

УДК 625.032.5-048.34:[629.4.067:004.94]

Н. П. ХМЕЛЕВСЬКА¹, М. Б. КУРГАН², Д. М. КУРГАН^{3*}

¹Каф. «Транспортна інфраструктура», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 48, ел. пошта n.p.hmelevska@ust.edu.ua, ORCID 0000-0002-2360-8671

²Каф. «Транспортна інфраструктура», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 48, ел. пошта m.b.kurhan@ust.edu.ua, ORCID 0000-0002-8182-7709

^{3*}Каф. «Транспортна інфраструктура», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 42, ел. пошта d.m.kurhan@ust.edu.ua, ORCID 0000-0002-9448-5269

Оптимізація виправлення кривих у плані за допомогою комп'ютерного моделювання для підвищення безпеки руху поїздів

Мета. Автори передбачають розробити та впровадити інноваційні підходи до оптимізації виправлення кривих у плані залізничних колій за допомогою комп'ютерного моделювання. Цей процес має на меті: підвищення безпеки руху; поліпшення плавності ходу, що підвищує комфорт пасажирів; усунення обмежень швидкості на кривих ділянках, що дозволяє скоротити час у дорозі та підвищити пропускну спроможність залізниць; зменшення витрат на обслуговування колії та ремонт рухомого складу. Застосування спеціального програмного забезпечення для симуляції різних сценаріїв руху поїздів по скоригованих кривих дозволить оцінити вплив структури поїздопотоку на швидкість руху, динаміку рухомого складу та стан колії. **Методика.** Дослідження базується на теорії математичного моделювання та чисельних методах розрахунків. Для пошуку оптимального варіанту реконструкції залізничних ділянок лінію розглянуто як комплексну систему, яка складається з різних об'єктів інфраструктури. Ці об'єкти через незадовільний технічний стан можуть обмежувати швидкість руху на певних ділянках. Розв'язання цієї задачі є складним через взаємозалежність таких об'єктів: скорочення часу руху на окремій ділянці не є лінійним, а отримання точних результатів потребує проведення тягових розрахунків з урахуванням різних варіантів усунення обмежень швидкості. **Результати.** Запропоновано алгоритм розрахунків для оптимізації довгих ділянок залізничної колії. Алгоритм дозволяє враховувати бажаний напрямок зсувів у кривих, що значно полегшує процес оптимізації. Наведено приклад розрахунків за запропонованим алгоритмом, який демонструє ефективність підходу. **Наукова новизна.** Розв'язано науково-прикладну задачу оптимізації процесу корегування залізничних кривих у плані. Це сприяє підвищенню безпеки та швидкості руху поїздів завдяки впровадженню новітніх методів комп'ютерного моделювання. **Практична значимість.** Реалізація запропонованої технології оптимізації залізничного плану дозволить суттєво підвищити швидкість і безпеку руху поїздів, а також збільшити пропускну спроможність залізничних ліній. Це стане важливим кроком для інтеграції українських залізниць до європейської транспортної системи.

Ключові слова: однорядісна крива; складова крива; комп'ютерне моделювання; оптимізація кривих; система автоматизованого проектування

Вступ

Сучасне залізничне сполучення неможливо уявити без високих швидкостей як основи інноваційного розвитку залізниць. Згідно зі Стратегією розвитку залізничного транспорту України, впровадження швидкісного руху поїздів на території України дозволить створити єдину мережу швидкісних залізниць, що буде сприяти збільшенню кількості транзитних пасажирів на напрямках Євросоюз–Україна.

В Україні склалися умови, коли міжрегіональні швидкісні електропоїзди і вантажні вагони, парк яких критично зношений і які практично

розбивають верхню будову колії, експлуатують на одних і тих самих ділянках залізниць. Крім того, профіль колії на маршрутах Інтерсіті+ має велику кількість кривих і ділянок з обмеженням швидкості. Це призвело до того, що подальше її підвищення для міжрегіональних електропоїздів з урахуванням дотримання необхідних умов безпеки неможливе [3]. У результаті другий етап впровадження в Україні денних швидкісних пасажирських перевезень уже сьогодні багато в чому вичерпав свій потенціал для перспективного розвитку. Ця ситуація вимагає активізації роботи з підготовки до третього, найбільш витратного, але і найбільш ефективного етапу вдосконалення швидкісних перевезень. У статті [2]

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

констатовано, що «третій етап впровадження швидкісних пасажирських перевезень зі значним скороченням часу в дорозі на маршрутах InterCity+ вимагає використання рухомого складу з експлуатаційними швидкостями 200 км/год і вище з одночасним вдосконаленням залізничної інфраструктури верхньої будови колії та системи електрифікації з виділенням окремих ліній для швидкісного пасажирського сполучення і вантажного руху».

Проведений аналіз кривих показав, що з плином часу крива може видозмінюватися відносно початкового положення через певні причини. Перша – незбалансоване навантаження як на внутрішню, так і на зовнішню рейки внаслідок перевищення підвищення зовнішньої рейки на низьких швидкостях або дефіциту підвищення на високих швидкостях замість рівноважної швидкості, для якої було передбачено підвищення. Друга причина – вплив великих горизонтальних сил, що діють на рейки від поїздів. Горизонтальні сили змінюють обрис кривої, зменшуючи чи збільшуючи кривизну в окремих місцях, що призводить до зміни відцентрового прискорення і, як наслідок, порушує плавність руху поїздів. Таким чином, для відновлення плавного руху транспортних засобів на цих кривих стає необхідним виправлення кривої й корегування її параметрів [9].

Щоб провести виправлення кривих, необхідно мати достовірну інформацію про план залізниці. Це пов'язано з вимірюванням величин, що визначають геометрію залізничної колії. Так, у статті польських фахівців [13] запропоновано інноваційний метод визначення положення осі залізничної колії, який використовує приймачі Глобальної навігаційної супутникової системи (GNSS).

Якщо реальні характеристики плану лінії відрізняються від проектних, це може викликати або обмеження швидкості, або перевищення нормативів, що, у свою чергу, може призвести до зниження рівня безпеки та комфортності руху, до збільшення сил взаємодії між колесами рухомого складу та елементами верхньої будови колії. Унаслідок збільшення цих сил підвищується знос рейок та інших елементів верхньої будови колії, а також коліс та елементів рухомого складу, що встановлено дослідженнями авторів роботи [11].

Наукові дослідження за напрямками вдосконалення параметрів кривих, мінімізації зносу в кривих, перебудови кривих з метою підвищення швидкості виконують не один десяток років. Так, у роботі [8] враховані вимоги міжнародного стандарту, який встановлює правила та положення для безпечного перевезення вантажів по залізниці. Викладено теоретичні основи та технічні вимоги для підвищення швидкості до 160 км/год, висвітлено питання щодо використання програмного забезпечення для розрахунку швидкісного потенціалу на наявних кривих, подано методологію пошуку рішення для подальшого підвищення швидкості. Досліджено різні типи кривих: проста крива, складова, S-подібні криві, а також такі параметри, як мінімальна довжина прямої вставки, довжина перехідних кривих, величина зсуву в разі виправлення кривих.

Технічна система, яка дозволяє вирішувати задачі щодо оптимальної реконструкції кривих залізниць для збільшення швидкості руху поїздів при мінімальних інвестиціях, запропонована авторами в роботі [12]. Враховано комфортне перевезення пасажирів при збільшенні швидкості в кривих ділянках колії.

У роботі [5] розглянуто визначення горизонтальної кривизни залізничної колії. Метод заснований на зміні кутів нахилу рухомої хорди в декартовій системі координат. Шляхом оцінки впливу довжини хорди на отримані значення кривизни встановлено, що довжина хорди не відіграє суттєвої ролі у визначенні кривизни і не обмежує застосування цього методу. Водночас звернено увагу на точність визначення кривизни та її відповідність на ділянках перехідних кривих. Автор [6] вважає, що проблема визначення горизонтальної кривизни осі залізничної колії для отримання вихідних геометричних характеристик траси остаточно не вирішена, і пояснює це тим, що геометричні характеристики визначають за допомогою наближених методів.

Багато наукових праць присвячено обґрунтуванню виду перехідних кривих під час впровадження швидкісного руху поїздів. Так, у роботі [7] представлено новий вид перехідної кривої, адаптованої до експлуатаційних вимог, що діють на залізниці.

В [4] автори дослідили зміну ширини колії в кривих для кількох залізничних дрюгорядних

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

і магістральних ліній Угорщини з низьким і високим обсягом перевезень. Зміну параметра ширини колії як функцію часу, що минув, аналізували на основі функцій розподілу шляхом обчислення.

Пошуки нових методів зйомки плану лінії й розрахунків виправлення кривих для постановки їх в проєктне положення продовжуються [10]. Наявні методи зйомки і розрахунку виправлення кривих мають ряд недоліків, які не дозволяють використовувати їх в умовах підвищених вимог до точності положення колії в плані, особливо в разі підвищення швидкості руху поїздів і впровадження інноваційних систем автоматизованого проєктування.

По-перше, практично всі методи засновані на оцінці кривизни наявної колії по коловій кривій, що проходить через три сусідні точки. Цей підхід застосовують під час виправлення кривих «методом згладжування», він призводить до погрешностей на ділянках, де змінюється кривизна.

По-друге, якщо зсуви в окремих точках розраховують через різницю евольвент наявної й проєктної колії, то в складних і довгих кривих це призводить до неприпустимих похибок. Якщо параметри проєктного варіанту використовують для проєктування, наприклад, другої головної колії, то похибки евольвентного підходу можуть призвести до порушення умов безпеки руху поїздів.

По-третє, під час призначення проєктного положення для складових кривих із проміжними перехідними кривими на графіку кривизни не враховують особливості влаштування радіоїдальної кривої.

По-четверте, під час розв'язання проєктних і розрахункових задач через складнощі або через відсутність математичних моделей наявне положення кривої замінюють однорадіусною кривою, відносно якої і виконують всі розрахунки, що в окремих випадках призводить до збільшення обсягів будівництва і навіть до порушення безпеки руху поїздів.

По-п'яте, практично всі наявні методи дозволяють розраховувати тільки локальні складові криві одного напрямку. Водночас практично неможливо на складних ділянках виділити під час зйомки прямі, що відокремлюють одну локальну криву від іншої.

По-шосте, прямі підходів до ділянки практично у всіх методах визначають першою й останньою парами знятих точок, що в окремих випадках не відповідає куту повороту кривої і не дозволяє згодом з'єднати між собою розраховані ділянки.

Огляд наукових робіт показує, що запропоновані різними авторами методи є корисними для реконструкції наявної залізниці, але вони можуть бути ефективними у визначених умовах експлуатації. Багато праць вітчизняних і закордонних фахівців присвячено оптимізації поодиноких чи складових кривих, їх параметрів (радіуса, перехідних кривих, підвищення зовнішньої рейки тощо), але питання оптимізації плану лінії довжиною в перегін чи декілька перегонів вивчене недостатньо.

Мета

Основна мета роботи – показати інноваційні технології під час оптимізації плану залізниці, запровадження яких в Україні дозволить досягти більш високого рівня безпеки, плавності й комфортабельності їзди.

Методика

Світовий досвід свідчить, що без впровадження інновацій неможливий ефективний розвиток залізничного транспорту. Серед відомих сьогодні інноваційних технологій можна назвати використання комп'ютерного моделювання залізничної колії, яке дозволяє визначити оптимальну стратегію плану лінії та забезпечити більш точну й ефективну роботу з виправлення кривих. У цій роботі акцент зроблено саме на використанні комп'ютерного моделювання.

Для знаходження варіанту оптимальної реконструкції ділянки транспортного коридору залізничну лінію розглядаємо як комплексну систему, що складається з пристроїв і споруд, які через незадовільний технічний стан можуть обмежувати рівень швидкостей руху поїздів на кожній конкретній ділянці. Вирішення такого завдання є складним, тому що необхідно розглядати взаємозалежні об'єкти, коли скорочення часу руху поїзда, отримане на кожному об'єкті, після усунення обмеження швидкості руху не дорівнює виграшу в часі, якщо зняти всі обме-

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

ження швидкості. Тобто критерій не є адитивним, і отримати достовірні дані можна тільки після виконання тягових розрахунків за різних комбінацій зняття обмежень швидкостей.

Інноваційний підхід у САПР полягає в тому, що, по-перше, передбачена можливість застосування різних способів зйомки плану лінії, які використовують як у колійному господарстві (метод стріл), так і в проєктних організаціях (метод Гонікберга, координатний, від базису тощо); по-друге, що дуже важливо, розрахунки виконують не окремих кривих, а ділянок довжиною в перегін чи кілька перегонів з оптимізацією проєктного плану за різними критеріями із забезпеченням максимально встановленої швидкості [1]. Для наявних методів проєктування плану поки ще не розроблено чіткої системи критеріїв оптимального положення проєктної кривої. Використання запропонованої в цій роботі методики дозволяє проводити оптимізацію проєктного плану за різними критеріями, а саме: мінімум суми модулів величин зсувів $\sum |\Delta_i| = \min$, мінімум суми квадратів зсувів $\sum \Delta_i^2 = \min$, мінімум суми витрат на рихтування кривих $\sum B = \min$, що дозволяє нівелювати вищенаведені зауваження.

Перші два критерії мають більш математичний сенс і орієнтовно гарантують мінімум робіт на виконання рихтування. Критерій у вигляді суми витрат дозволяє відшукати економічно виправдане рішення, але вимагає знання економічних показників для відповідних видів робіт.

За великої кількості обмежень доцільно спочатку проводити оптимізацію за сумою модулів і лише потім переходити до суми витрат. Витрати за третім критерієм визначено за формулою:

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

де $a_1 \dots a_4$ – витрати на зміщення осі наявної колії відповідно до $\Delta_1 \leq 60$ мм, $\Delta_2 = 61 \dots 120$ мм, $\Delta_3 = 121 \dots 250$ мм і $\Delta_4 > 250$ мм; $l_1 \dots l_4$ – довжина ділянок із 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 перекла-

дання колії, перенесення контактної мережі, кабелів СЦБ; $a_8 \dots a_{10}$ – вартість 1 м^3 баласту, ґрунту для розширення наявного земляного полотна та ґрунту для відсіпання земляного полотна на новій трасі; $Q_8 \dots Q_{10}$ – об'єм баласту, ґрунту для розширення наявного земляного полотна та ґрунту для відсіпання нового земляного полотна.

Під час розрахунку довгих ділянок, що містять криві різних напрямків і проміжні прямі, у ряді випадків оптимізація проходить достатньо довго, а тому більш ефективно в такому разі розбити ділянку на частини, оптимізувати кожну з цих частин, а потім завантажити для всієї ділянки параметри моделі частинами й остаточно оптимізувати всю ділянку. Такий шлях виявляється значно швидшим, ніж оптимізація відразу всієї ділянки [8].

Наведемо алгоритм послідовності виконання розрахунків для оптимізації довгих ділянок:

1. Проводять координатну зйомку за параметрами кривих. Розбиття довгої ділянки на окремі частини виконують із використанням графіків кутових діаграм і кривизни ділянки. Таким чином формують вихідні набори даних (файли) для оптимізації.

2. Виконують оптимізацію кожної кривої в евольвентній або координатній моделях за одним із трьох критеріїв оптимізації: мінімум суми квадратів зсувів, модулів зсувів або за мінімумом витрат.

3. Після розрахунку кожного фрагмента поєднують зйомку окремих фрагментів для всієї ділянки. Під час поєднання елементів (крива – пряма, крива – крива) без перехідних кривих контролюють максимальну різницю кривизни цих елементів. Якщо різниця перевищує задану, змінюють значення радіусів так, щоб це обмеження виконувалося. У процесі оптимізації контролюють можливість відводу підвищення зовнішньої рейки

в межах перехідної кривої. Для ефективного з'єднання частин бажано провести округлення радіусів із фіксацією перехідних кривих наприкінці розрахунку кожної частини.

4. Виконують розрахунок і оцінку величини зсувів для всієї ділянки. Можливе врахування бажаного напрямку зсувів – «вправо», «вліво» або будь-яке. Величина обмеження і заданий зсув наприкінці ділянки враховують у будь-якому випадку, інші обмеження враховують

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

у процесі оптимізації. Також можна задати загальне обмеження на величину зсуву для всіх точок кривої.

5. Розраховують максимально допустимі швидкості руху для проектного варіанту і проводять аналіз результатів за прийнятим раніше критерієм.

Результати

Щоб показати інноваційні технології під час оптимізації плану залізниці, запровадження яких в Україні дозволить досягти більш високого рівня безпеки, плавності й комфортабельності їзди, застосовано систему автоматизованого проектування (САПР), яка містить програмні продукти MoveRW (тягові розрахунки) і RWPlan (виправлення і проектування плану залізничної колії). Приклад розрахунків за вищезазначеним алгоритмом наведено для напрямку Гребінка – Полтава – Лозова.

Проектне положення плану лінії визначено за умови реконструкції плану в такий спосіб, щоб, залишаючись у межах земляного полотна, отримати максимально можливу швидкість. Умовно було прийнято, що припустимими в цьому випадку будуть рихтування до 250 мм.

Остаточний висновок може бути зроблений тільки на основі координатної зйомки ділянки та детальних розрахунків із забезпеченням габаритів та міжколійя.

У результаті розрахунків плану та тягових розрахунків отримано дані для наступних варіантів.

Варіант 1, початковий. Станції та план колії не змінюються.

Варіант 2. Виконують реконструкцію станцій із метою підвищення швидкостей руху, план колії не змінюється.

Варіант 3. Окрім реконструкції станцій, у кривих змінюють підвищення таким чином, щоб забезпечити максимально можливі швидкості з мінімальним зносом рейок; при цьому положення колії в плані, радіуси та довжини перехідних кривих не змінюються.

Варіант 4. Крім реконструкції станцій, під час виконання робіт колію укладають у нове проектне положення, що забезпечує максимально можливі швидкості з мінімальним зносом рейок, при цьому колія залишається в межах наявного земляного полотна.

Оскільки час руху поїздів типу Hyundai мало відрізняється за напрямками, у табл. 1 наведено час лише в прямому напрямку.

Таблиця 1

Час руху поїздів Hyundai у прямому напрямку за варіантами

Table 1

Travel time of Hyundai trains in the forward direction by options

Ділянка	Довжина, км	Час руху поїздів Hyundai за варіантами, хв			
		1	2	3	4
Гребінка – Миргород	98,4	61	53	49	47
Миргород – Полтава	87,8	73	65	65	61
Гребінка – Полтава	186,2	134	118	114	108
Полтава – Берестин	80,2	68	64	51	48
Берестин – Лозова	95,3	70	61	56	51
Полтава – Лозова	17,5	138	125	107	99
Гребінка – Лозова	361,7	272	243	221	207

Як видно з результатів, на ділянці Гребінка – Полтава реконструкція станцій дає суттєвий ефект (16 хв). Встановлення підвищення зовнішньої рейки, розрахованого відповідно до нор-

мативів, дозволяє заощадити ще 4 хвилини. Укладання колії в проектне положення за розрахунком дає 10 хв економії часу порівняно з варіантом 2. На ділянці Полтава – Лозова реконструкція станцій дає відносно невеликий ефект (7 хв).

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

Водночас за рахунок коригування підвищення зовнішньої рейки (варіант 3) вдається заощадити ще 18 хв. Укладання колії в проектне положення (варіант 4) дає значне скорочення часу (26 хв) порівняно з варіантом 2.

Під час розрахунку проектного варіанту для кожної кривої досліджено доцільність та можливість підвищення швидкості на ній. При цьому

розглянуто варіанти, які потребують рихтувань у межах основної площадки земляного полотна. Фрагменти графіків кривизни, зсувів та максимально допустимих швидкостей руху поїздів на ділянці Полтава – Берестин для проектного варіанту наведені на рис. 1–3.

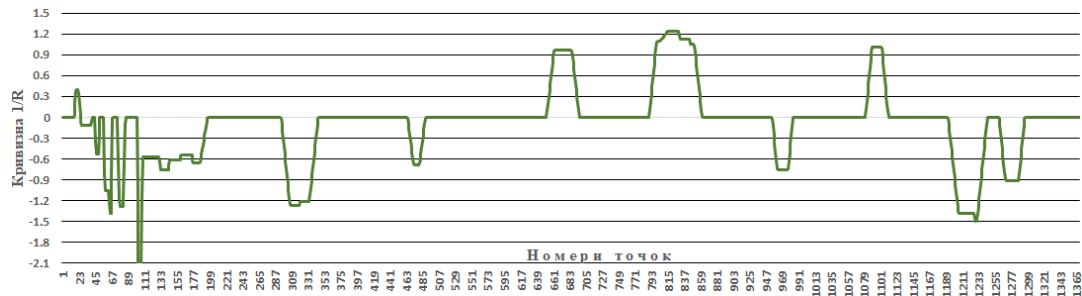


Рис. 1. Кривизна плану лінії на ділянці Полтава – Берестин (фрагмент)

Fig. 1. Curvature of the line plan on the Poltava – Berestyn section (fragment)

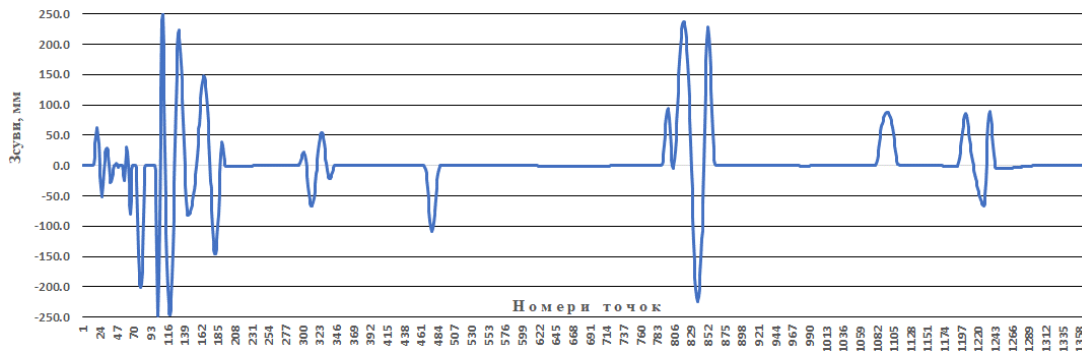


Рис. 2. Зсуви кривих на ділянці Полтава – Берестин

Fig. 2. Curve shifts on the Poltava – Berestyn section

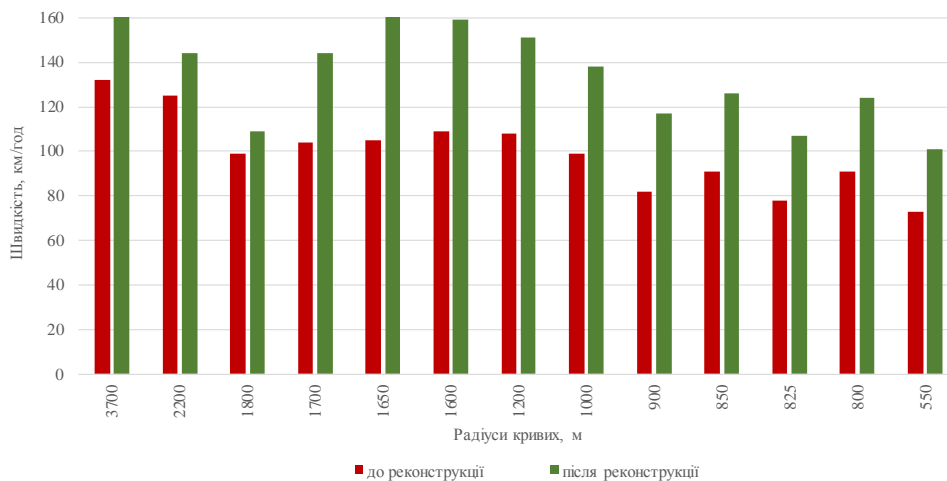


Рис. 3. Допустимі швидкості руху на ділянці Полтава – Берестин

Fig. 3. Permissible speeds on the section Poltava – Berestyn

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

За результатом оптимізації підвищення зовнішньої рейки з урахуванням максимально допустимої швидкості й зносу рейок вдалося отримати оптимальне рішення. У всіх варіантах прискорення вантажних поїздів не перевищують $0,3 \text{ м/с}^2$.

Наукова новизна та практична значимість

Розв'язано науково-прикладну задачу оптимізації процесу корегування залізничних кривих у плані. Це сприяє підвищенню безпеки та швидкості руху поїздів завдяки впровадженню новітніх методів комп'ютерного моделювання. Реалізація запропонованої технології оптимізації залізничного плану дозволить суттєво підвищити швидкість і безпеку руху поїздів, а також збільшити пропускну спроможність залізничних ліній. Це стане важливим кроком для інтеграції українських залізниць до європейської транспортної системи.

Висновки

На основі проведених теоретичних та експериментальних досліджень встановлено, що застосування інноваційних технологій із використанням комп'ютерного моделювання залізничної колії виправлення залізничних кривих дозволяє встановлювати раціональні параметри

плану й швидкості руху поїздів, що дасть змогу зменшити знос рейок і коліс рухомого складу, обсяги робіт із поточного утримання колії, скоротити витрати електроенергії або палива під час організації перевезень вантажів і пасажирів, буде сприяти підвищенню рівня безпеки, плавності руху й комфорту пасажирів.

Результати розрахунків і розроблена методика використання комп'ютерного моделювання виправлення залізничних кривих можуть бути використані для теоретичного обґрунтування максимально допустимих швидкостей руху поїздів з одночасним забезпеченням критеріїв міцності, стійкості, довговічності й надійності елементів залізничної колії та рухомого складу, а також для підвищення безпеки руху поїздів на залізницях України.

Подяка

Дослідження, результати яких викладені в цій статті, проведено за підтримки гранту Національного фонду досліджень України під час реалізації проекту «Наукове обґрунтування впровадження європейської колії на території України в повоєнний період» (реєстраційний номер проекту 2022.01/0021), який було отримано в рамках конкурсу «Наука для відбудови України у воєнний та повоєнний періоди».

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Корженевич І. П. *Виправлення і проектування плану залізничної колії за допомогою програми RWPlan*. Дніпропетровськ, 2012. 247 с.
2. Приходько В. Особливості розвитку вітчизняного денного швидкісного руху. *Вагонний парк*. 2020. № 11 (163). С. 9–27.
3. Ткаченко В., Сапронова С., Брайковська Н., Твердомед В. *Динамічна взаємодія рухомого складу і колії на лініях швидкісного руху суміщеного з вантажним*: монографія. Вінниця : ГО «Європейська наукова платформа», 2021. 240 с.
4. Fischer S., Németh D., Horváth H. Investigation of the Track Gauge in Curved Sections, Considering Hungarian Railway Lines. *Infrastructures*. 2023. Vol. 8. Iss. 4. P. 1–28. DOI: <https://doi.org/10.3390/infrastructures8040069>
5. Koc W. Analysis of the Effectiveness of Determining the Horizontal Curvature of a Track Axis Using a Moving Chord. *Problemy Kolejnictwa – Railway Reports*. Vol. 65. Iss. 190. P. 77–86. DOI: <https://doi.org/10.36137/1902E>
6. Koc W. Estimation of the Horizontal Curvature of the Railway Track Axis with the Use of a Moving Chord Based on Geodetic Measurements. *Journal of Surveying Engineering*. 2022. Vol. 148, No. 4. P. 04022007-1–04022007-11. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)SU.1943-5428.0000402](https://doi.org/10.1061/(ASCE)SU.1943-5428.0000402)
7. Koc W. New Transition Curve Adapted to Railway Operational Requirements. *Journal of Surveying Engineering*. 2019. Vol. 145, No. 3. P. 04019009-1–04019009-11. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)SU.1943-5428.0000284](https://doi.org/10.1061/(ASCE)SU.1943-5428.0000284)

8. Kurhan M., Kurhan D., Hmelevska N. Innovative Approaches to Railway Track Alignment Optimization, in Curved Sections. *Acta Polytechnica Hungarica*. 2024. Vol. 21, No. 1. P. 207–220.
DOI: <https://doi.org/10.12700/APH.21.1.2024.1.13>
9. Kurhan M., Kurhan D., Hmelevska N. Maintenance Reliability of Railway Curves Using Their Design Parameters. *Acta Polytechnica Hungarica*. 2022. Vol. 19 (6). P. 115–127.
DOI: <https://doi.org/10.12700/APH.19.6.2022.6.9>
10. Kurhan M., Kurhan D., Husak M., Hmelevska N. Innovative Technologies for the Introduction of High-Speed Train Operation (on the Example of Track Maintenance in the Plan). *Transport Means: Proceedings of the 26th International Scientific Conference* (Kaunas, 05–07 Oct., 2022). Kaunas, 2022. Pt. I. P. 372–377.
11. Kurhan M., Kurhan D., Novik R., Baydak S., Hmelevska N. Improvement of the railway track efficiency by minimizing the rail wear in curves. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 985. P. 1–7. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/985/1/012001>
12. Lebid I., Kravchenya I., Dubrovskaya T., Luzhanska N., Berezovyi M., Demchenko Y. Identification of the railway reconstruction parameters at imposition of high speed traffic on the existing lines. *MATEC Web of Conferences*. 2019. Vol. 294. P. 1–7. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201929405003>
13. Wilk A., Koc, W., Specht C., Skibicki J., Judek S., Karwowski K., ... Grulkowski S. Innovative mobile method to determine railway track axis position in global coordinate system using position measurements performed with GNSS and fixed base of the measuring vehicle. *Measurement*. 2021. Vol. 175. P. 109016.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.109016>

N. P. KHMELEVSKA¹, M. B. KURHAN², D. M. KURHAN^{3*}

¹Dep. «Transport Infrastructure», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 48, e-mail n.p.hmelevska@ust.edu.ua, ORCID 0000-0002-2360-8671

²Dep. «Transport Infrastructure», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 48, e-mail m.b.kurhan@ust.edu.ua, ORCID 0000-0002-8182-7709

^{3*}Dep. «Transport Infrastructure», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 42, e-mail d.m.kurhan@ust.edu.ua, ORCID 0000-0002-9448-5269

Optimization of Curve Correction in the Plan Using Computer Modeling to Improve Train Safety

Purpose. The authors intend to develop and implement innovative approaches to optimizing curve correction in the plan of railway tracks using computer modeling. This process aims to: improve traffic safety; improve the smoothness of the ride, which increases passenger comfort; eliminate speed limits on curved sections, which reduces travel time and increases railroad capacity; reduce track maintenance and rolling stock repair costs. The use of special software to simulate various scenarios of train traffic along the adjusted curves will allow us to assess the impact of the train flow structure on the speed, rolling stock dynamics, and track condition. **Methodology.** The study is based on the theory of mathematical modeling and numerical calculation methods. To find the best option for the reconstruction of railway sections, the line is considered as a complex system consisting of various infrastructure facilities. Due to their unsatisfactory technical condition, these facilities may limit the speed of traffic on certain sections. The solution to this problem is complicated due to the interdependence of such objects: the reduction of travel time on a particular section is not linear, and obtaining accurate results requires traction calculations taking into account various options for eliminating speed limits. **Findings.** A calculation algorithm for optimizing long sections of the railway plan is proposed. The algorithm allows to take into account the desired direction of shifts in the curves, which greatly facilitates the optimization process. An example of calculations based on the proposed algorithm is given, which demonstrates the effectiveness of the approach. **Originality.** The scientific and applied problem of optimizing the process of adjusting railway curves in the plan has been solved. This helps to improve the safety and speed of trains through the introduction of the latest computer modeling methods. **Practical value.** The implementation of the proposed technology for optimizing the railway plan will significantly increase the speed and safety of train traffic, as well as increase the throughput capacity of railway lines. This will be an important step for the integration of Ukrainian railways into the European transportation system.

Keywords: single-radius curve; compound curve; computer modeling; curve optimization; computer-aided design system

REFERENCES

1. Korzhenevych, I. P. (2012). *Vypravlennia i proektuvannia planu zaliznychoi kolii za dopomohoiu prohramy RWPlan*. Dnipro. (in Ukrainian)
2. Prykhodko, V. (2020). Osoblyvosti rozvytku vitchyznianoho dennoho shvydkisnoho rukhu. *Vahonnyi park*, 11(163), 9-27. (in Ukrainian)
3. Tkachenko, V., Saponova, S., Braikovska, N., & Tverdomed, V. (2021). *Dynamichna vzaiemodiia rukhomoho skladu i kolii na liniakh shvydkisnoho rukhu sumishchenoho z vantazhnym: monohrafiia*. Vinnytsia: HO «Yevropeiska naukova platforma». (in Ukrainian)
4. Fischer, S., Németh, D., & Horváth, H. (2023). Investigation of the Track Gauge in Curved Sections, Considering Hungarian Railway Lines. *Infrastructures*, 8(4), 1-28. DOI: <https://doi.org/10.3390/infrastructures8040069> (in English)
5. Кос, В. (2021). Analysis of the Effectiveness of Determining the Horizontal Curvature of a Track Axis Using a Moving Chord. *Problemy Kolejnictwa – Railway Reports*, 65(190), 85-95. DOI: <https://doi.org/10.36137/1902e> (in English)
6. Кос, В. (2022). Estimation of the Horizontal Curvature of the Railway Track Axis with the Use of a Moving Chord Based on Geodetic Measurements. *Journal of Surveying Engineering*, 148(4), 04022007-1-04022007-11. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(asce\)su.1943-5428.0000402](https://doi.org/10.1061/(asce)su.1943-5428.0000402) (in English)
7. Кос, В. (2019). New Transition Curve Adapted to Railway Operational Requirements. *Journal of Surveying Engineering*, 145(3), 04019009-1-04019009-11. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(asce\)su.1943-5428.0000284](https://doi.org/10.1061/(asce)su.1943-5428.0000284) (in English)
8. Kurhan, M., Kurhan, D., & Hmelevska, N. (2024). Innovative Approaches to Railway Track Alignment Optimization, in Curved Sections. *Acta Polytechnica Hungarica*, 21(1), 207-220. DOI: <https://doi.org/10.12700/aph.21.1.2024.1.13> (in English)
9. Kurhan, M., Kurhan, D., & Hmelevska, N. (2022). Maintenance Reliability of Railway Curves Using Their Design Parameters. *Acta Polytechnica Hungarica*, 19(6), 115-127. DOI: <https://doi.org/10.12700/aph.19.6.2022.6.9> (in English)
10. Kurhan, M., Kurhan, D., Husak, M., & Hmelevska, N. (2022, Oct.). Innovative technologies for the introduction of high-speed train operation (on the example of track maintenance in the plan). In *Transport Means: Proceedings of the 26th International Scientific Conference* (Pt. I, pp. 372–377).
11. 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 Conference Series: Materials Science and Engineering*, 985(1), 1-7. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/985/1/012001> (in English)
12. Lebid, I., Kravchenya, I., Dubrovskaya, T., Luzhanska, N., Berezovyi, M., & Demchenko, Y. (2019). Identification of the railway reconstruction parameters at imposition of high speed traffic on the existing lines. *MATEC Web of Conferences*, 294, 1-7. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201929405003> (in English)
13. Wilk, A., Кос, В., Specht, C., Skibicki, J., Judek, S., Karwowski, K., ... & Grulkowski, S. (2021). Innovative mobile method to determine railway track axis position in global coordinate system using position measurements performed with GNSS and fixed base of the measuring vehicle. *Measurement*, 175, 109016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.109016> (in English)

Надійшла до редколегії: 31.07.2024

Прийнята до друку: 02.12.2024