентрове прискорення $a_n = 0,7 \text{ м/с}^2$; допустима швидкість зміни поперечного прискорення $\psi = 0,6 \text{ м/с}^3$; швидкість підйому колеса по відводу підвищення зовнішньої рейки – відповідно до таблиці 4.1 ЦП-0236, для швидкості руху 160 км/год прийнято $f_v = 35 \text{ мм/с}$.

З метою оцінки ефективності підвищення швидкості руху в кривих ділянках колії були розглянуті різні варіанти перебудови плану, а саме:

- рихтування кривих на 60 мм – у межах поточного утримання та середніх ремонтів;
- рихтування на 100 мм – при виконанні капітального ремонту;
- рихтування на 200 та 300 мм – капітальний ремонт із перебудовою кривих у межах земляного полотна;
- винос осі траси на 5 та 10 м – перебудова плану в межах смуги відведення.

Окремо розглянуто варіант підвищення швидкості руху до 160 км/год з визначенням необхідної величини зміщення осі траси, що дозволяє оцінити граничні можливості існуючої інфраструктури та обсяги капітальних вкладень.

Для ілюстрації методики розрахунків розглянуто приклад підвищення швидкості руху в межах баластної призми. Як розрахунковий приклад прийнято однорадіусну кругову криву, розташовану на 904 км досліджуваної ділянки. На рисунку 4.6 наведено основні геометричні параметри цієї кривої та відповідні

значення допустимої швидкості руху, визначені за прийнятою методикою.

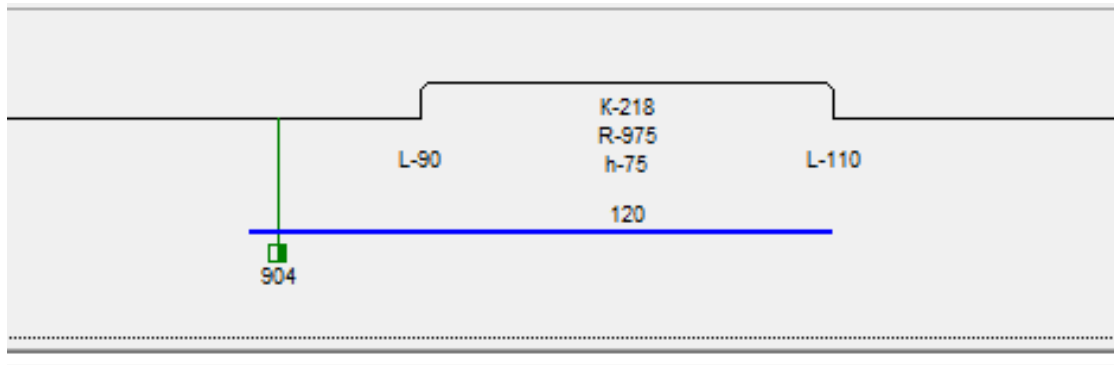


Рисунок 4.6 – Параметри та допустима швидкість існуючої кривої

Розглянемо перший варіант профіль в межах земляного полотна при максимальних зсувах ± 250 мм. Для наявності на рисунку 4.7 наведений поперечних в межах баластної призми.

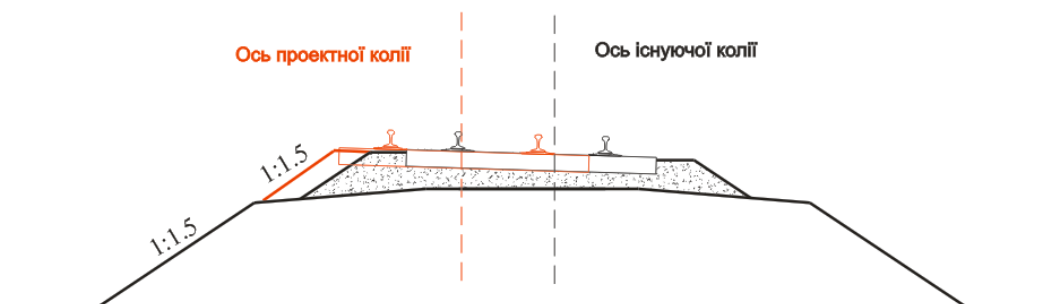


Рисунок 4.7 – Поперечний профіль насипу існуючого та проєктного стану плану колії при рихтуванні в межах земляного полотна

Параметри кривої та максимально допустима швидкість після оптимізації наведені на рисунку 4.8.

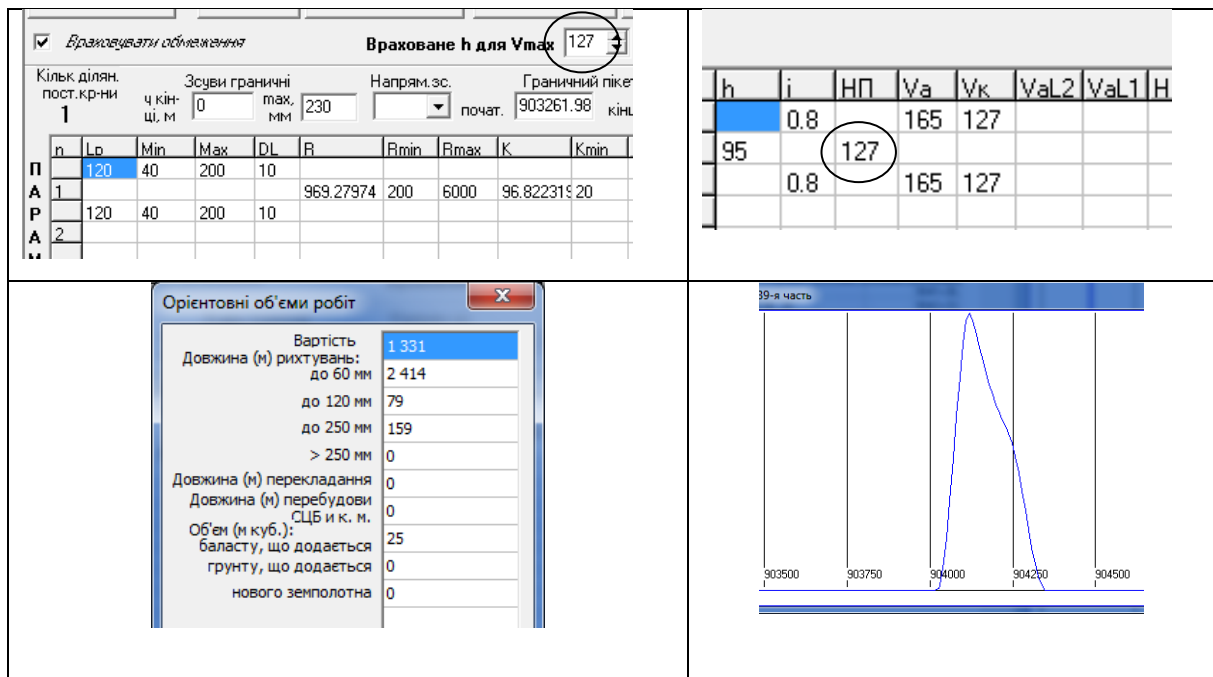


Рисунок 4.8 – Параметри кривої, допустима швидкість, зсуви та орієнтовна вартість робіт (варіант 1)

Розглянемо другий варіант підвищення швидкості руху при рихтуванні в межах земляного полотна > 300 мм (рисунок 4.7)

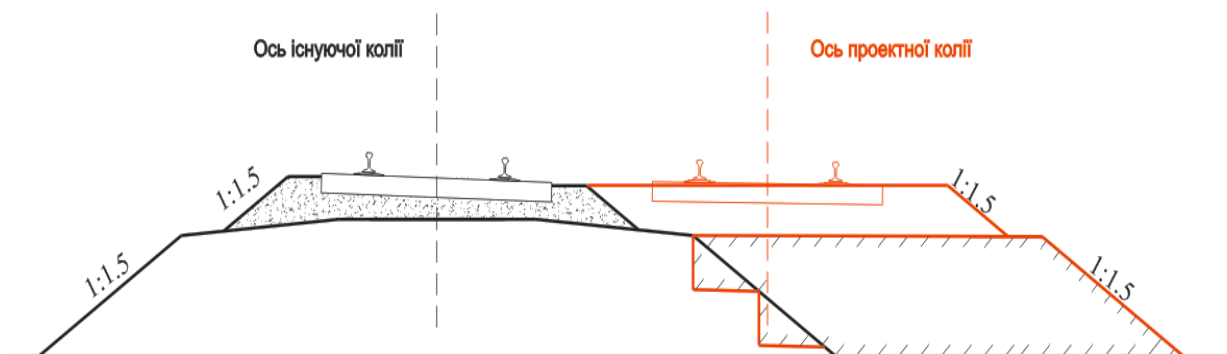


Рисунок 4.7 – Поперечний профіль насипу існуючого та проектного стану плану колії при рихтуванні з розширенням земляного полотна

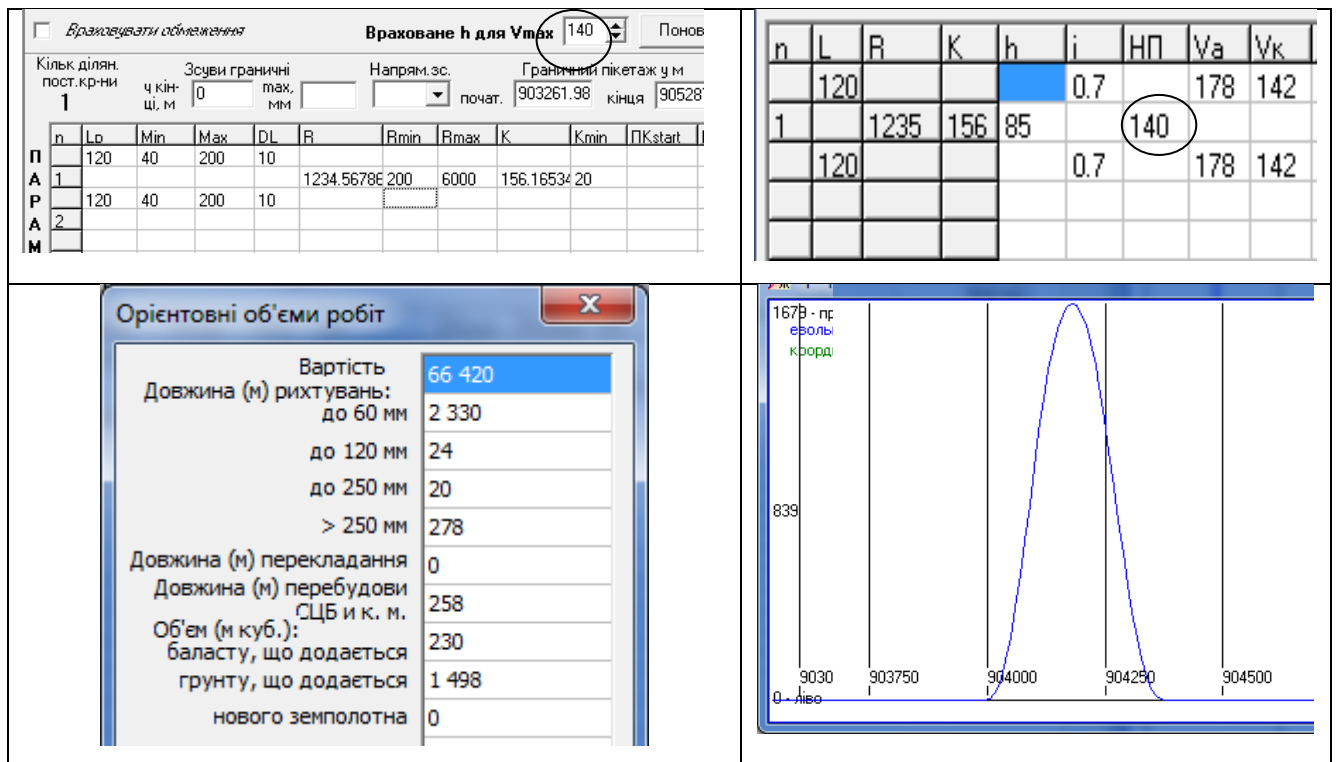


Рисунок 4.8 – Параметри кривої, допустима швидкість, зсуви та орієнтовна вартість робіт (варіант 2)

Розглянемо третій варіант підвищення швидкості руху при винос траси в межах смуги відведення (5 та 10 м).

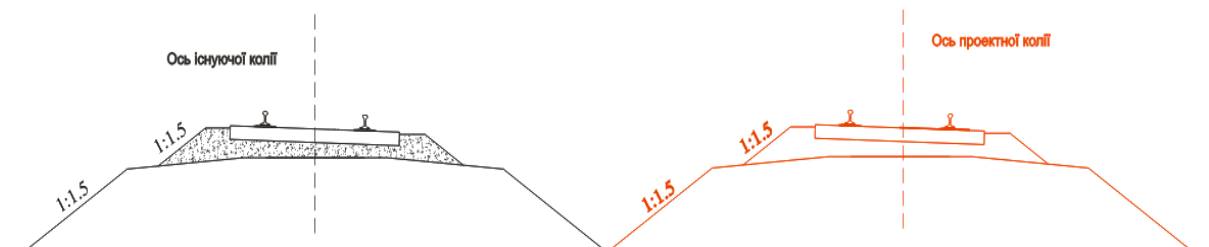


Рисунок 4.9 – Поперечний профіль насипу існуючого та проектного стану плану колії при рихтуванні з виносом траси в межах смуги відведення

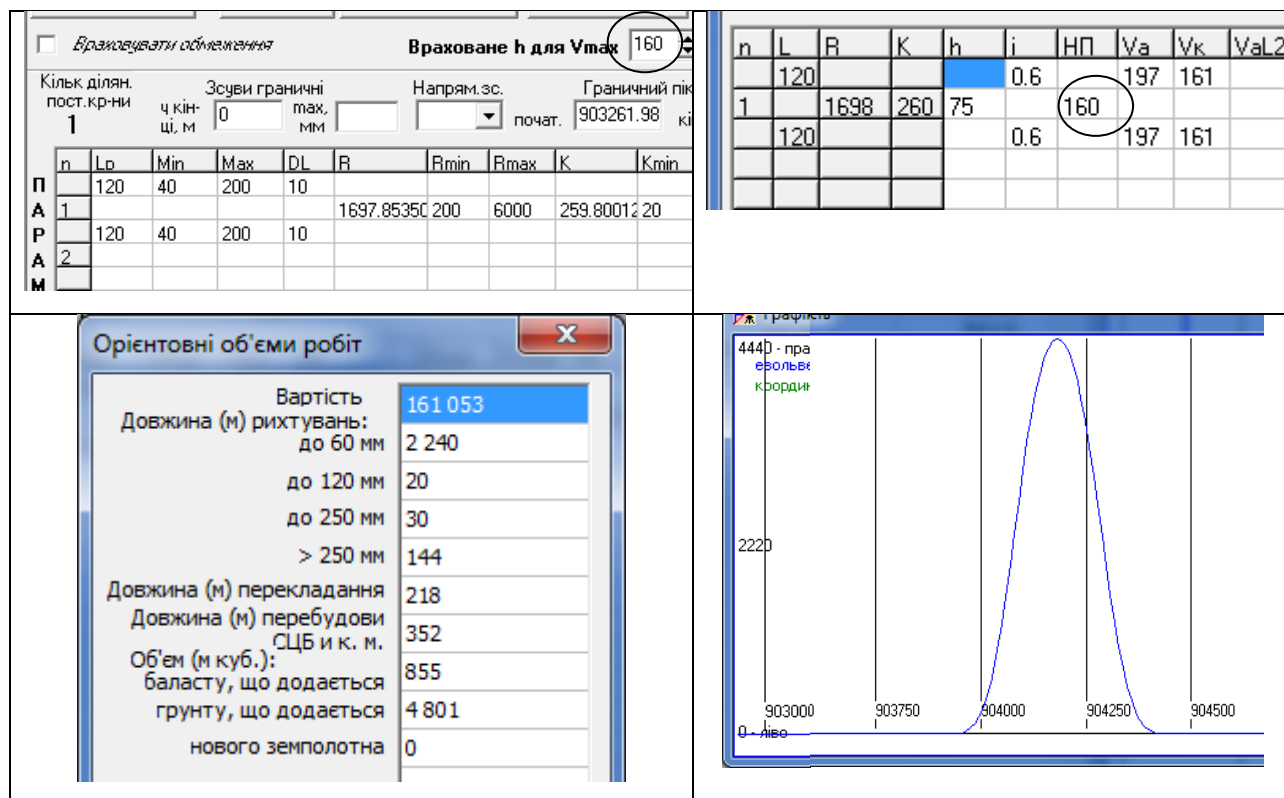


Рисунок 4.10 – Параметри кривої, допустима швидкість, зсуви та орієнтовна вартість робіт (варіант 3)

Таблиця 4.1 – Порівняння варіантів перебудови (V – зсув – вартість)

Варіант	Vдоп після перебудови, км/год	Характер (рівень) зсуву осі траси	Вартість робіт (RWPlan), у.о.
1. Рихтування в межах земляного полотна (обмежені зсуви)	127	до 200 мм	1 331
2. Посилене рихтування / перебудова (є зсуви понад 250 мм)	140	місцями > 250 мм	66 420
3. Винос траси в межах смуги відведення (капітальна перебудова)	160 (для сценарію підвищення до 160 км/год)	5–10 м	151 053

Порівняння варіантів показує нелінійне зростання вартості зі збільшенням допустимої швидкості та величини зсуву осі траси: від 1 331 у.о.

($V_{\text{доп}} \approx 127$ км/год, зсуви до 200 мм) до 66 420 у.о. ($V_{\text{доп}} \approx 140$ км/год, наявні зсуви понад 250 мм) і до 151 053 у.о. при капітальній перебудові з виносом траси для досягнення швидкості 160 км/год. Отже, з позицій співвідношення «результат/витрати» найбільш раціональним є варіант, що забезпечує підвищення швидкості в межах допустимих зсувів без масштабного виносу траси, тоді як варіант із виносом траси доцільний у разі реалізації довгострокових програм розвитку з пріоритетом максимальних швидкісних параметрів.

4.4 Ефективність від збільшення швидкості

Виконані розрахунки показують, що спроби підвищення швидкості руху поїздів до 160 км/год за рахунок виносу осі колії в межах смуги відведення не забезпечують суттєвого ефекту порівняно з варіантами рихтування колії в межах основної площадки земляного полотна. При цьому значне зростання обсягів та вартості робіт не супроводжується пропорційним скороченням часу ходу поїздів.

Дещо неочікуваним результатом розрахунків є те, що виграш у часі руху при рихтуванні колії в межах земляного полотна для кривих із великими радіусами виявився більшим, ніж для кривих малих радіусів. Це пояснюється тим, що на кривих із великими радіусами обмеження швидкості є менш жорсткими, а усунення локальних відхилень плану дозволяє повніше реалізувати потенціал швидкісного руху (див. додаток ...).

Результати розрахунків також наочно свідчать, що при проектуванні ремонтів колії суттєвого виграшу в часі руху можна досягти насамперед за рахунок виконання вимог ЦП-113 (пп. 2.3.2–2.3.4) [17], які передбачають виправлення кривих у плані з відновленням проектних радіусів та укладанням колії в проектне положення під час капітального ремонту.

При рихтуванні колії на величину, що перевищує 60 мм, виникають додаткові обсяги робіт, пов'язані з перенесенням контактної мережі, досипкою та перерозподілом баласту, а також коригуванням елементів земляного полотна. Такі додаткові витрати можуть бути достатньо точно визначені шляхом розрахунків перебудови плану лінії з використанням програмного комплексу

RWPlan, що підтверджує доцільність його застосування для техніко-економічного обґрунтування проєктних рішень.

Слід також відзначити, що в ряді випадків при визначенні нових параметрів плану колії для підвищених швидкостей були отримані рішення, за яких радіус кругової кривої зменшувався, але довжина перехідної кривої збільшувалася. Такі рішення дозволяють дотриматися нормативних вимог до динаміки руху поїздів, однак не завжди забезпечують істотне зменшення часу ходу.

На підставі проведеного аналізу можна сформулювати такі узагальнені висновки:

1) проведений аналіз параметрів кривих підтвердив необхідність розробки та застосування методики перебудови кривих і визначення вартості робіт при підвищенні швидкостей руху;

2) при проєктуванні ремонтів колії найбільш ефективним з точки зору співвідношення «витрати – результат» є укладання колії в нове проєктне положення в межах земляного полотна;

3) підвищення швидкості руху до 160 км/год шляхом зміщення осі колії в межах смуги відведення не забезпечує пропорційного економічного ефекту, оскільки витрати на перебудову кривих у більшості випадків не окупаються в межах нормативного строку, а іноді не окупаються взагалі;

4) при підвищенні швидкості руху на бар'єрних місцях ефект скорочення часу ходу зменшується зі зростанням швидкості, що свідчить про наявність граничного економічно доцільного рівня підвищення швидкості.

5 ОХОРОНА ПРАЦІ ПРИ ВИКОНАННІ РОБІТ З РЕКОНСТРУКЦІЇ ПЛАНУ КОЛІЇ

Охорона праці при виконанні робіт з реконструкції плану залізничної колії спрямована на забезпечення безпечних і нешкідливих умов праці, запобігання виробничому травматизму та професійним захворюванням. Роботи з рихтування, перебудови кривих, переукладання колії та коригування земляного полотна належать до робіт підвищеної небезпеки, оскільки виконуються в умовах діючої залізничної інфраструктури, наявності рухомого складу та контактної мережі.

Організація охорони праці під час виконання зазначених робіт здійснюється відповідно до вимог Закону України «Про охорону праці», Правил безпеки під час виконання колійних робіт на залізничному транспорті, Інструкції з утримання колії залізниць України (ЦП-113), а також чинних НПАОП та галузевих нормативних документів АТ «Укрзалізниця».

Аналіз небезпечних і шкідливих виробничих факторів

Під час виконання робіт з реконструкції плану колії на працівників можуть впливати такі небезпечні та шкідливі виробничі фактори, визначені відповідно до вимог НПАОП 60.1-1.01-10:

- рух поїздів по суміжних коліях;
- ураження електричним струмом від контактної мережі;
- травмування рухомими частинами колійних машин і механізмів;
- обвалення ґрунту у виїмках та на укосах насипів;
- падіння з висоти або на нерівній поверхні;
- підвищений рівень шуму та вібрації;
- запиленість повітря під час баластних і земляних робіт;
- несприятливі метеорологічні умови.

Організація безпечного виконання робіт

Для забезпечення безпечних умов праці перед початком робіт необхідно виконати організаційні заходи, передбачені НПАОП 60.1-1.01-10 та галузовими правилами, а саме:

- розробити проєкт організації робіт (ПОР) із розділом «Охорона праці»;
- визначити межі робочої зони та встановити сигнальне огородження;
- призначити відповідальних осіб за безпечне виконання робіт;
- провести вступний, первинний та цільовий інструктажі;
- погодити графік робіт з поїзним диспетчером і черговими по станціях;
- забезпечити постійний зв'язок між керівником робіт та членами бригади.

Роботи в зоні руху поїздів виконуються за встановленими «вікнами» або з обмеженням руху відповідно до чинних правил безпеки.

Вимоги безпеки при роботі поблизу контактної мережі

Під час виконання робіт поблизу контактної мережі необхідно суворо дотримуватися встановлених безпечних відстаней до струмовідних частин, визначених Правилами безпечної експлуатації електроустановок споживачів (НПАОП 40.1-1.21-98).

- зняття напруги з контактної мережі;
- заземлення контактної мережі;
- оформлення наряду-допуску;
- контроль з боку відповідальної електротехнічної служби.

Забороняється виконувати роботи без відповідного дозволу та заземлення контактної мережі.

Працівники, задіяні у виконанні робіт з реконструкції плану колії, повинні бути забезпечені засобами індивідуального захисту відповідно до вимог НПАОП 60.1-1.01-10, а саме: Працівники, задіяні у виконанні робіт, повинні бути забезпечені:

- сигнальним спецодягом підвищеної видимості;
- захисними касками та спецвзуттям;
- рукавицями, захисними окулярами;
- засобами захисту органів слуху та дихання;
- справним та сертифікованим інструментом.

Місця виконання робіт повинні бути оснащені попереджувальними

знаками, сигнальними ліхтарями та засобами зв'язку.

Вимоги безпеки при виконанні земляних і колійних робіт

Під час виконання земляних робіт необхідно постійно контролювати стан укосів виїмок і насипів та не допускати перебування працівників у зоні можливого обвалення ґрунту, що відповідає вимогам ДБН А.3.2-2-2009. Забороняється виконувати роботи під час сильних опадів або при нестійкому стані ґрунтів.

При рихтуванні та переукладанні колії всі переміщення колійних машин повинні здійснюватися за командами відповідальних осіб, а перебування людей у небезпечній зоні роботи механізмів не допускається.

Пожежна безпека та дії в аварійних ситуаціях

Під час виконання робіт необхідно дотримуватися вимог пожежної безпеки, зокрема:

- забороняється використання відкритого вогню без спеціального дозволу;
- місця виконання робіт повинні бути забезпечені первинними засобами пожежогасіння;
- працівники повинні бути проінструктовані щодо дій у разі виникнення аварійної ситуації або пожежі.

У разі виникнення нещасного випадку роботи негайно припиняються, надається перша медична допомога та повідомляються відповідні служби.

Пожежна безпека та дії в аварійних ситуаціях

Під час виконання робіт необхідно дотримуватися вимог Правил пожежної безпеки в Україні (НАПБ А.01.001-2014). Зокрема:

- забороняється використання відкритого вогню без спеціального дозволу;
-
- місця виконання робіт повинні бути забезпечені первинними засобами пожежогасіння;
- працівники повинні бути проінструктовані щодо порядку дій у разі

виникнення аварійної ситуації або пожежі.

У разі виникнення нещасного випадку роботи негайно припиняються, потерпілому надається перша медична допомога та повідомляються відповідні служби згідно з установленим порядком.

Комплексне дотримання організаційних, технічних та санітарно-гігієнічних заходів з охорони праці під час виконання робіт з реконструкції плану залізничної колії, передбачених чинними нормативними документами, дозволяє суттєво знизити рівень виробничих ризиків, забезпечити безпеку працівників та безперервність виробничого процесу. Реалізація зазначених заходів є обов'язковою умовою якісного й безпечного виконання робіт на ділянці.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У магістерській роботі було поставлено та вирішено комплекс взаємопов'язаних науково-практичних завдань, спрямованих на оцінювання впливу підвищення швидкості руху поїздів на обсяги та вартість перебудови кривих при реконструкції ділянки залізниці Київ – Фастів. На основі виконаних розрахунків, моделювання та техніко-економічного аналізу отримано такі основні висновки:

1. Проведений аналіз плану колії показав, що частка кривих на досліджуваній ділянці становить близько 11%, при цьому приблизно половина з них є бар'єрними та обмежує реалізацію підвищених швидкостей руху. Для таких кривих необхідне коригування параметрів перехідних кривих, величин підвищення зовнішньої рейки та, у ряді випадків, збільшення радіусів.

2. За результатами коригування геометричних параметрів кривих встановлено, що максимально допустима швидкість руху в діапазоні 120–140 км/год може бути реалізована на 12,1% довжини дільниці, тоді як швидкості в діапазоні 140–160 км/год – лише на 10,1%, що свідчить про обмежені можливості підвищення швидкості без суттєвої перебудови плану колії.

3. Виконані тягові розрахунки підтвердили, що поздовжній профіль дільниці не є визначальним фактором обмеження швидкості руху, а основний вплив на швидкісні та експлуатаційні показники мають параметри плану колії, зокрема криві малих і середніх радіусів.

4. Техніко-економічний аналіз показав, що найбільш ефективний виграш у часі руху поїздів досягається при укладанні колії в нове проєктне положення в межах земляного полотна, без масштабного виносу осі траси. Такий підхід забезпечує оптимальне співвідношення між досягнутим підвищенням швидкості та обсягами інвестиційних витрат.

5. Підвищення швидкості руху до 160 км/год шляхом зміщення осі колії в межах смуги відведення супроводжується різким зростанням вартості робіт і не забезпечує пропорційного економічного ефекту порівняно з рихтуванням колії в межах основної площадки земляного полотна. Витрати на перебудову

кривих у цьому випадку, як правило, не окупаються в межах нормативного строку, а в окремих випадках є економічно недоцільними.

6. Загалом встановлено, що ефект скорочення часу ходу поїздів при підвищенні швидкості зменшується зі зростанням рівня швидкості, що свідчить про наявність граничного економічно доцільного рівня підвищення швидкості руху для конкретних умов дільниці.

Отримані результати можуть бути використані при проектуванні ремонтів і реконструкції залізничних ліній для обґрунтованого вибору раціональних параметрів плану колії, а також при розробці програм підвищення швидкості руху з урахуванням економічної ефективності інвестиційних рішень.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Курган М. Б., Курган Д. М., Байдак С. Ю., Хмелевська Н. П., Новік Р. Б. (2021). Зменшення інтенсивності залізничних порушень завдяки покращенню параметрів плану ліній під час паспортизації кривих. Наука та транспортний прогрес, №6(96), 53–64. <https://doi.org/10.15802/stp2021/257933>
2. Курган М. Б., Курган Д. М., Хмелевська Н. П. Оптимізація кривих на плані за допомогою комп'ютерного моделювання для підвищення безпеки руху поїздів. Наука та транспортний прогрес, №4 (108), 46–54. <https://doi.org/10.15802/stp2024/318057>
3. Esveld, C. (2001). *Modern Railway Track* (2nd ed.). MRT-Productions. Retrieved from https://www.esveld.com/Documents/MRT_Selection.pdf?utm_source=chatgpt.com
4. de Melo, A. L. O., Kaewunruen, S., Papaelias, M., Bernucci, L. L. B., & Motta, R. (2020). *Methods to monitor and evaluate the deterioration of track and its components in a railway in-service: A systemic review. Frontiers in Built Environment*, 6. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2020.00118>
5. Курган М. Б., Курган Д. М., Байдак С. Ю., Хмелевська Н. П. Дослідження впливу стану залізничної колії в плані на плавність і безпеку руху поїздів. Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті. 2017. № 14. С. 94–101. DOI: <https://doi.org/10.18664/ikszt.v0i1.126040>
6. Курган М. Б. Методика визначення допустимих швидкостей руху поїздів на складних ділянках плану залізниці / М. Б. Курган, Д. М. Курган, Н. П. Хмелевська, С. Ю. Байдак // Наука та прогрес транспорту. - 2014. - № 2. - С. 83-94. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/vdnuzt_2014_2_11.
7. Kurhan, M., Kurhan, D., Novik, R., Baydak, S. & Hmelevska, N. (2020). Improvement of the railway track efficiency by minimizing the rail wear in curves. IOP Conf. Ser.: Materials Science and Engineering, 985, 165475. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/985/1/012001>
8. Ткаченко В. Динамічна взаємодія рухомого складу і колії на лініях швидкісного руху суміщеного з вантажним: монографія / В. Ткаченко, С.

Сапронова, Н. Брайковська, В. Твердомед. – Вінниця: ГО «Європейська наукова платформа», 2021. – 240 с. DOI 10.36074/dvrsklshrsv-monograph.2021

9. Твердомед В. М. Якісна оцінка стану рейкової колії при взаємодії з рухомим складом [Електронний ресурс] / В. М. Твердомед // Залізничний транспорт України. - 2022. - № 4. - С. 39-48. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/ZTU_2022_4_7

10. ДБН В.2.3-19:2025 Залізниці колії 1520 мм. Норми проектування / затв.:– К.: Мінрегіонбуд, 2025. – 131 с.

11. Наказ «Про встановлення максимально допустимих швидкостей руху поїздів на ділянках колії Південно-Західної залізниці» від №188/Н від 16.05.2022:/затв. начальник залізниці / Державна адміністрація залізничного транспорту України. – О., 2022. – 112 с.

12. 12

13. Корженевич І. П. Нові можливості проектування перебудови плану та виправлення кривих при використанні програми RWPlan 1.2. Залізничний транспорт України. 2007. № 5. С. 79-82

14. Правила визначення підвищення зовнішньої рейки і встановлення допустимих швидкостей в кривих ділянках колії: ЦП-0236: затв. наказом Укрзалізниці від 14.12.2010 №778-Ц. – Київ, 2010. 52 с

15. Курган М. Б. Визначення об'ємів робіт для зняття обмежень швидкості, пов'язаних з планом лінії [Текст] / М. Б. Курган І. П. Корженевич, Н. П. Хмелевська // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д.: Вид-во ДНУЗТ, – 2012 – № 41.

16. Курган М. Б. Визначення раціональних параметрів залізничних кривих для заданого рівня максимальної швидкості / М. Б. Курган, С. Ю. Байдак, Н. П. Хмелевська // Збірник наукових праць Державного економіко-технологічного університету транспорту «Транспортні системи і технології» 2012 Випуск 21 с. 57-63

17. Інструкція з утримання колії залізниць України : ЦП-113. – К.: Укрзалізниця, 2012.

18. Закон України «Про охорону праці». – Відомості Верховної Ради України. – Чинна редакція.
19. Інструкція з утримання колії залізниць України : ЦП-113. – К.: АТ «Укрзалізниця», чинна редакція.
20. Правила безпеки під час виконання колійних робіт на залізничному транспорті. – К.: АТ «Укрзалізниця», чинна редакція.
21. НПАОП 60.1-1.01-10. Правила охорони праці для працівників залізничного транспорту.
22. НПАОП 40.1-1.21-98. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів.
23. НАПБ А.01.001-2014. Правила пожежної безпеки в Україні. – К.: МВС України.

ДОДАТКИ