

## УДК 656.259.2

К. В. ГОНЧАРОВ – к.т.н., доцент, Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В.Лазаряна, goncharovkonv@gmail.com  
Н. А. НАГОРНА – студентка групи СК1821, Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В.Лазаряна

# ЗАСТОСУВАННЯ ШТУЧНИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ЛІНІЙНОЇ КООРДИНАТИ ПОЇЗДА

## Постановка проблеми

Пристрої локомотивної автоматики виконують цілий ряд функцій щодо забезпечення безпеки руху поїзда: прийом та дешифрування кодів автоматичної локомотивної сигналізації, керування локомотивним світлофором, перевірку пильності машиніста, контроль швидкості руху поїзда та автоматичне екстрене гальмування у разі порушення умов безпеки [2, 4, 9]. В сучасних локомотивних пристроях забезпечення безпеки руху поїзда перелік функцій суттєво розширюється, зокрема додаються контроль швидкості з урахуванням постійних та тимчасових обмежень, визначення відстані до перешкоди, а також різних залізничних об'єктів (світлофора, стрілки, переїзду та ін.), розрахунок кривої гальмування з урахуванням відстані до світлофора із забороненим показанням [1, 6]. Для виконання таких функцій пристрій локомотивної автоматики повинен визначати лінійну залізничну координату поїзда.

На сьогоднішній день застосовуються в основному два методи визначення лінійної координати поїзда. Перший передбачає використання бортових пристроїв одометрії та спеціальних індуктивних колійних прийомовідповідачів (баліз), які виконують роль своєрідних електронних маркерів [3]. Балізи розташовуються в певних опорних точках всередині колії, до їх пам'яті записується інформація про поточну лінійну координату та обмеження швидкості для даної ділянки. Під час руху поїзда над балізою за рахунок індуктивного зв'язку локо-

мотивна апаратура зчитує інформацію з балізи та визначає лінійну координату. Далі за допомогою бортового одометра визначається відстань, яку проїхав поїзд від останньої балізи та розраховується поточна лінійна координата. Такий підхід застосовується, зокрема, в Європейській системі керування залізничними перевезеннями ERTMS, Китайській системі керування рухом поїздів CTCS та інших подібних системах [1, 12]. Недоліком такого методу є похибка бортового одометра, принцип дії якого, як правило, базується на підрахунку числа оборотів колісної пари. Крім цього, такий підхід потребує наявності додаткових колійних пристроїв – баліз, які традиційно достатньо широко застосовуються в країнах західної Європи, але в Україні не використовуються.

В другому методі визначення лінійної координати поїзда використовується локомотивний модуль супутникової навігації та електронна карта, до якої записуються географічні та відповідні лінійні координати різних залізничних об'єктів для даного маршруту та опорних точок (прив'язок), в якості яких, як правило, використовуються кілометрові стовпчики. За допомогою модуля супутникової навігації визначається поточна географічна координата поїзда (довгота та широта), далі виконується пошук двох найближчих опорних точок в електронній карті та виконується розрахунок поточної лінійної координати поїзда. Такий підхід застосовується, наприклад, в російській локомотивній системі забезпечення безпеки руху поїзда КЛУБ-У [6], яка

експлуатується в деяких країнах пострадянського простору, в тому числі і в Україні, а також в українській системі ImproTRAIN-250. Аналогічні рішення використовуються також в американській системі керування рухом поїздів ITCS. На нашу думку такий метод є більш прийнятним для України, так як не потребує встановлення додаткового обладнання (баліз) вздовж залізничної колії. Проте в системі КЛУБ-У та її аналогах при визначенні поточної координати поїзда не враховується кривизна та профіль колії [7]. Вважається, що ділянка між найближчими до поїзда опорними точками (кілометровими стовпчиками) є прямолінійною. У зв'язку із цим лінійна координата визначається з похибкою.

### Мета роботи

Метою даної роботи є розробка принципів застосування штучних нейронних мереж для точного визначення лінійної координати поїзда.

### Похибка визначення лінійної координати поїзда

Проведемо оцінку похибку визначення лінійної координати поїзда. Припустимо, що поїзд рухається по ділянці, радіус кривизни якої є постійним. Схематично така ділянка зображена на рис. 1. Найближча до поїзда опорна точка  $A$  має декартові координати  $x_A, y_A$  та відповідну лінійну координату  $l_A$ . Припустимо, що голова поїзда знаходиться в точці  $C$  з декартовими координатами  $x_C, y_C$ . Тоді поточна лінійна координата поїзда

$$l_C = l_A \pm L, \quad (1)$$

де  $L$  – довжина дуги, яка поєднує точки  $A$  та  $C$ . Знак у виразі (1) визначається шляхом порівняння лінійних координат двох найближчих до поїзда опорних точок.

Довжина дуги  $L$  залежить від радіуса кривизни колії  $R$  та кута  $\alpha$  (див. рис. 1).

$$L = \frac{\pi R \alpha}{180} \quad (2)$$

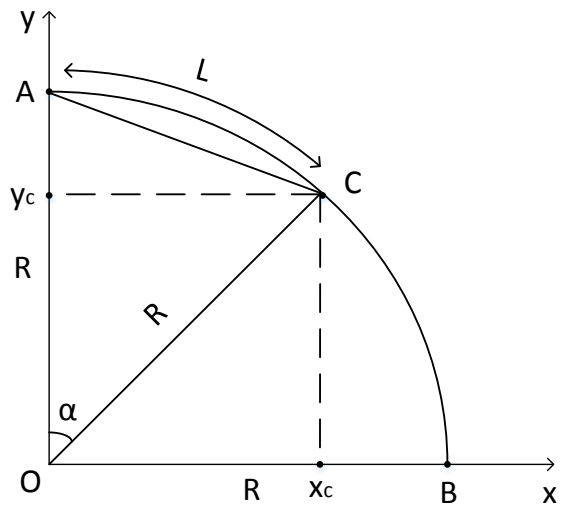


Рис. 1. Схема для визначення похибки лінійної координати

В існуючих системах локомотивної безпеки при визначенні лінійної координати поїзда не враховується кривизна колії [7]. Таким чином, замість довжини дуги  $L$  визначається довжина відрізка  $AC$

$$AC = \sqrt{(x_A - x_C)^2 + (y_A - y_C)^2}. \quad (3)$$

Відповідно до обраної моделі координати точок  $A$  та  $C$  визначаються наступним чином:  $x_A = 0, y_A = R, x_C = R \cdot \sin \alpha, y_C = R \cdot \cos \alpha$ .

Похибка визначення лінійної координати поїзда без врахування кривизни колії представляє собою різницю між довжиною дуги  $L$  та довжиною відрізка  $AC$

$$\Delta L = L - AC. \quad (4)$$

Слід зазначити, що система супутникової навігації визначає не декартові, а географічні координати. При цьому довжина відрізка  $AC$  визначається наступним чином

$$AC = \sqrt{(\Delta L_\varphi (\varphi_A - \varphi_C))^2 + (\Delta L_\lambda (\lambda_A - \lambda_C))^2},$$

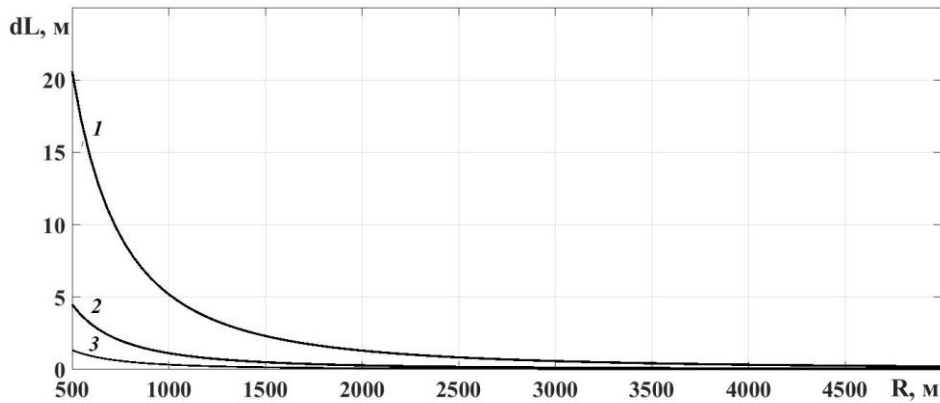


Рис. 2. Залежність похибки від радіуса кривизни:  
 1 – відстань до опорної точки 500 м; 2 – 300 м; 3 – 200 м

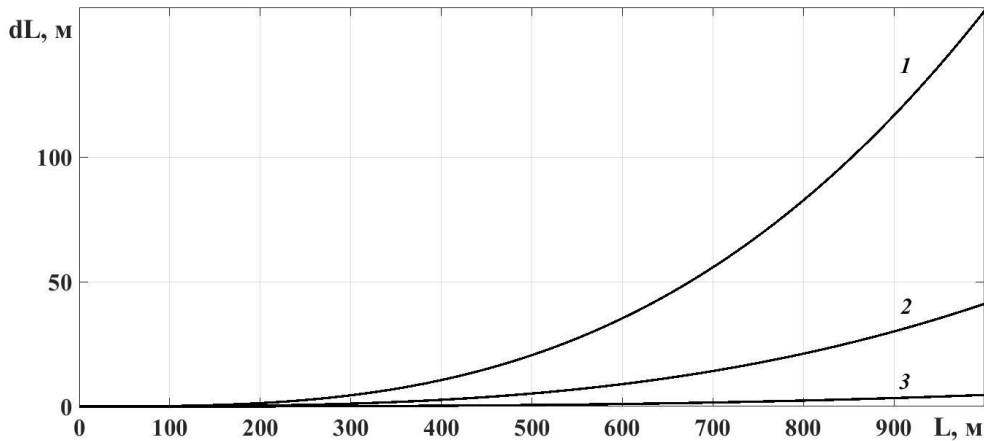


Рис. 3. Залежність похибки від відстані до опорної точки  
 1 – радіус кривизни 500 м; 2 – 1000 м; 3 – 3000 м

де  $\Delta L_\varphi = \frac{2\pi R_3}{360^\circ}$  – питома відстань на один градус широти;  $\Delta L_\lambda = \frac{2\pi R_n}{360^\circ}$  – питома відстань на один градус довготи;  $R_n \approx R_3 \cdot \cos(\varphi_{cep})$  – радіус паралелі для даної широти;  $\varphi_{cep} = (\varphi_A + \varphi_C) / 2$ ;  $(\varphi_A; \lambda_A)$  – широта і довгота точки А;  $(\varphi_C; \lambda_C)$  – широта і довгота точки С;  $R_3$  – радіус Землі.

За допомогою пакету MATLAB відповідно до виразів (1) – (4) були проведені розрахунки похибки лінійної координати при різних значеннях радіуса кривизни та відстані до найближчої опорної точки. Отримані залежності представлені на рис. 2, 3.

Як показують результати, похибка складає десятки метрів, а в деяких випадках може перевищувати 100 м. Її значення збільшується зі зменшенням радіуса кривизни та збільшенням відстані до опорної точки. Для розрахунку кривої гальмування поїзда така похибка є занадто великою. У зв'язку із цим задача удосконалення методу визначення лінійної координати є актуальною.

### Застосування нейронної мережі для визначення лінійної координати

Штучні нейронні мережі дозволяють виконувати різноманітні задачі: розпізнавання та класифікацію, апроксимацію функцій, стиснення даних, організацію асоціативної

пам'яті, оптимізаційні задачі, керування складними процесами, прогнозування та ін. Вони мають такі властивості, як адаптивне навчання, самоорганізацію, узагальнення, обчислення в реальному часі та стійкість до перебоїв [5, 8].

Для підвищення точності визначення лінійної координати поїзда пропонуємо використовувати штучну нейронну мережу для апроксимації залізничних кривих, а також записувати в електронну карту в якості опорних точок не лише кілометрові, але і пікетні стовпчики. Для вирішення задачі апроксимації була обрана нейронна мережа з радіально-базисними функціями, яка має два входи та один вихід (рис. 4). На входи подаються поточні географічні координати ( $\varphi_x, \lambda_x$ ), а на виході формується відповідна лінійна координата  $L_x$ .



Рис. 4. Нейронна мережа для визначення лінійної координати поїзда

Пропонується наступний алгоритм. За допомогою модуля супутникової навігації визначаються поточні географічні координати поїзда. Далі аналізується кілометрова ділянка, на якій знаходиться поїзд. З електронної карти зчитуються географічні та відповідні лінійні координати десяти опорних точок для даної ділянки. Ці дані застосовуються для навчання нейронної мережі. Таким чином здійснюється апроксимація залізничної ділянки. Після цього на вхід мережі подаються поточні географічні координати поїзда, а на виході формується відповідна лінійна координата.

## Результати моделювання

За допомогою пакету MATLAB було проведено моделювання роботи нейронної мережі для різноманітних залізничних ділянок довжиною один кілометр з різним радіусом кривизни та конфігурацією. В роботі використовували додаток Google maps. На рис. 5 в якості прикладу показані дві тестові залізничні ділянки довжиною 1 км. Червоними маркерами позначені опорні точки, географічні та відповідні лінійні координати яких представлені у табл. 1. Ці дані використовували для навчання нейронної мережі.

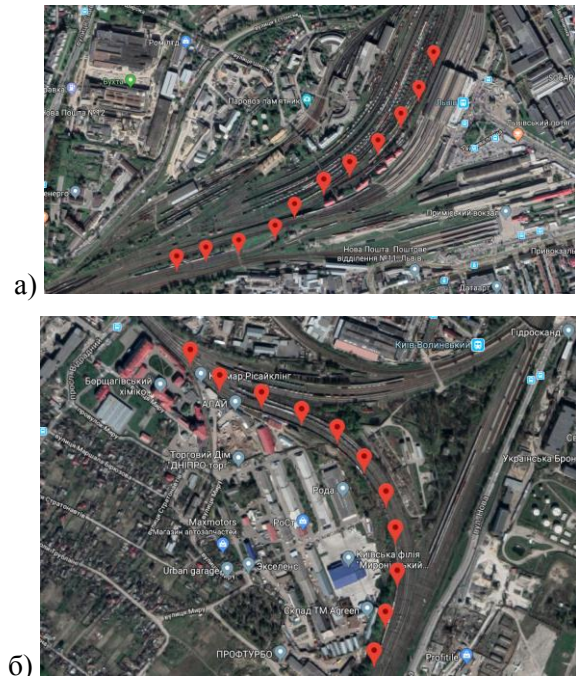


Рис. 5. Розташування опорних точок: а – тестова ділянка 1; б – тестова ділянка 2

На наступному етапі дослідження для кожної ділянки були обрані десять довільних точок, розташованих між опорними точками. Географічні координати цих точок подавались на вхід нейронної мережі. В табл. 2, 3 представлені дійсні лінійні координати тестових точок та результати роботи нейронної мережі. Видно, що похибка не перевищує трьох метрів.

Таблиця 1

Координати опорних точок

Тестова ділянка 1		Тестова ділянка 2	
Лінійні координати, м	Географічні координати	Лінійні координати, м	Географічні координати
0	(49.840649; 23.993171)	0	(50.405076; 30.426555)
100	(49.839744; 23.992558)	100	(50.405943; 30.426964)
200	(49.838990; 23.991809)	200	(50.406810; 30.427325)
300	(49.838311; 23.990918)	300	(50.407709; 30.427316)
400	(49.837762; 23.989828)	400	(50.408571; 30.426940)
500	(49.837278; 23.988667)	500	(50.409338; 30.426226)
600	(49.836702; 23.987612)	600	(50.409966; 30.425231)
700	(49.836082; 23.986625)	700	(50.409966; 30.425231)
800	(49.835722; 23.985222)	800	(50.409966; 30.425231)
900	(49.835489; 23.983892)	900	(50.411078; 30.421412)
1000	(49.835289; 23.982688)	1000	(50.411658; 30.420356)

Таблиця 2

Результати моделювання для тестової ділянки 1

Географічна координата	Дійсна лінійна координата, м	Лінійна координата, визначена нейронною мережею, м
(49.840232; 23.992918)	40	42.8244
(49.839355; 23.992206)	150	148.4228
(49.838706; 23.991475)	240	240.1886
(49.838012; 23.990403)	350	352.4115
(49.837582; 23.989347)	440	440.1267
(49.837187; 23.988428)	520	518.7663
(49.836243; 23.986954)	670	668.9398
(49.835950; 23.986271)	730	727.8274
(49.835585; 23.984420)	860	860.0691
(49.835424; 23.983494)	930	932.4207

Таблиця 3

Результати моделювання для тестової ділянки 2

Географічна координата	Дійсна лінійна координата, м	Лінійна координата, визначена нейронною мережею, м
(50.405335; 30.426700)	30	30.3656
(50.406372; 30.427177)	150	150.5961
(50.407081; 30.427365)	230	227.7181
(50.408320; 30.427088)	370	370.1156
(50.408970; 30.426625)	450	450.7748
(50.409732; 30.425653)	560	560.9745
(50.410066; 30.424997)	620	620.4122
(50.410625; 30.424079)	770	767.3279
(50.410808; 30.422294)	830	828.8092
(50.411538; 30.420554)	980	981.0844

Відомо, що модуль супутникової навігації може давати похибку в межах 5...10 метрів. В результаті моделювання було встановлено, що нейронна мережа давала достатньо точну лінійну координату навіть у разі перпендикулярного відхилення точки від залізничної лінії до десяти метрів, тобто частково компенсувалась похибка супутникової навігації. Таким чином, запропонований метод визначення лінійної координати є достатньо ефективним і може бути використаним для удосконалення алгоритму роботи локомотивних пристроїв забезпечення безпеки руху поїзда.

### Висновки

1. В сучасних локомотивних пристроях забезпечення безпеки руху поїзда визначається лінійна залізнична координата поїзда, що дозволяє знайти відстань до перешкоди та розрахувати криву гальмування. Для вирішення таких задач використовується локомотивний модуль супутникової навігації та електронна карта. При цьому не враховується кривизна та профіль колії.

2. Було встановлено, що похибка традиційного метода визначення лінійної координати поїзда складає десятки метрів, а в деяких випадках може перевищувати 100 м. Для розрахунку кривої гальмування поїзда така похибка є занадто великою.

3. Для зменшення похибки запропоновано проводити апроксимацію залізничних кривих за допомогою штучної нейронної мережі, а також записувати в електронну карту в якості опорних точок не лише кілометрові, але і пікетні стовпчики.

4. В результаті моделювання було встановлено, що для різних тестових залізничних ділянок нейронна мережа визначала лінійну координату поїзда з похибкою не більше трьох метрів.

5. Запропонований метод може бути використаним для удосконалення алгоритму

роботи локомотивних пристроїв забезпечення безпеки руху поїзда.

### Бібліографічний список

1. Бергер, Р. Координация внедрения системы ETCS на европейской сети [Текст] / Р. Бергер // Железные дороги мира. – 2005. – № 10. – С. 57-61.
2. Брылеев, А. М. Автоматическая локомотивная сигнализация и авторегулировка [Текст] / А. М. Брылеев, О. Поупе, В. С. Дмитриев и др. – М.: Транспорт, 1981. – 320 с.
3. Гончаров, К. В. Моделювання та дослідження точкового каналу зв'язку «колія-локомотив» [Текст] / К. В. Гончаров, Ю. В. Бурковський // Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті. – 2015. – № 10. – С. 53-61.
4. Гончаров, К. В. Синтез цифрового локомотивного приемника автоматической локомотивной сигнализации [Текст] / К. В. Гончаров // Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту. – 2013. – Вип. 1 (43). – С. 30-38.
5. Дьяконов, В. Математические пакеты расширения MATLAB. Специальный справочник [Текст] / В. Дьяконов, В. Круглов. – СПб.: Питер, 2001. – 480 с.
6. Зорин, В. И. Унифицированное комплексное локомотивное устройство безопасности (КЛУБ-У) [Текст] / В. И. Зорин, В. И. Астрахан. – М.: ГОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2008. – 177 с.
7. Розенберг, Е. Н. Определение железнодорожной координаты в координатной системе интервального регулирования движения поездов [Текст] / Е. Н. Розенберг, В. Г. Новиков // Про-

- блемы железнодорожного транспорта. – М.: Интекст, 2011. – С. 56-61.
8. Ростовцев, В. С. Искусственные нейронные сети [Текст] / В. С. Ростовцев. – СПб.: Лань, 2019. – 216 с.
9. Системы железнодорожной автоматики и телемеханики [Текст] / Ю. А. Кравцов и др. – М.: Транспорт, 1996. – 400 с.
10. Скалозуб, В. В. Интеллектуальные транспортные системы железнодорожного транспорта (основы инновационных технологий) [Текст] / В. В. Скалозуб, В. П. Соловьев, И. В. Жуковицкий, К. В. Гончаров. – Д.: ДНУЗТ, 2013. – 200 с.
11. Соловьев, Ю. А. Системы спутниковой навигации [Текст] / Ю. А. Соловьев. – М.: Эко-Трендз, 2000. – 260 с.
12. Theeg, G. Railway Signalling and Interlocking. International Compendium [Text]

/ G. Theeg, S. Vlasenko. – Hamburg: Eurailpress, 2009. – 448 p.

**Ключові слова:** локомотивна автоматика, лінійна координата поїзда, супутникова навігація, нейронна мережа.

**Ключевые слова:** локомотивная автоматика, линейная координата поезда, спутниковая навигация, нейронная сеть.

**Keywords:** locomotive automation, linear coordinate of train, satellite navigation, neural network.

**Рецензенти:**

проф., д.т.н., А. Б. Бойнік,  
проф., д.ф.-м.н., В.І. Гаврилюк.

Надійшла до редколегії 15.10.2019.

Прийнята до друку 28.10.2019.