

УДК 514.18

Валерій БОРИСЕНКО

borisenko.valery@gmail.com

ORCID: 0000-0002-0857-0708

Оксана КОРЧАГІНА

Анжеліка РЯБОВА

м. Миколаїв

НОВИЙ ПІДХІД ДО МОДЕЛЮВАННЯ ПЕРЕХІДНИХ КРИВИХ ЗАЛІЗНИЧНОГО ШЛЯХУ

В статті розглядається питання геометричного моделювання перехідних кривих ділянок залізничного шляху, які влаштовуються між двома прямолінійними його рейками, розташованими під деяким кутом. Пропонується дві перехідні криві та кругову ділянку, які притаманні традиційному підходу до виконання перехідних кривих, замінити однією кривою у натуральній параметризації з розподілом кривини у вигляді полінома n 'ятого степеня. Розроблено програму розрахунків і візуалізації отриманих результатів на ПЕОМ.

Ключові слова: геометричне моделювання, перехідна крива, залізничний шлях, існуюча ділянка.

Постановка проблеми

Улаштування рейкової колії залізничного шляху на кривих її ділянках має низку особливостей, обумовлених специфікою взаємодії колії та рухомого складу, змінами конфігурації колії на криволінійних ділянках і наявністю так званих перехідних кривих, які з'єднують кругові криві з прилягаючими прямими рейками або з'єднують кругові криві різних радіусів кривини. Відомо, що призначенням перехідних кривих є забезпечення плавної зміни кривини в місцях з'єднання ділянок колії з різними сталими кривинами рейок.

Отже, перехідні криві використовуються для того, щоб кривина шляху в місці сполучення рейок з різною кривиною змінювалася плавно, а не стрибкоподібно. При з'єднанні прямолінійної та кругової ділянок потрібно забезпечити плавність перехідної кривої, а також рівність кутів нахилу дотичної, кривини на її кінцях, а похідна від кривини в кінцевих точках при цьому дорівнювала нулю.

Підвищення швидкості руху поїздів, їх вантажопідйомності та безпеки руху на криволінійних ділянках колії в значній мірі визначається геометричною досконалістю перехідних кривих цих ділянок. Таким чи-

ном, розробка нових підходів до геометричного моделювання перехідних кривих залізничних колій є важливою науково-технічною задачею.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Питанню подання перехідних кривих залізничних шляхів у літературі як вітчизняній, так і закордонній приділено достатньо уваги. Воно розглядається в статтях, підручниках, монографіях і дисертаціях [1-13]. Із публікацій, які оприлюднені останніми роками, можна відмітити наступні [3-5, 8-10]. Більшість з цих публікацій торкається питань моделювання перехідних кривих, які подаються в натуральній параметризації із застосуванням лінійних, квадратичних і кубічних залежностей кривини від довжини дуги. У цьому збірнику наведена стаття, автори якої пропонують моделювати перехідні криві для існуючих ділянок шляху також з використанням параметричних рівнянь із законом розподілу кривини у вигляді поліному четвертого степеня.

Постановка завдання

Метою цієї роботи є розробка нового підходу до геометричного моделювання

перехідних кривих залізничної колії, які влаштовуються між прямолінійними її рейками, розташованими під деяким кутом. При цьому передбачається заміна двох ділянок перехідних кривих і кругової ділянки, які формуються за традиційним підходом до розв'язання поставленої задачі, однією ділянкою, що подається параметричною кривою в натуральній параметризації з розподілом кривини у вигляді полінома п'ятого степеня.

Виклад основного матеріалу

Перш за все, визначимося з устроєм переходу між двома рейками, що перетинаються під деяким кутом. За традиційним підходом цей перехід реалізується наступним чином. Між першою прямолінійною рейкою та круговою ділянкою розташовують перехідну криву (рис. 1), за круговою ділянкою розташовують ще одну перехідну криву, призначену для плавного входу в другу прямолінійну рейку. Зазначимо, що на рис. 1 показано тільки частину переходу між двома прямими рейками, що перетинаються.

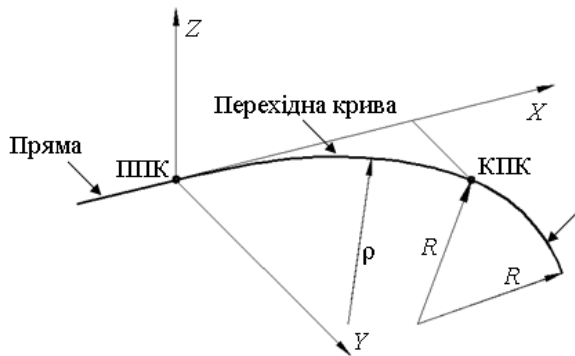


Рис. 1. Схема переходу від прямої рейки до кругової кривої (ППК, КПК – початок і кінець перехідної кривої)

Кривина перехідної кривої в початковій точці дорівнює нулю, а в кінцевій точці – величині оберненій радіусу кругової ділянки. На круговій ділянці кривина є величиною сталою.

Отже, для забезпечення переходу між двома прямолінійними рейками, розташованими під деяким кутом, необхідно сформулювати кругову ділянку та дві перехідні криві.

Треба додати, що ще однією важливою особливістю, яка приймається до розгляду при побудові перехідних кривих, є рівність нулю похідної від кривини в початковій і кінцевій точках перехідної кривої.

Таким чином, для моделювання перехідної кривої маємо наступні умови:

$$k(0) = 0; \quad \left. \frac{dk}{ds} \right|_{s=0} = 0, \quad (1)$$

де S – довжина перехідної кривої.

Для зменшення кількості ділянок при переході між двома прямолінійними рейками змодельємо перехідну криву параметричною кривою в натуральній її параметризації. При цьому опишемо залежність кривини від довжини дуги поліномом п'ятого степеня, взятому у такому вигляді:

$$k(s) = as^5 + bs^4 + cs^3 + ds^2 + es + f. \quad (2)$$

Похідна від кривини визначається залежністю:

$$\frac{dk(s)}{ds} = 5as^4 + 4bs^3 + 3cs^2 + ds + e. \quad (3)$$

Кут нахилу дотичної до модельованої кривої знаходиться за виразом:

$$\varphi_{\text{КПК}} = \varphi_{\text{ППК}} + \frac{aS^6}{6} + \frac{bS^5}{5} + \frac{cS^4}{4} + \frac{dS^3}{3} + \frac{eS^2}{2} + fS. \quad (4)$$

Застосувавши умови (1) до закону розподілу кривини (2) та її похідної (3), прийдемо до висновку, що $f = 0$ і $e = 0$. Оскільки кути $\varphi_{\text{ППК}}$ і $\varphi_{\text{КПК}}$ задані, то послідовним застосуванням виразів (2)-(4) знаходимо залежності для коефіцієнтів c , b і a :

$$c = 60 \frac{(\varphi_{\text{КПК}} - \varphi_{\text{ППК}})}{S^4} - \frac{4d}{S};$$

$$b = -\frac{2cS + 3d}{S^2};$$

$$a = -\frac{bS^2 + cS + d}{S^3}.$$

Коефіцієнт d і довжина дуги S визначаються шляхом розв'язання оптимізаційної задачі, пов'язаної з узгодженням проміжно отриманої кінцевої точки перехідної кривої із заданою за умовами моделювання кінцевою точкою.

Параметрична крива у натуральній параметризації описується наступними рівняннями:

$$x_{\text{КПК}} = x_{\text{НПК}} + \int_0^s \cos \varphi(s) ds ;$$

$$y_{\text{КПК}} = y_{\text{НПК}} + \int_0^s \sin \varphi(s) ds .$$

Оскільки координати кінцевої точки перехідної кривої відомі, то цих двох рівнянь достатньо для визначення двох невідомих, необхідних для моделювання бажаної кривої.

За запропонованим підходом до геометричного моделювання перехідної кривої розроблено програмний код, який, окрім розрахунків, дозволяв візуалізувати отримані результати.

На рис. 2 показані три змодельовані перехідні криві між двома перетинними прямими. На цьому рисунку зображені ділянки цих прямих, які знаходяться поза межами перехідних кривих. Моделювання кривих виконано на одиничному квадраті. Прямі рейки розташовані симетрично відносно вертикальної осі, що проходить по середині квадрата.

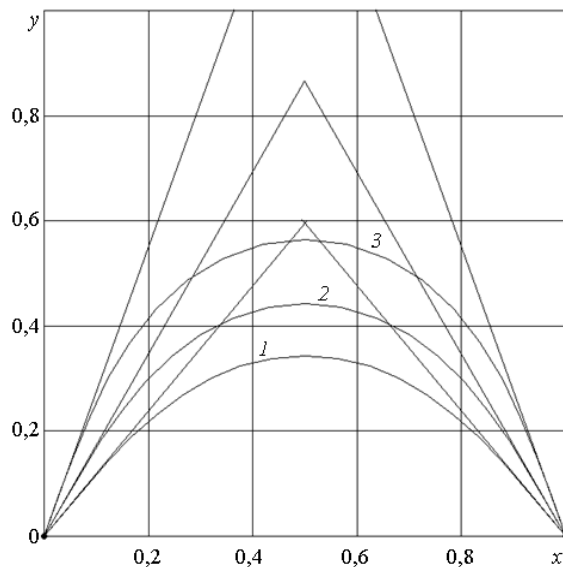


Рис. 2. Тестові перехідні криві між двома прямими рейками, що перетинаються

Всі змодельовані криві виходили з однієї точки, розташованій в початку координат. Криві закінчувалися також в одній і тій же

точці. Кут нахилу прямих рейок в початку координат, змінювався від 50° (крива 1) до 70° (крива 3) з кроком 10°. Кут нахилу рейок після перехідних кривих дорівнював вказанним кутам, але взятим з від'ємним знаком.

На рис. 3 наведені графіки розподілу кривини від відносної довжини дуги. Позначення кривих на цьому рисунку відповідає нумерації кривих, зображених на рис. 2. Щодо графіків кривини можна зробити висновки, що в початковій і кінцевій точках кривини має нульові значення. Для прийнятих умов побудови перехідних кривих графіки кривини мають симетричний характер.

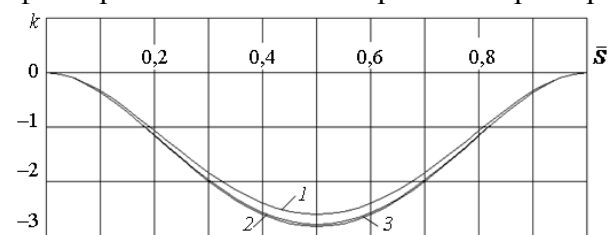


Рис. 3. Залежності кривини від відносної довжини дуги кривих

Криві, показані на рис. 4, відповідають розподілу похідних від кривини перехідних кривих, взятих по довжині дуги. За вісь абсцис, як і у випадку попереднього рисунку, взята відносна довжина дуги. Позначення кривих виконано у тій же послідовності, що й на вище зображених рисунках.

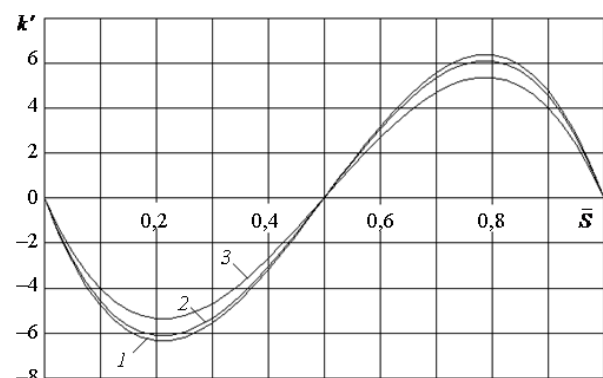


Рис. 4. Графіки залежності похідної кривини від довжини дуги

Як впливає з розгляду рис. 4, похідні в початковій і кінцевій точках мають нульові значення. Криві похідних мають форму наближену до синусоїдальної, що відповідає висновкам, які можна зробити з розгляду рис. 3.

На рис. 5-7 наведені результати моделювання перехідних кривих з асиметричним розташуванням прямих рейок. Відповідні розрахунки проводилися за умови, що кут нахилу прямих прямих рейок зростає за модулем на 15° по відношенню до кутів прямих рейок, розташованих ліворуч.

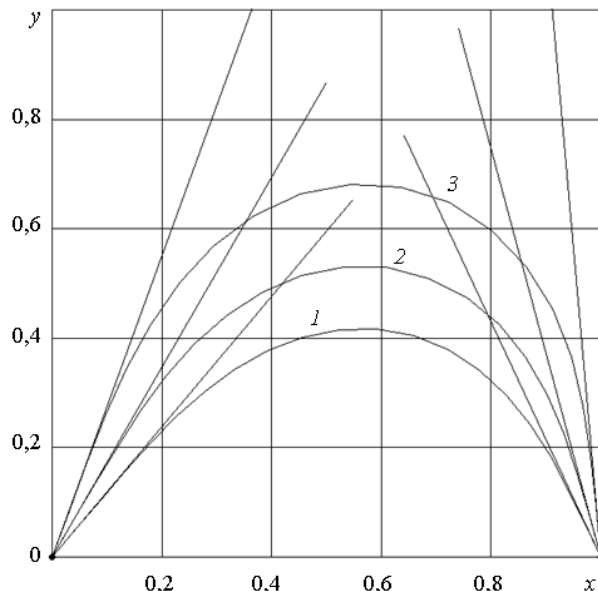


Рис. 5. Тестові перехідні криві між двома асиметрично розташованими прямими рейками

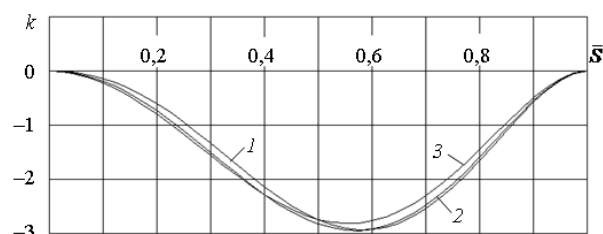


Рис. 6. Залежності кривини від відносної довжини дуги

Асиметричне розташування прямих рейок призвело порушення симетрії графіків розподілу кривини та її похідної. Але вимоги, які накладаються граничними умовами (1) повністю виконуються.

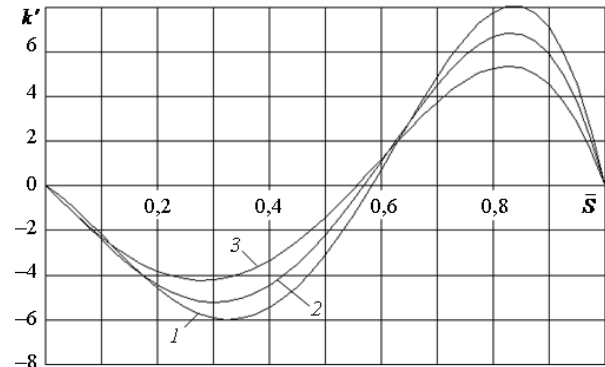


Рис. 7. Графіки залежності похідної кривини від довжини дуги

Висновки та перспективи подальших досліджень

Розроблено новий підхід до геометричного моделювання перехідних кривих, що базується на застосуванні кривих у натуральній параметризації з розподілом кривини, яка описується поліномом п'ятого степеня. Проведені розрахункові дослідження у широкому діапазоні варіювання вихідних даних підтвердили працездатність запропонованого підходу до моделювання перехідних кривих між прямими рейками залізничного шляху. Подальші дослідження слід спрямувати на розробку методу моделювання перехідних кривих між круговими ділянками залізничної колії.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Белятынський, А.А. Проектирование кривых при строительстве и реконструкции автомобильных дорог [Текст] / А.А. Белятынський, А.Н. Таранов. – К.: Выща школа, 1988. – 303 с.
2. Белятынський, А.А. Проектирование переходных кривых при реконструкции автомобильных дорог [Текст] / А.А. Белятынський, В.Н. Чешуйко // Автоматизированные технологии изыскания и проектирования, 2007. – № 2 (25). – С. 34–36.
3. Борисенко, В. Д. Моделювання перехідної кривої на обмеженій ділянці місцевості [Текст] / В. Д. Борисенко, С. А. Устенко // Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені Академіка В. Лазаряна, 2017, № 2 (68). – С. 92 – 100.
4. Діданов, С.В. Моделювання перехідної кривої з урахуванням підвищення зовнішньої рейки [Текст] / С.В. Діданов // Прикладна геометрія та інженерна графіка. – Мелітополь: ТДАТУ, 2013. – Вип. 4. – Том 56. – С. 47–51.

5. Діданов, С.В. Форми перехідних кривих залізничного шляху [Текст] / С.В. Діданов // Матеріали II-ї Міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених "Прикладна геометрія, дизайн та об'єкти інтелектуальної власності". Випуск 2. – К.: ДІА, 2013. – С.55–59.
6. Лагута, В.В. Удосконалення проектування кривих залізничної колії в плані: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.22.06 "Залізнична колія" [Текст] / В.В. Лагута. – Дніпропетровськ, 2002. – 18 с.
7. Лазарян, В.А. О форме переходной кривой (Теоретические основы выбора рациональной формы переходной кривой) [Текст] / В.А. Лазарян. – Динамика транспортных средств. – Киев: Наукова думка, 1985. – С. 10–24.
8. Устенко, С.А. Метод побудови просторової перехідної кривої [Текст] / С.А. Устенко, С.В. Діданов // Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – Д.: Вид. ДНУЖТ, 2013. – Вип. 2 (44) 2013. – С. 124–128.
9. Устенко, С.А. Моделювання просторової перехідної кривої [Текст] / С.А. Устенко, С.В. Діданов // Проблемы механики железнодорожного транспорта: Безопасность движения, динамика, прочность подвижного состава, энергосбережение. XIII Международная конференция. Тезисы докладов. – Д.: Изд-во ДНУЖТ, 2012. – С. 141.
10. Устенко, С.А. Просторові криві лінії заданих розподілів кривини та скруту [Текст] / С.А. Устенко, С.В. Діданов // Праці Харківського державного університету харчування та торгівлі. "Геометричне та комп'ютерне моделювання". – Х.: ХДУХТ, 2012. – Вип. 30. – С. 201–205.
11. Шахунянц, Г.М. Проектирование железнодорожного пути [Текст] / Г.М. Шахунянц. – М.: Транспорт, 1972. – 140 с.
12. Kellie, A.C. Location of Railroad Boundaries [Text] / Kellie A.C., Radwan A.E., Houck D.R.; International Survey. Eng, 1983. – Vol.109, №1. – P. 14–23.
13. Rao, M.S. Railway Curve Realignment by Microcomputer [Text] / M.S. Rao // Indian. Just Eng. (India) Civ. Eng. Div, 1982. – № 5. – P. 319–323.

Valery BORISENKO, Oxana KORCHAGINA, Angelika RYABOVA
Mykolayiv

A NEW APPROACH TO MODELLING TRANSITIONAL RAILWAY CURVES

In the article the question of geometrical modelling of transitional curves of sections of a railway track which are placed between two rectilinear rails located at some angle is considered. It is proposed two transition curves and a circular section inherent in the traditional approach to the implementation of the transition curves, replaced by one curve in the natural parameterization with curvature distributions in the form of a polynomial of the fifth degree. A program of calculations and visualization of the results obtained on a PC has been developed.

Keywords: *geometric modelling, transition curve, railway track, existing section.*

Валерий БОРИСЕНКО, Оксана КОРЧАГИНА, Анжелика РЯБОВА
Николаев

НОВЫЙ ПОДХОД К МОДЕЛИРОВАНИЮ ПЕРЕХОДНЫХ КРИВЫХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ

В статье рассматривается вопрос геометрического моделирования переходных кривых участков железнодорожного пути, которые размещаются между двумя прямолинейными его рейками, расположенными под некоторым углом. Предлагается две переходные кривые и круговой участок, присущие традиционному подходу к выполнению переходных кривых, заменить одной кривой в натуральной параметризации с распределением кривизны в виде полинома пятой степени. Разработана программа расчетов и визуализации полученных результатов на ПЭВМ.

Ключевые слова: *геометрическое моделирование, переходная кривая, железнодорожный путь, существующий участок.*

Стаття надійшла до редколегії 15.10.2017