

Лагута Василь Васильович

УДК 625.173.3 :625.113

**УДОСКОНАЛЕННЯ ПРОЕКТУВАННЯ КРИВИХ
ЗАЛІЗНИЧНОЇ КОЛІЇ В ПЛАНІ**

Спеціальність 05.22.06 - залізнична колія

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

В. Лагута

Дніпропетровськ - 2002

НТБ
ДНУЗТ

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Дніпропетровському державному технічному університеті залізничного транспорту Міністерства транспорту України.

Науковий керівник

доктор технічних наук, професор
БОСОВ Аркадій Аркадійович,
Дніпропетровський державний технічний університет
залізничного транспорту, кафедра прикладної математики.

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук,
РАДЧЕНКО Микола Олексійович,
Інститут транспортних систем і технологій НАН України,
м.Дніпропетровськ, провідний науковий співробітник
відділу надпровідних магнітних систем.

кандидат технічних наук, доцент
КОРЖЕНЕВИЧ Іван Петрович,
Дніпропетровський державний технічний університет
залізничного транспорту, завідувач кафедри
“Проектування, будівництво доріг і геодезія”.

Провідна установа: Кі
Міністерства транспорт

порту
поруд”.

Захист відбудеться “2”
ради Д08.820.01 при
транспорту за адресою:

ваної вченої
залізничного
, ауд. 314.

З дисертацією можна
університету залізничн
В.А.Лазаряна, 2.

технічного
л. Академіка

Автореферат розіслани

Вчений секретар
спеціалізованої вченої
д.т.н., професор

остін М.О.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Від якості проектування залізничної колії залежать подальші витрати на її утримання, швидкість руху поїздів. Розв'язання задачі раціонального проектування кривих поліпшить взаємодію колії і рухомого складу. Задачу проектування залізничних кривих можна умовно розділити на дві: проектування кривих для нових ділянок залізниці (що будуються) і проектування кривих для існуючих (що експлуатуються) ділянок.

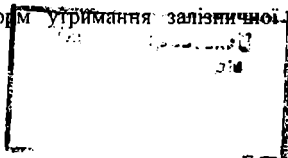
В даний час, при проектуванні залізничної колії, як основна перехідна крива використовується радіоїдальна спіраль. Радіоїдальна спіраль не задовольняє вимогам у відношенні кутового прискорення. Перехідна крива проф. Шахунянца позбавлена хибі радіоїдальної спіралі, але методика вибору її довжини не забезпечує, в деяких випадках, обмежень по непогашеному прискоренню і по його зміні. Таким чином, виникає задача визначення раціональної форми перехідної кривої, що забезпечує вимогам по непогашеному прискоренню, по зміні непогашеного прискорення, крутизни відводу підвищення зовнішньої рейки в кривій.

Важливою на сьогоднішній день залишається задача утримання кривих. Впровадження раціональних технологічних процесів по утриманню колії потребує удосконалення методів розрахунку виправленого положення кривої.

Вирішення відмічених задач особливо актуально в зв'язку з необхідністю створення міжнародних транспортних коридорів. Україна бере участь у розробці пропозицій по створенню швидкісних і високошвидкісних залізничних ліній у рамках ОСЖД. На найбільше інтенсивних напрямках руху в Україні до 2005 року планується реалізувати швидкість 160 км/год (Мостиска - Львів - Київ - Зерново і Київ - Одеса). Підвищення швидкості на залізницях України, в основному, здійснюється за рахунок технічних заходів: реконструкція плану лінії, капітальний ремонт колії.

Будівництво і реконструкція ліній залізничної колії, утримання таких ліній визначає актуальність дисертаційної теми.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота є частиною досліджень, які проводяться Дніпропетровським державним технічним університетом залізничного транспорту (ДІПТ) відповідно до рішення техніко-економічної Ради Придніпровської залізниці в рамках вимог засідання Ради Укрзалізниці від 24.04.97 р., протокол №5 «Про основні напрямки стабілізації фінансово-економічного положення залізниць у 1997 році і задачах по реструктуризації галузі», (наказ УЗ №156-Ц від 01.07.97 р.). Обраний напрямок досліджень пов'язано з виконанням науково-дослідної роботи у Дніпропетровському державному технічному університеті залізничного транспорту, яка виконувалася по завданню Укрзалізниці: «Розробка технічних вимог і норм утримання залізничної колії колійних конструкцій у зв'язку з



впровадженням швидкостей руху до 160-200 км/год на існуючих лініях України, які входять до міжнародної магістралі Європа – Азія”, Дніпропетровськ, ДІПТ, 1997р (0198U000823).

Мета і задачі дослідження. Мета дослідження полягає в удосконаленні проектування кривих залізничної колії в плані для поліпшення роботи системи коліско-рейка в перехідній кривій в умовах підвищення швидкості руху поїздів на залізницях України, зменшення витрат при реконструкції і утриманні колії.

Для реалізації поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

провести аналіз геометричних і основних динамічних умов, властивих перехідним кривим;

вирішити задачу проектування плану перехідної кривої з раціональною формою;

вирішити задачу визначення раціональної форми відводу підвищення зовнішньої рейки на перехідних кривих, для неодночасності початку відводу кривизни і підвищення;

вирішити задачу раціонального проектування виправки багаторадіусної кривої залізничної колії, яка забезпечує мінімальні трудовитрати на рихтування колії.

Об’єкт дослідження – це процес проектування кривих залізничної колії, який є обов’язковим елементом при її будівництві, реконструкції та утриманні.

Предметом дослідження є методи моделювання і розрахунку кривих залізничної колії.

Методи дослідження. Для вирішення задачі визначення раціональної форми перехідної кривої використані методи оптимального керування, для вирішення задачі про визначення раціональної форми підвищення зовнішньої рейки на перехідних кривих для неодночасності початку відводу кривизни і підвищення – методи наближення функцій. Для раціонального проектування виправки багаторадіусної кривої використані теорія кривих, теорія нормалей залізничних кривих, кластерний аналіз, методи оптимізації.

Наукова новизна одержаних результатів. Наукову новизну отриманих результатів складають:

отримано аналітичні вирази кривизни перехідної кривої залізничної колії раціональної форми в класі функцій з обмеженою другою похідною з урахуванням вимог стосовно непогашеного прискорення, зміни непогашеного прискорення і крутизни відводу підвищення зовнішньої рейки;

уточнене наближене диференціальне рівняння здвигів, що дозволяє зкоректувати область застосування традиційного рівняння теорії нормалей залізничних кривих;

запропоновано проектування раціональної виправки багаторадіусної геометрично правильної кривої з визначенням її структури, з виконанням обмежень на величини здвигів, яка дозволяє зменшити об’єм рихтовочних робіт.

Запропоновані перехідні криві раціональної форми, які задовольняють вимогам у відношенні, непогашеного прискорення, зміни непогашеного прискорення, крутизни відводу підвищення зовнішньої рейки в кривій, отримані вперше.

Проектування раціональної виправки багаторадіусної геометрично правильної кривої є подальшим розвитком задачі визначення проектного положення залізничної кривої.

Практичне значення одержаних результатів. Запропоновані перехідні криві можуть бути використані: при проектуванні залізничної колії, колії метрополітенів, швидкісних трамвайних ліній, у розробках систем автоматизованого проектування (САПР) залізничної колії.

Запропонований в роботі розрахунок виправки кривих може бути використаний при рихтуванні кривих залізничної колії магістрального і промислового транспорту. Структурування проектної кривої може бути використане в інших розробках проектування виправки складних кривих. Для визначення проектного положення залізничної кривої складена програма для персональної ЕОМ, яка дозволяє виконувати розрахунки виправки багаторадіусних кривих з мінімальними трудовитратами на проведення рихтовочних робіт.

Особистий внесок здобувача. У роботах опублікованих у співавторстві, дисертантом запропоновано розв'язання задачі побудови перехідної кривої оптимальної довжини між прямою ділянкою колії і круговою з виконанням вимог відносно кутового прискорення [3]. Дисертанту належить ідея, математична постановка і розв'язання задачі про проектування плану кривої, що має раціональну форму між двома залізничними коліями, які знаходяться під кутом один до одного. Запропоновано засіб побудови раціонального підвищення зовнішньої рейки на ділянці перехідної кривої, який враховує неодноразовість початку відводу кривизни і підвищення [4]. У роботах [5, 6] запропонована математична постановка задачі визначення раціональної структури багаторадіусної кривої, запропоновано алгоритм її розв'язання. У роботі [7] отримані необхідні умови вписування залізничного екіпажа в криву. Загальний напрямок досліджень належить науковому керівнику - д.т.н., професору А.А.Босову.

Апробація результатів дисертації. Результати роботи доповідалися:

- на науково-технічній конференції Дніпропетровського інституту інженерів залізничного транспорту "Проблеми синтеза управления" у 1987 р.;
- на VII Українській конференції "Моделювання і дослідження усталеності систем" у Київському державному університеті в 1996 р.;
- на I міжнародній науковій конференції «Проблеми економіки транспорту в умовах реструктуризації», що проходила в Дніпропетровському державному технічному університеті залізничного транспорту у 2001 р.

Дисертаційна робота доповідалась на науково-методичних семінарах кафедр факультету "Організація будівництва доріг та експлуатація колії" ДІТ у 2000-2001 рр.

Публікації. Результати дисертації опубліковані в семи статтях у фахових виданнях, затверджених ВАК України, і в двох тезах конференцій.

Структура й обсяг дисертації. Дисертація складається з вступу, п'ятьох розділів, висновків, списку використаної літератури і 7 додатків. Робота викладена на 186 сторінках, у тому числі 158 сторінок основного тексту, містить 23 рисунки на 12 сторінках, 11 таблиць на 8 сторінках. Список літератури з 117 найменувань на 10 сторінках. Додатки на 27 сторінках.

ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обгрунтована актуальність, наукова новизна і практична цінність досліджень. Формулюється мета дисертаційної роботи та основні задачі досліджень.

У першому розділі дисертації приведено огляд літератури і стисла історична довідка про проектування кривих залізничної колії. Розглянуто проектування перехідних кривих і задача визначення раціонального положення проектної кривої по заданій натурній (задача визначення здвигів для побудови проектної кривої).

Істотний внесок у розвиток теорії перехідних кривих внесли Д.Г.Голованов, Г.В.Єльфимов, П.Г.Козійчук, В.А.Лазарян, В.І.Мінорський, Г.М.Шахунянц, а також інженери і вчені Birmap, Chaves, Descubes, Fort, Hallade, Hofer, Nordling, Petersen, Schramm, Weisbach та ін. В розділі проводиться аналіз, зазначені властивості і правило визначення довжини таких перехідних кривих: радіоїдальна спіраль, лемніската Бернуллі, кубічна парабола, швидкісна крива, парабола четвертого ступеня, мажорантна крива, мінорантна крива, перехідна крива Г.М.Шахунянця, перехідна крива В.А.Лазаряна, перехідна крива Д.Г.Голованова.

Ритмічна, безаварійна робота залізничного транспорту залежить від технічного стану колії, її положення в плані. Розв'язання задачі проектування виправки залізничної колії має важливе практичне значення для поточного утримання, в зв'язку з цим, інженерами і вченими проводяться дослідження і пропонуються різноманітні методики розрахунку.

Вагомий внесок у розвиток методів розрахунку виправки кривих належить В.І.Ангелейко, В.Б.Бредюку, О.В.Гавриленкову, І.В.Гонікбергу, А.К.Дюніну, Б.М.Євдаєву, Д.Г.Ковтуну, П.Г.Козійчуку, І.П.Корженевичу, А.Т.Крагелю, А.А.Лебедєву, П.Ф.Логінову, М.М.Максимову, М.А.Макурову, М.Д.Полікарпову, А.І.Проценко, Ю.М.Рапопорту, А.М.Розенбергу, І.Я.Туровському, І.П.Шершавицькому, А.П.Шутову та Dobrovolski B., Degorski T., Ellis D., Hull N. A., Kellie A. C., Moriyama T., Rodwan A. E., Rajaram B., Rao M. S., Sitko S. та ін.

Умовно розрахунки виправки залізничних кривих можна розділити на такі категорії: розрахунок однорадіусних кривих, розрахунок багаторадіусних кривих, розрахунок геометрично правильних кривих, розрахунок динамічно плавних проектних кривих. Серед методів розрахунку

здвигів для проектних кривих слід зазначити такі: методи що згладжують функції, усереднюючі методи, методи які використовують апарат наближення функцій, теорії ймовірностей, математичного програмування, змішані методи та інші.

Аналіз робіт проектування залізничних кривих дозволяє зробити такі висновки:

застосовувана в даний час, в основному, радіоїдальна спіраль, як перехідна крива, не задовольняє вимогам у відношенні кутового прискорення;

- оптимізація форми перехідної кривої не проводилася;

- найбільше придатною теорією для розрахунку виправки кривих залишається теорія нормалей залізничних кривих;

у даний час майже відсутні методи раціонального визначення структури натурної залізничної кривої (визначення раціональної кількості ділянок з постійною кривизною).

В *другому розділі* досліджуються раціональні перехідні криві для сполучення прямої ділянки залізничної колії з круговою, для сполучення двох прямих ділянок колії розташованих під кутом одна до другої, визначається форма відвода підвищення зовнішньої рейки для неодновременного початку відвода кривизни і підвищення, задаються параметри проектування і пропонується спосіб їх обчислення.

Нехай s - довжина колії, що відрховується від точки початку перехідної кривої, а $K_1(s)$ - кривизна перехідної кривої, тоді вимоги до перехідної кривої, яка плавно сполучає пряму ділянку колії з круговою, можна записати в такому виді

$$K_1(0) = 0; \quad K_1(l) = \frac{1}{R}; \quad \left. \frac{dK_1}{ds} \right|_{\substack{s=0 \\ s=l}} = 0, \quad (1)$$

де l - довжина перехідної кривої, R - радіус кругової кривої.

З зусиллями, обумовленими кутовим прискоренням боротися неможливо, тому слід пред'являти до перехідних кривих ще одну вимогу

$$\max_{0 \leq s \leq l} \left| \frac{dK_1(s)}{ds} \right| \leq \varepsilon_0, \quad (2)$$

яка відрізняє постановку задачі від раніше досліджених.

Для того, щоб цій задачі додати універсальний характер, з метою охопити найбільш широкий клас задач, перейдемо до безрозмірних величин, поклавши

$$t = \frac{s}{R}; \quad K = R \cdot K_1; \quad \varepsilon = \varepsilon_0 R^2, \quad (3)$$

тоді умови (1) і (2) будуть мати вигляд

$$K(0) = 0; \quad K(T) = 1; \quad \left. \frac{dK}{dS} \right|_{t=0} = 0; \quad \max_{0 \leq t \leq T} \left| \frac{dK}{dt} \right| \leq \varepsilon, \quad (4)$$

де T - безрозмірна довжина перехідної кривої.

Узагальненою перехідною кривою будемо вважати криву, кривизна якої є монотонно-зростаючою функцією на інтервалі $[0, T]$, подана у виді безкінечного статичного ряду і задовольняє умовам (4)

$$K(t) = \sum_{k=1}^{\infty} B_k \sum_{i=0}^k (-1)^i \frac{C_k^i}{i+2} t^{i+2} T^{k-i} \quad (5)$$

Значення величин T і B_k визначим з вимоги

$$\max_{0 \leq t \leq T} \left| t \sum_{k=1}^{\infty} B_k (T-t)^k \right| \leq \varepsilon \quad (6)$$

і граничних умов. Так для $k=1$ будемо мати $T \geq \frac{3}{2\varepsilon}$. Очевидно, що для практичного застосування в задачі (6) необхідно обмежитися кінцевим числом додатків, задавшись конкретним значенням k ($k=1, 2, 3, \dots$).

Ввівши позначення $x_1(t) = K(t)$, $x_2(t) = K'(t)$, приходимо до такої математичної постанови задачі побудови перехідної кривої раціональної форми з прямої на коло: необхідно знайти таку функцію керування $u(t)$ з класу кусочно-постійних, щоб

$$|u(t)| \leq \alpha, \quad \alpha > 0, \quad (7)$$

а розв'язання системи диференціальних рівнянь

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dt} = x_2, \\ \frac{dx_2}{dt} = u(t) \end{cases} \quad (8)$$

задовільняло умовам

$$x_1(0) = 0; \quad x_1(T) = 1; \quad x_2(0) = 0; \quad x_2(T) = 0, \quad (9)$$

і при будь-якому $t \in [0, T]$

$$|x_2(t)| \leq \varepsilon \quad (10)$$

при цьому функціонал

$$I[u] = T \quad (11)$$

був би мінімальним.

Задача (7) - (11) є типовою задачею оптимального керування по швидкодії з обмеженням на фазові траєкторії.

Задача про побудову перехідної кривої раціональної форми з однієї прямої ділянки колії на іншу пряму ділянку, розташованих під кутом β одна до другої, формулюється так: знайти таку функцію керування $u(t)$ з класу кусочно-постійних, щоб

$$|\mu(t)| \leq \alpha_0, \quad \alpha_0 > 0, \quad (12)$$

а розв'язання системи

$$\begin{cases} x_1'(t) = x_2(t), \\ x_2'(t) = x_3(t), \\ x_3'(t) = u \end{cases} \quad (13)$$

задовольняло граничним умовам

$$\begin{aligned} x_1(0) &= 0, & x_2(0) &= 0, & x_3(0) &= 0; \\ x_1(T) &= \beta, & x_2(T) &= 0, & x_3(T) &= 0, \end{aligned} \quad (14)$$

де $x_1 = \varphi(s)$ - закон зміни кута нахилу дотичної перехідної кривої (кут повороту кривої), $x_2 = K_1(s)$ - кривизна перехідної кривої, $x_3 = K_1'(s)$ - похідна кривизни, T - довжина перехідної кривої і $\varphi(T) = \beta$. При цьому функціонал

$$I[u] = T \quad (15)$$

був би мінімальним.

Сформульовані задачі вирішуються відповідно до принципу максимуму Л.С.Понтрягіна.

Параметри проєктування ε_0 і α_0 вибираються так, щоб перехідна крива задовольняла технічним вимогам, тобто повинні бути витримані обмеження на величину непогашеного прискорення $[\alpha_{\text{нп}}]$, на величину зміни непогашеного прискорення $[\psi_{\text{нп}}]$, на крутизну відводу підвищення зовнішньої рейки $[i]$.

Для формування сприятливих початкових умов входу екіпажу в перехідну криву можна перед її початком улаштувати невелике (5 мм) підвищення на внутрішній рейковій нитці прямої ділянки колії, що передує перехідній кривій (пропозиція проф. М.А.Фрішмана). Довжина такої ділянки становить 275 метрів. Для випадків, коли поїзда рухаються з швидкістю більшою врівноваженої (швидкість залізничного екіпажу називають врівноваженою, якщо при дійсному підвищенню в кривій непогашена центробіжна сила дорівнює нулю) і коли неможливо влаштувати підвищення на внутрішній рейковій нитці через коротку пряму ділянку перед кривою, пропонується відвід підвищення зовнішньої рейки на перехідній кривій в вигляді

$$H(s) = \begin{cases} 0, & 0 \leq s \leq S^* \\ A \cdot K_1^*(s), & S^* \leq s \leq T \end{cases} \quad (16)$$

де $H(s)$ - підвищення; A - постійна величина, яку треба визначити; $K_1^*(s)$ - кривизна у відповідності з якою визначається підвищення; S^* - значення забігу (випадкова величина).

Функція $K_1^*(s)$ визначається з розв'язання задачі

$$\int_{S^*}^T (K_1^*(s) - K_1(s))^2 ds \Rightarrow \min \quad (17)$$

$$K_1^*(S^*)=0, \quad K_1^*(T)=1/R, \quad K_1^{*'}(S^*)=0, \quad K_1^{*'}(T)=0, \quad (18)$$

$$|K_1^{*''}(s)| \leq \eta, \quad (19)$$

де T - довжина перехідної кривої; η - обмеження на другу похідну кривизни $K_1^*(s)$, $K_1(s)$ - дійсна кривизна колії. Задача (17)-(19) є задачею про наближення функцій. Для розв'язання також був застосований принцип максимуму Л.С.Понтрягіна.

Отримані залежності для кривизни перехідної кривої варто розглядати як залежності кривизни центру мас залізничного екіпажу.

У *третьому розділі* приводяться результати досліджень по проектуванню раціональної виправки залізничних кривих. Розглядається задача розрахунку проектного положення геометрично правильної багаторадіусної кривої з позиції мінімізації робіт на проведення рихтування.

Під раціональним проектуванням виправки залізничної кривої в плані будемо розуміти визначення кривої заданої структури по положенню натурної кривої у відповідності із здвигами, що задовольняють вибраному критерію якості.

Натурна крива розглядається для деякого інтервалу $s \in [s_0, l]$, s - довжина кривої (рис. 1).

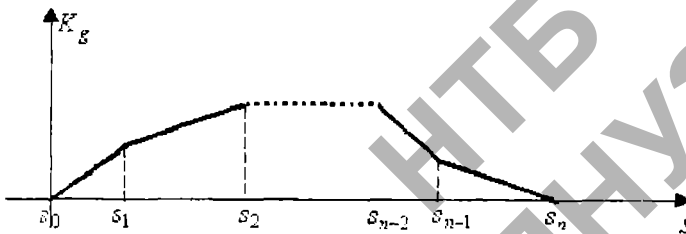


Рис. 1. Структура натурної кривої, K_g - кривизна, $s_0 = 0$, $s_n = l$.

Передбачається, що проектна крива утвориться з натурної кривої за допомогою здвигів $u(s)$ по нормалям натурної.

Приводиться виведення точного диференціального рівняння здвигів кривої на основі апарата теорії кривих. З точного диференціального рівняння здвигів уточнене наближене диференціальне рівняння, що має вигляд

$$u''(u, u') = K_g - K_p + (K_g^2 - 2K_g K_p)u + \frac{1}{2}[-2K_g^2 K_p \cdot u^2 + (4K_g - 3K_p)u'^2 + 2K_g' u \cdot u'] + o(u^2, u'^2), \quad (20)$$

де $K_g(s)$ кривизна натурної кривої, $K_p(s)$ кривизна проектної кривої. З рівняння (20) утвориться ще одне наближене лінійне диференціальне рівняння здвигів кривої

$$u'' - (K_g^2 - 2K_g K_p)u - (K_g - K_p) = 0, \quad (21)$$

яке пропонується використовувати у випадках, коли традиційне рівняння здвигів

$$u'' = K_g - K_p \quad (22)$$

не забезпечує необхідну точність обчислень.

Зауважимо, що в диференціальному рівнянні (22) відома тільки кривизна натурної кривої K_g , а значення здвигів $u(s)$ можна визначити тільки тоді, якщо буде відома і кривизна проектної кривої K_p , тому проектна кривизна K_p розглядається як деяка функція керування.

Задача побудови проектної кривої формулюється так. Необхідно знайти таку проектну криву з m ділянками постійності кривизни (рис. 2), щоб заданий критерій якості проектної кривої $\bar{I}$ приймав оптимальне значення і виконувалися вимоги на значення здвига і куту повороту проектної кривої у кінцевій точці.

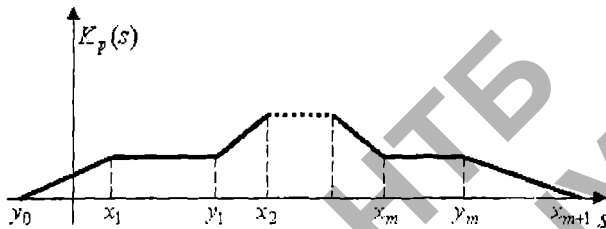


Рис. 2. Структура проектної кривої.

Як критерій оптимізації, приймається один із таких показників для проектної кривої

$$I_{МНМ} = \sum |u_i|; \quad (23)$$

$$I_{ММП} = \max |u_i|; \quad (24)$$

$$I_{МНК} = \sum u_i^2, \quad (25)$$

де u_i - величина здвигу в i -й точці. Крім того, повинні бути виконані рівності

$$\int_{y_0}^{S_k} K_g(s) ds = \int_{y_0}^{S_k} K_p(s) ds, \quad (26)$$

$$u(S_k) = 0, \quad (27)$$

де y_0 - початкова точка проектної кривої, S_k - кінцева точка на кривій, де проводиться здвиг. Умова (26) забезпечує збіг натурної кривої і проектної в кінцевій точці за напрямком, а умова (28) забезпечує нульовий здвиг в кінцевій точці. Величини здвигів визначаються по формулі

$$u(s) = \int_{y_0}^s \left(\int_{y_0}^t (K_g - K_p) dx \right) dt. \quad (28)$$

У четвертому розділі пропонується вирішення задачі проектування раціональної виправки залізничних кривих, обґрунтовується вибір методу розв'язання задачі, указуються необхідні початкові дані. Приведено алгоритм визначення раціональних здвигів для багаторадіусної залізничної кривої як розв'язання задачі пошуку глобального мінімуму. Описано алгоритм обчислення функції цілі і послідовність обчислювальних процедур для визначення здвигів по заданим натурній і проектній кривим.

Задача визначення раціональної проектної кривої зводиться до задачі на пошук глобального мінімуму функції

$$\min_{m, y_0, \{\delta_j\}, \{\Delta_i\}, \{K_{p_i}\}} F = I + \Phi, \quad j=0,1,\dots,m, \quad i=1,2,\dots,m. \quad (29)$$

де m - кількість ділянок із постійною кривизною ($m=1,2,\dots,M$), y_0 - початок проектної кривої, δ_j - значення довжин перехідних кривих, Δ_i - значення довжин кругових кривих, K_{p_i} - значення кривизни ділянки кругової кривої, Φ - функція штрафу за порушення вимог (26-27). При цьому повинні виконуватися нерівності $\underline{u}_i \leq u_i \leq \overline{u}_i$, $i \in N$ (N - множина точок поділу натурної кривої, у яких має місце обмеження), і обмеження на значення величин y_0 , δ_j , Δ_i з метою забезпечення технічних вимог

Функція цілі (29) обчислюється по алгоритму не диференціюється, має декілька зон локальних мінімумів. Тому, застосовано алгоритм багатомірного глобального пошуку мінімуму при обмеженнях на аргументи.

П'ятий розділ присвячений практичному використанню результатів досліджень для проектування залізничних кривих.

На основі системи Френе отримані формули для розрахунку в декартовій системі координат залізничної кривої, використовуючи значення кривизни кривої або куту повороту кривої. Наведені формули для обчислення куту повороту розглянутих перехідних кривих раціональної форми. Приведено приклад розрахунку координат перехідної кривої по відомій кривизні з використанням розв'язання системи Френе. Приводяться приклади проектування раціональних залізничних перехідних кривих з прямої на коло, з прямої на пряму для ділянки Одеської залізниці. Подано формули для обчислення куту повороту розглянутих раціональних перехідних кривих. Приведено приклад обчислення раціональних здвигів точок проектної кривої для заданої натурної по наведеному алгоритму. Представлено обґрунтування економічної ефективності запропонованого раціонального проектування виправки багаторадіусних залізничних кривих на прикладі проектування виправки деяких реальних кривих на перегоні Бескид-Скотарське Львівської залізниці і кривої промислового підприємства.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішена науково-технічна задача удосконалення проектування кривих залізничної колії в плані. Створені розрахункові моделі дозволяють: проектувати перехідні криві в плані з урахуванням основних динамічних вимог, що дає можливість поліпшити роботу системи колесо-рейка і як слідство – підвищити швидкість руху поїздів; визначати проектне положення багаторадіусної залізничної кривої для здійснення виправки колії в плані, забезпечуючи мінімальні трудовитрати.

Дисертація вміщує отримані автором нові науково-обґрунтовані та експериментально перевірені теоретичні результати, які в сукупності є суттєвими для проектування залізничних кривих в плані, тобто поставлені мета і задачі вирішені.

Виконані в даній роботі дослідження дозволяють зробити такі висновки і практичні пропозиції.

1. Проаналізовані раніш запропоновані вимоги до перехідних кривих, їхнє виконання і відповідні цим вимогам форми перехідних кривих. Встановлено, що в умовах швидкісного руху багато з запропонованих перехідних кривих не відповідають усім необхідним вимогам. З погляду цих вимог сформульовані геометричні й основні динамічні умови, що пред'являються для перехідних кривих.

Для забезпечення граничних умов для кутового прискорення на перехідній кривій необхідно, щоб перша похідна кривизни перехідної кривої у цих точках дорівнювала нулю. Щоб

кутове прискорення було обмежено наперед заданою величиною на ділянці перехідної кривої при постійній швидкості руху, необхідно відповісти обмеження на першу похідну кривизни перехідної кривої залізничної колії.

2. Радіоїдальна спіраль, застосовувана в даний час у якості перехідної кривої залізничної колії, не задовольняє вимогам у відношенні кутового прискорення в її початковій і кінцевій точці.

Вперше сформульована і вирішена задача побудови перехідної кривої раціональної форми. Під раціональною формою розуміється проектування з обмеженою другою похідною кривизни перехідної кривої такої довжини, щоб були виконані вимоги по кутовому прискоренню, непогашеному прискоренню, його зміні і крутизни відводу підвищення зовнішньої рейки.

Для забезпечення виконання вимог на ділянці перехідної кривої по непогашеному прискоренню, його зміні і крутизни відводу підвищення зовнішньої рейки достатньо, щоб були обмежені перша і друга похідна кривизни перехідної кривої. Виконання цих вимог дозволить полішити комфортність їзди і як слідство – збільшити швидкість руху.

4. Для випадків, коли неможливо улаштувати підвищення на внутрішній рейковій нитці через короткі прямі ділянки перед кривою пропонується використовувати рішення задачі про раціональну форму відводу підвищення зовнішньої рейки для перехідних кривих з урахуванням неодночасності початку відводу підвищення і кривизни.

S-образна форма відводу підвищення зовнішньої рейки забезпечує рівність нулю значень змін непогашеного прискорення на початку і наприкінці перехідної кривої, що сприяє більш м'якому уписуванню залізничного екіпажа в криву на відміну від лінійної форми підвищення.

5. Задача про визначення проектного положення багаторадіусної кривої залізничної колії в плані є задачею структуризації. Визначення проектного положення геометрично правильної багаторадіусної кривої залізничної колії зводиться до задачі на пошук глобального мінімуму з застосуванням процедури кластеризації.

Проектування виправки залізничної кривої як багаторадіусної дозволяє зменшити витрати на проведення її рихтування.

6. Вперше застосовано точне інтегрування наближеного (традиційного) диференціального рівняння здвигів по заданих структурах натурної і проєктної кривої. Це дозволяє більш точно обчислювати здвиги і у багатьох випадках дозволяє уникнути великих значень здвигів, які можуть утворюватися, якщо їх обчислювати як у методі евольвент.

7 Система Френе може бути використана як ефективна математична модель для опису геометрії залізничної колії. За допомогою системи Френе отримано точне рівняння здвигів для проєктної кривої. За допомогою рішення системи Френе отримані вирази для визначення координат положення залізничної кривої по заданій кривизні.

8. На основі досліджень розроблено програмне забезпечення для персональної ЕОМ розрахунку виправки кривих. Виконано конкретні розрахунки. За результатами розрахунків здійснювалося рихтування колії. Аналіз результатів розрахунків після виправки кривих показав, що викладені в роботі результати досліджень можна використовувати при проектуванні, реконструкції й утриманні залізничної колії.

9. Результати дисертаційної роботи використані для здійснення виправки залізничних кривих у 8-й дистанції колії Придніпровської залізниці, у ПЧ-5 Дебальцевської дирекції залізничних перевезень Донецької залізниці, в ВАТ «СВІТЛОФОР», м.Дніпропетровськ.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Лагута В.В. Определение параметров проектирования рациональной переходной кривой // Транспорт: Сб. науч. пр. Вып. №5. -Дніпропетровськ: Наука і освіта, -2000. -С. 88-91.

2. Лагута В.В. Определение рационального положения проектной кривой железнодорожного пути по заданной натурной // Транспорт: Сб. науч. тр. Вып. №8. -Дніпропетровськ, 2001. -С. 86-89.

3. Босов А.А., Лагута В.В. Рациональные переходные кривые железнодорожного транспорта // Математическое моделирование в задачах железнодорожного транспорта Межвуз. сб. научн. тр. ДИИТ. -Днепрпетровск, 1988. -С.4-11.

4. Босов А.А., Лагута В.В., Юнкевич В.Г. О рациональной форме отвода возвышения наружного рельса на переходных кривых // Исследования взаимодействия пути и современного подвижного состава: Межвуз. сб. науч. тр. ДИИТ. -Днепрпетровск, 1987. -С. 32-36.

5. Босов А.А., Рыбкин В.В., Лагута В.В. Проектирование рациональной выправки кривых железнодорожного пути // Математичне моделювання в інженерних та фінансово-економічних задачах: Сб. наук. пр. -Дніпропетровськ: Січ, 1998. -С.82-87.

6. Рыбкин В.В., Ренгач Н.Г. Лагута В.В. Уточнение математической модели алгоритма проектирования рациональной выправки кривых железнодорожного пути в плане // Математичне моделювання в інженерних та фінансово-економічних задачах: Сб. наук. пр. -Дніпропетровськ: Січ, 1998. -С.88-91.

7. Лагута В.В., Литвинов В.П. Математическое моделирование вписывания экипажа в криволинейные участки железнодорожного пути // Математичне моделювання в інженерних та фінансово-економічних задачах: Сб. наук. пр. -Дніпропетровськ: Січ, 1999. -С.150-155.

8. Лагута В.В. Определение рационального положения проектной кривой железнодорожного пути по заданной натурной // Проблеми економіки транспорту в умовах

реструктуризації. І Міжнародна наукова конф. Тези докл. –Дніпропетровськ: рекламно-видавничий відділ ДНТУ, 2001. –С.58-59.

9.Босов А.А., Лагута В.В. Достижимость в плоской задаче штурмана // Моделирование и исследование устойчивости систем (моделирование систем). Тезисы докладов конференции. –Киев. –1996. –С.21.

АНОТАЦІЯ

Лагута В.В. Удосконалення проектування кривих залізничної колії в плані. - Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.22.06 - залізнична колія.

- Дніпропетровський державний технічний університет залізничного транспорту, Дніпропетровськ, 2002.

Дисертація присвячена питанням проектування перехідних кривих для ділянок залізничної колії і проектуванню раціональної виправки багаторадіусних залізничних кривих.

Розглядаються: задача побудови перехідної кривої раціональної форми залізничної колії з прямої ділянки на кругову, задача побудови кривої раціональної форми між двома прямими ділянками залізничної колії, що знаходяться під кутом одна до одної, без кругової вставки, з виконанням обмеження на значення другої похідної кривизни. Запропоновано розв'язання задачі визначення параметрів проектування перехідної кривої раціональної форми.

Задача раціональної виправки багаторадіусної залізничної кривої розглянута з позиції мінімізації робіт на рихтовку колії з виконанням обмежень для здвигів у фіксованих точках натурної кривої. Представлено вирішення задачі визначення раціональної виправки кривої на основі теорії кривих, кластерного аналізу і глобальної оптимізації.

Ключові слова: залізнична колія, перехідна крива, поточне утримання колії, здвиги, рихтування кривої.

АННОТАЦИЯ

Лагута В.В. Совершенствование проектирования кривых железнодорожного пути в плане. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.22.06 – железнодорожный путь.

– Днепропетровский государственный технический университет железнодорожного транспорта, Днепропетровск. 2002.

Диссертация посвящена проектированию переходных кривых для участков железнодорожного пути и проектированию рациональной выправки много радиусных геометрически правильных кривых.

Проанализированы геометрические и динамические условия, касаемые углового ускорения, накладываемые на железнодорожный экипаж и переходную кривую.

Вводится понятие обобщенной переходной кривой железнодорожного пути как степенной бесконечный ряд (кривизна кривой представляется в виде степенного ряда). Описывается определение коэффициентов такого ряда при ограничении на производную кривизны переходной кривой.

В классе функций с ограниченной второй производной на основе принципа максимума Л.С.Понтрягина получено аналитическое выражение кривизны переходной кривой рациональной формы, сопрягающей прямой участок железнодорожного пути с круговым.

В классе функций с ограниченной второй производной на основе принципа максимума Л.С.Понтрягина получено аналитическое выражение кривизны кривой рациональной формы, сопрягающей один прямой участок пути с другим прямым участком, находящихся под углом друг к другу.

Параметры проектирования переходных кривых железнодорожного пути определяются из условий непревышения допустимого непогашенного ускорения, непревышения допустимого изменения непогашенного ускорения, непревышения допустимой величины крутизны отвода возвышения наружного рельса.

Для случаев, когда поезда движутся со скоростью больше равновесной и когда невозможно устроить возвышение на внутренней рельсовой нити из-за коротких прямых участков перед кривой, предлагается форма отвода возвышения наружного рельса на переходных кривых для одновременного начала отвода кривизны и возвышения.

В работе рассмотрена задача выправки много радиусной геометрически правильной кривой с позиции минимизации работ на проведение рихтовочных мероприятий с выполнением ограничений для сдвижек в фиксированных точках натурной кривой. Под проектированием выправки железнодорожной кривой в плане понимается определение кривой заданной структуры по положению натурной в соответствии со сдвижками, удовлетворяющих какому-либо критерию качества. Показателями оптимальности выбраны следующие: сумма квадратов сдвижек, сумма абсолютных значений сдвижек, максимальная по абсолютному значению сдвижка.

Структура проектной кривой задается: количеством участков постоянства кривизны, длинами участков переходных кривых и длинами участков круговых кривых, значением кривизны круговых кривых. Задача построения проектной кривой по заданной натурной сводится к оптимизационной задаче определения заданной структуры, минимизирующей какой-либо

критерий качества. Сдвиги проектного положения железнодорожной кривой определяются либо как точное решение приближенного дифференциального уравнения сдвижек, либо как приближенное решение нелинейного дифференциального уравнения сдвижек. Определение рациональной выправки кривой основывается на теории кривых, кластерного анализа и глобальной оптимизации. Предлагаемый подход определения проектного положения кривой рекомендуется применять для многорадиусных кривых, когда вычисленные сдвиги по какому-либо другому методу слишком велики и для рихтовки пути в текущее время малоприемлемы. В этом случае проектную кривую следует рассматривать как многорадиусную и применить предлагаемый расчет сдвижек. Расчетная проектная кривая обеспечивает минимальные трудозатраты и экономию материалов на рихтовку пути при выполнении нормативных требований по их текущему содержанию.

Предлагаемое решение можно применять и для путей промышленного транспорта, которые, как правило, всегда имеют сложную структуру.

Выполненные исследования по проектированию кривых железнодорожного пути показали, что система дифференциальных уравнений Френе представляет собой подходящую математическую модель, описывающую геометрию железнодорожных кривых.

На основании системы Френе получены формулы для расчета положения железнодорожной кривой в декартовой системе координат, используя значения кривизны. Приводятся примеры проектирования железнодорожных переходных кривых рациональной формы. Приведены примеры вычисления рациональных сдвижек проектной кривой для заданной натурной. Представлено обоснование экономической эффективности проектирования многорадиусных железнодорожных кривых.

Ключевые слова: железнодорожный путь, переходная кривая, текущее содержание железнодорожного пути, сдвигка, рихтовка кривой.

ABSTRACT

Laguta V.V – Improvement of designing of the railway curves in a plan. Manuscript.

Thesis for a candidate's degree by specialty 05.22.06 – Railway track. – Dnipropetrovsk State Technical University of Railway Transport, Dnipropetrovsk, 2002.

The thesis is devoted to designing of the transition curves for the railway lines and designing of a rational rectifier of the polyradius railway curves in a plan.

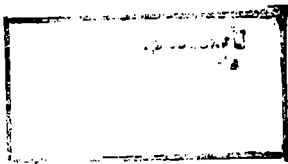
Both problem of designing of a rational form railway transition curve from a direct site on circular with performance of restrictions on second derivative of a track curvature and a problem of designing of a rational form transition curve between two direct sites of a railway taking place under a

corner to each other without a circular insertion with performance of restriction on second derivative of a track curvature are considered. In the thesis it is offered strategy of determination of the projekt parameters in the designing problem of the rational transition railway curves.

A problem of rational curve rectifier of the polyradius railway curves is considered as minimization of works and with performance of restrictions for the displacements in some points of the curve. The technique of definition rational design curve on given natural is developed on the basis of the theory curve, the cluster analysis and global optimization. The method, the algorithm and software for the definition of a rational design position of railway curves of any complexity in a plan are proposed.

Key words: railway, transition curve, current maintenance, displacement, curve rectifier.

6138a



НТБ
ДНУЗТ

**УДОСКОНАЛЕННЯ ПРОЕКТУВАННЯ КРИВИХ
ЗАЛІЗНИЧНОЇ КОЛІЇ В ПЛАНІ**

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукової ступені
кандидата технічних наук

Спеціальність 05.22.06 – залізнична колія

Підписано до друку 07.03.2002р. Формат 60х84 1/16. Папір офсетний.

Умовн.-друк. арк. 1.0. Обл.-вид. арк. 1.1. Замовлення №564. Тираж 100.

Безкоштовно.

Дніпропетровський державний технічний університет залізничного транспорту. Адреса університету та дільниці оперативної поліграфії ДНТУ: 49010 м.Дніпропетровськ, 10, вул. Академіка В.А.Лазаряна, 2

НТБ
ДНУЗТ