

УДК 514.18

Сергій УСТЕНКО

ustenko.s.a@gmail.com

ORCID: 0000-0003-4968-1233

Владислав МАРТИНЕНКО

м. Миколаїв

ГЕОМЕТРИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПЕРЕХІДНИХ КРИВИХ ЗАЛІЗНИЧНОГО ШЛЯХУ ПРИ ВІДНОВЛЕННІ ЙОГО ОКРЕМИХ ДІЛЯНОК

В статті розглядається питання геометричного моделювання перехідних кривих ділянок залізничного шляху, які влаштовуються між прямолінійними та круговими його рейками. Подібні роботи виконуються при відновленні існуючих ділянок залізниці. Розроблено програму розрахунків і візуалізації отриманих результатів на ПЕОМ.

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

Постановка проблеми

На залізничних шляхах в кривих змінного радіуса (перехідних кривих) радіус колії змінюється від нескінченності до величини радіуса конкретної кругової кривої. Це безпосередньо впливає на безпеку руху рухомого складу і плавність його вписування в криволінійні ділянки шляху. На ділянках шляху, розташованих на місцевості зі складним рельєфом, переважаюча більшість витрат праці залізничного персоналу йде на поточне утримання саме кривих ділянок, де виникає великий боковий динамічний вплив. У кривих ділянках підвищується знос гребенів коліс і головок рейок, що, в свою чергу, збільшує матеріальні витрати на поточне утримання і ремонт колії, а також ремонт вагонів. Залізниці несуть великі фінансові витрати, пов'язані з обмеженням швидкостей руху поїздів в кривих.

Перед залізничниками постає проблема відновлення перехідних кривих шляху, що вимагає постійного моделювання кривих рейок. Існуючі методи виконання цих робіт не в повній мірі відповідають вимогам, які подаються до перехідних кривих. Вони не забезпечують рівності похідної від кривини по довжині дуги кривої на кінцях перехідної кривої, що приводить до додатковим динамічним впливам на кри-

волінійні ділянки шляху і, отже, швидкому зносу рейок.

У цій роботі пропонується метод моделювання перехідних кривих, який позбавлений цього недоліку.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Основи теорії перехідних кривих на залізниці були закладені на початку минулого століття і набули подальшого розвитку в роботах вітчизняних і закордонних дослідників [1, 5, 9, 10, 12, 13]. У цих публікаціях пропонується перехідні криві подавати клотоїдами, кардіоїдами, параболами різних степенів, лемніскатами Бернуллі, мажорантними, пружними, швидкісними та іншими кривими.

У літературі приділено достатньо уваги питанню моделювання кривих ліній для різних практичних додатків, у тому числі і тих, які застосовуються при описі кривих, придатних для подання залізничної колії [2, 8 та інші]. Автори цих робіт застосовують явну, неявну, параметричну форми опису кривих. Близькими до тематики цієї статті є роботи [4, 7].

Зазначимо, що всі вище перелічені криві не забезпечують рівності похідної від кривини дуги в місці переходу прямолінійної рейки в перехідну криву. Це мож-

на забезпечити застосуванням кривих, які задаються в натуральній параметризації. Моделюванню криволінійних обводів у натуральній параметризації присвячені наступні публікації [2, 3, 8]. У роботі [3] параметричні криві у натуральній параметризації застосовані до моделювання перехідних кривих на обмеженій ділянці місцевості з кубічним законом розподілу кривини в залежності від довжини дуги.

Постановка завдання

Метою цієї статті є викладення методу моделювання перехідних кривих залізничного шляху із застосуванням параметричних рівнянь кривих, які подаються в натуральній параметризації за умови, що їх кривина описується поліномом четвертого порядку в залежності від довжини дуги.

Виклад основного матеріалу

При з'єднанні прямолінійної та кругової ділянок залізничного шляху потрібно забезпечити плавність перехідної кривої, а також рівність кутів нахилу дотичної та кривини на її кінцях (рис. 1). При цьому виникають задачі, коли розташування прямолінійної та центра кругової ділянок має залишитись незмінним, наприклад, при побудові перехідної кривої для існуючої ділянки залізничного шляху.

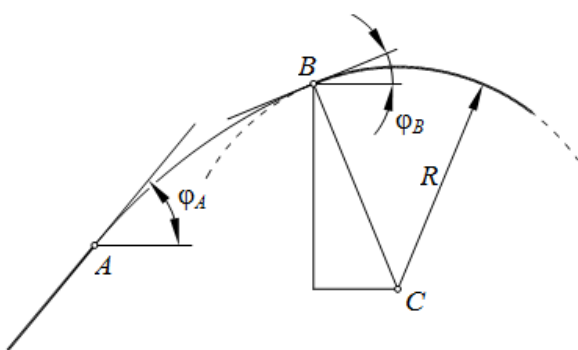


Рис. 1. До побудови перехідної кривої на існуючій ділянці залізничного шляху

У такому випадку можна взяти криву, яка генерується за умови, що задано графік розподілу кривини k четвертого порядку:

$$k(s) = as^4 + bs^3 + cs^2 + ds + e, \quad (1)$$

де a, b, c, d, e – коефіцієнти розподілу кривини; s – довжина кривої лінії.

Невідомі коефіцієнти залежності (1) та довжина кривої лінії s визначаються в процесі моделювання перехідної кривої.

Оскільки перехідна крива з'єднує прямолінійну та кругову ділянки, то в початковій точці A її кривина дорівнює нулю, а в кінцевій точці B – величині оберненій радіусу кола $1/R$. Крім того, для уникнення появи стрибкоподібного кутового прискорення при вписуванні екіпажу в криву похідна кривини на початку і в кінці перехідної кривої повинна дорівнювати нулю.

Похідна кривини визначається виразом:

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

Застосувавши граничні умови до залежностей (1) і (2), отримуємо наступні вирази для коефіцієнтів розподілу кривини:

$$a = \frac{c - \frac{3}{RS^2}}{S^2};$$

$$b = -2 \frac{c - \frac{2}{RS^2}}{S};$$

$$d = e = 0,$$

де S – довжина перехідної кривої від точки A до точки B , яка є невідомою.

Підставимо значення коефіцієнтів до виразу (1) і отримуємо:

$$k(s) = \frac{s^2}{S^2} \left[c(s - S)^2 + \frac{s}{RS^2} (4S - 3s) \right].$$

Вихідними даними для геометричного моделювання перехідної кривої будуть наступні: координати кінцевої точки A прямолінійної ділянки залізничного шляху, кут нахилу прямолінійної ділянки φ_A в її кінцевій точці, радіус кола кругової ділянки R та координати її центра C .

Залежність для визначення кута нахилу дотичної до кривої в довільній її точці визначатиметься виразом:

$$\varphi(s) = \varphi_A + \frac{s^3}{5S^4} \left[\frac{cS^2}{6} (6s^2 - 15sS + 10S^2) + \right]$$

$$\left. + \frac{s}{R}(5S - 3s) \right].$$

Кут нахилу дотичної φ_B до кругової ділянки обчислюватиметься за таким виразом:

$$\varphi_B = \varphi_A + \frac{S}{5} \left(\frac{cS^2}{6} + \frac{2}{R} \right).$$

Координати початкової точки B кругової ділянки можна визначити з елементарних міркувань:

$$x_B = x_C - R \sin \varphi_B;$$

$$y_B = y_C + R \cos \varphi_B.$$

З іншого боку, координати кінцевої точки B перехідної кривої будуть обчислюватися за формулами:

$$x_B = x_A + \int_0^S \cos \varphi(s) ds;$$

$$y_B = y_A + \int_0^S \sin \varphi(s) ds.$$

Оскільки це одна й та ж точка, то прирівнявши її відповідні координати, отримаємо два рівняння з двома невідомими a та S :

$$x_C - x_A - R \sin \varphi_B - \int_0^S \cos \varphi(s) ds = 0;$$

$$y_C - y_A + R \cos \varphi_B - \int_0^S \sin \varphi(s) ds = 0.$$

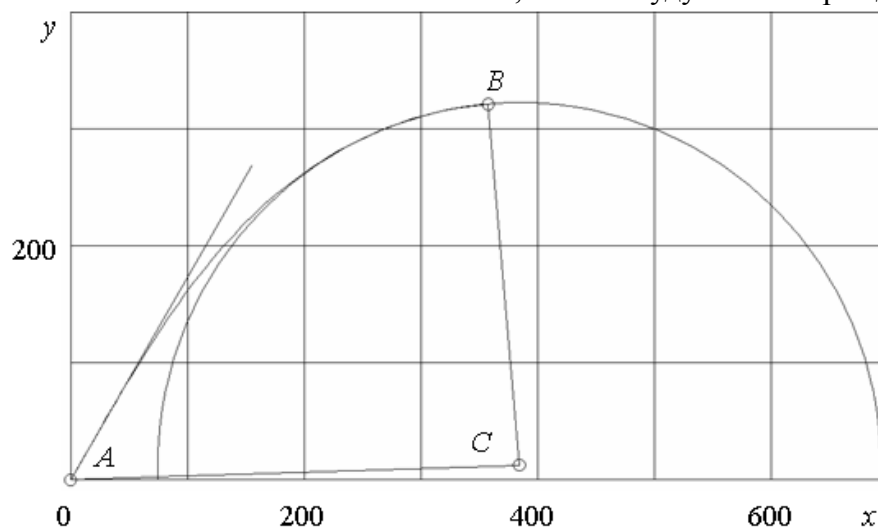


Рис. 2. Приклад перехідної кривої, побудованої для існуючої ділянки шляху

Після знаходження невідомих параметрів за допомогою числового методу мінімізації функції цілі, за яку прийнято відхилення проміжно отриманої кінцевої точки від заданої точки B , обчислюють координати перехідної кривої, які потім можна використовувати або для встановлення нових, або для контролю вже існуючих рейок.

Зазначимо, що мінімізація функції цілі в роботі застосовано високоефективний алгоритм, запропонований Хуком-Дживсом [11].

На рис. 2 представлені результати моделювання перехідної кривої AB , отриманої за таких вихідних даних: радіус кругової ділянки $R = 310$ м, координати центра кола $X_C = 384,5$ м, $Y_C = 12,6$ м, кут нахилу прямолінійної ділянки $\varphi_A = 60^\circ$. З розгляду рисунка випливає, що перехідна крива є дотичною до прямолінійної та кругової ділянок шляху.

На рис. 3 показані графіки розподілу кривини та похідної від неї, взятої по довжині дуги. Результати представлені в залежності від відносної довжини дуги кривої. Графік кривини свідчить про те, що ця характеристика кривої в початковій точці має нульове значення, а в кінцевій – оберненій величині радіуса кругової ділянки шляху. Похідна ж від кривини в цих точках має нульове значення. Тобто виконані всі умови, за яких будувалася перехідна крива.

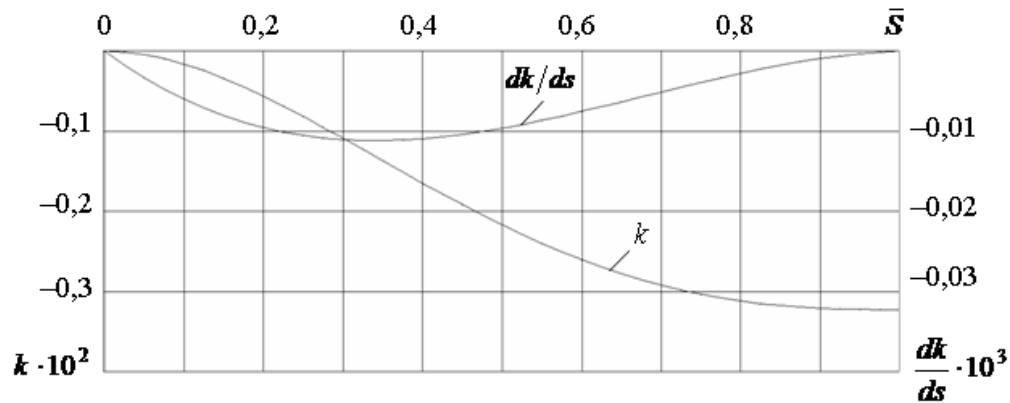


Рис. 3. Залежності кривини та її похідної від відносної довжини кривої

Висновки та перспективи подальших досліджень

Розроблено новий метод геометричного моделювання перехідних кривих, що базується на застосуванні розподілу кривини четвертого степеня. За граничні умови беруться координати кінця прямолінійної ділянки залізничного шляху, значення

кута нахилу цієї ділянки, радіус кругової ділянки, координати її центра, а також кривина в граничних точках перехідної кривої. Важливість запропонованого методу моделювання перехідної кривої полягає в тому, що він дозволяє будувати ці криві для вже існуючих залізничних шляхів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Амелин, С. В. Путь и путевое хозяйство [Текст] / С. В. Амелин, Л. М. Дановский. – Москва : Транспорт, 1986. – 215 с.
2. Борисенко, В. Д. Геометричне моделювання плоского криволінійного обводу із застосуванням кубічного закону розподілу його кривини [Текст] / В. Д. Борисенко, С. А. Устенко, В. С. Комар // Прикладна геометрія та інженерна графіка. – Київ : КНУБА, 2008. – Вип. 79. – С. 52-57.
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. Каменский, В.Б. Содержание железнодорожного пути в кривых [Текст] / В.Б. Каменский, Э.Я. Шац. – Москва : Транспорт, 1987. – 189 с.
5. Лагута, В. В. Удосконалення проектування кривих залізничної колії в плані [Текст] : автореф. дис.... канд. техн. наук : 05.22.06 / Лагута Василь Васильович ; Дніпропетр. держ. техн. ун-т залізн. трансп. – Дніпропетровськ, 2002. – 18 с.
6. 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.
7. Проценко, А. И. Методика расчета на ЭВМ сложных железнодорожных кривых при текущем содержании пути [Текст] / А. И. Проценко, В. Б. Бредюк // Сб. тр. НИИЖТ. – 1971. – Вып. 130. – С. 48-53.
8. Устенко, С. А. Дослідження кривих ліній, заданих кубічним розподілом кривини [Текст] / С. А. Устенко, С. В. Діданов, О. Ю. Агарков // Наука та прогрес транспорту. – 2014. – № 2 (50). – С. 164-172.
9. Шахуняц, Г. М. Проектирование железнодорожного пути [Текст] / Г. М. Шахуняц. – Москва : Транспорт, 1972. – 140 с.
10. Eliou, N. A new, simple and accurate transition curve type, for use in road and railway alignment design [Text] / N. Eliou, G. Kaliabetsos // European Transport Research Review. – 2014. No. 6. – P. 171-179. – doi 10.1007/s12544-013-0119-8

11. Hooke, R. Direct Search Solution of Numerical and Statistical Problems [Text] / R. Hooke, T. A. Jeeves // J. of the ACM. – 1961. – Vol. 8. – Iss. 2. – P. 212-229.
12. Lipicnik, M. New form of Road/Railway Transition Curve [Text] / M. Lipicnik // J. of Transportation Engineering. – 1998. – Vol. 124. – Iss. 6. – P. 546-556.
13. Tari, E. A new transition curve with enhanced properties [Text] / E. Tari, O. Baykal // Canadian J. of Civil Engineering. – 2005. – Vol. 32. – Iss. 5. – P. 913-923.

Serhii USTENKO, Vladislav MARTYNYENKO
Mykolayiv

GEOMETRICAL MODELLING OF TRANSITIONAL CURVES OF THE RAILWAY IN RESTORATION OF ITS EXISTING SECTIONS

In the article the question of geometrical modelling of transitional curves of sections of a railway track which are arranged between rectilinear and its circular rails is considered. Similar work is carried out while restoring existing sections of the railway. A program of calculations and visualization of the results obtained on a PC has been developed.

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

Сергей УСТЕНКО, Владислав МАРТЫНЕНКО
Николаев

ГЕОМЕТРИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ КРИВЫХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ ПРИ ВОССТАНОВЛЕНИИ ЕГО ОТДЕЛЬНЫХ УЧАСТКОВ

В статье рассматривается вопрос геометрического моделирования переходных кривых участков железнодорожного пути, которые вставляются между прямолинейными и круговыми его рельсами. Подобные работы выполняются при восстановлении существующих участков железной дороги. Разработана программа расчетов и визуализации полученных результатов на ПЭВМ.

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

Стаття надійшла до редколегії 12.10.2017