
ГЕОДЕЗІЯ ТА ЗЕМЛЕУСТРІЙ (193)

УДК 528.117

ОПТИМІЗАЦІЯ РОЗМІЩЕННЯ ТОЧОК УМОВНОЇ РЕПЕРНОЇ МЕРЕЖІ ДЛЯ КРИВИХ ДІЛЯНОК ЗАЛІЗНИЦЬ

Д-р екон. наук К. А. Мамонов, кандидати техн. наук О. С. Саяпін, Є. Ф. Орел, С. М. Камчатна, О. М. Пустовойтова

PLACEMENT OPTIMIZATION OF THE POINTS OF THE CONDITIONAL REPER NETWORK FOR RAILWAY CURVES

D. Sc. (Econ.) K. Mamonov, PhD (Tech.) O. Saiapin, PhD (Tech.) Y. Orel, PhD (Tech.) S. Kamchatna, PhD (Tech.) O. Pustovoitova

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.201.2022.267757>



Анотація. Контроль геодезичних параметрів дуже важливий для безпеки руху на залізниці. Такий контроль необхідно проводити регулярно через відхилення осі колії внаслідок руху поїздів. Метою статті є розроблення математичного обґрунтування розміщення залізничних реперів для створення «власної» умовної реперної мережі залізниці. Ці постійні репери є основними точками як для етапу будівництва, так і етапу експлуатації. Описано метод і отримано координати кривої від будь-якої точки умовної реперної мережі залізниці.

Ключові слова: геодезична реперна мережа, залізнична крива, координати, точність.

Abstract. Railway facilities are responsible and complex structures related to the safety of passenger traffic and cargo transportation. To ensure the reliability of all systems, the railway track needs continual control of its geometric parameters. Railways require high accuracy of survey and monitoring both at the construction stage and at the operation stage. Such control can be carried out using control points of the geodetic benchmark network. These control points must be located near the railway track to provide it in the design position and in proper working condition. That is why the development of "own" railways benchmark network is topical.

The purpose of this article is to create a mathematical basis for calculating the locations of own repers near the railway. These benchmarks will be control points that will be used by track-operation stations, track machine stations, engineering and geodetic departments, track-surveying stations, services and departments, as well as project and construction organizations during research, design, operation, repair, reconstruction, or new construction. This will keep the track in good condition and be used for leveling the track during repair work. The paper considers the calculation method for the placement of control points of the conditional benchmark network on the curved section of the railway. The novelty is the usage of the mean-value theorem of integral calculus to calculate the coordinates of the curve independently of the national geodetic network. The creation of "own" conditional benchmark network allows railways to perform the pegging of lines and curves regardless of the presence or remoteness of control points of the local or state geodetic network. After choosing a conditional benchmark, the coordinates of the railway curve, which is divided into 5 parts, were calculated. It is shown that the number of points does not affect the accuracy of determining the coordinates. Thus, fewer rappers can be dispensed, and the speed of the pegging will increase. The polar coordinates for the two polar distances from the conventional benchmark have been

determined. It is established that the use of the mean-value theorem of the integral calculus to find the coordinates of a point gives more accurate data, since this method does not involve replacing the arc with a chord. The described method of determining polar coordinates from any point of one's own network of conditional benchmarks is of practical importance. After deviating the axis of the track from the movement of trains, maintenance workers can put it back without additional calculation.

Keywords: *geodetic benchmark network, railway curve, coordinates, accuracy.*

Вступ. Залізничні об'єкти є відповідальними і складними спорудами, пов'язаними з безпекою руху пасажирів і перевезення вантажів. Для забезпечення надійності всіх систем залізнична колія потребує постійного контролю її геометричних параметрів. Залізниці вимагають високої точності вишукувань і моніторингу як на етапі будівництва, так і етапі експлуатації. Такий контроль можна здійснювати з використанням опорних пунктів геодезичної реперної мережі. Ці контрольні пункти мають бути розташовані поблизу залізничної колії для забезпечення утримання її у проєктному положенні та належного робочого стану. Для цього контролю можна використовувати національну геодезичну мережу або локальну геодезичну мережу. Однак колійні працівники можуть зіткнутися з деякими труднощами. По-перше, пункти державної або місцевої геодезичної мережі іноді розміщено далеко від залізничної колії. Між геодезичними реперами та залізницею можуть перебувати природні або штучні об'єкти, наприклад дерева, пагорби, споруди тощо. Це ускладнює видимість і погіршує якість зйомки місця розташування. По-друге, частина орієнтирів може бути знищена. Наприклад, дослідження [1, 2] показують, що близько 50 % точок було знищено, пошкоджено, не перевірено або не знайдено. Крім того, розвиток глобальної супутникової навігаційної системи дав можливість створювати геодезичні мережі з високою точністю, що забезпечує можливість проведення геодезичних вимірювань з міліметровою точністю. Але точність локальних мереж відповідає часу їх

створення. Необхідна точність порівняно з національною геодезичною мережею в деяких випадках не може бути дотримана [2]. У результаті виникають проблеми з узгодженням даних вимірювань, отриманих з однієї мережі в різний час. Це робить актуальною роботу зі створення власної реперної мережі залізниць.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Одним із важливих і мало проаналізованих етапів технічного обслуговування залізниці є визначення стану колії відповідно до рівня, ширини колії та розташування в плані [3]. Це дослідження демонструє розбіжність між даними, отриманими за допомогою колієвимірювальної машини та геодезичного контролю. Як показано [3], дорожньо-геодезична машина, що декларує високу точність, може оцінити лише можливість проходження поїзда, але вона жодним чином не ідентифікує повне просідання колії чи її відхилення. Геодезичні машини можуть проводити зйомку та ефективно виявляти відмінності, якщо відстань між відхиленнями становить щонайменше 18 м. Геодезичне обладнання дозволяє проводити точкову зйомку через кожні 5 м. Дані оцінюються як єдине ціле (прямі, поперечні та криві сегменти). Уточнюється загальний ухил ділянки залізниці. Геодезичні машини не можуть оцінити цей факт. Зміни геометрії кривих мають значний вплив на обмеження швидкості руху поїздів. Під час оцінювання стану колії за даними колієвимірювального вагона може виникнути така ситуація, коли фактичні характеристики ділянки показують, що вона придатна для експлуатації і жоден із показників не

змінився до значення, коли швидкість поїзда має бути зменшена. З іншого боку, якщо порівнювати геометрію колії з початковими проєктними даними, можна помітити розбіжності. У цьому випадку межа розбіжностей може бути значно перевищена. І хоч вагон-колієвимірвач не зафіксував значних відхилень, які призведуть до обмеження швидкості, проте колія не відповідає вихідній геометрії та придатна для використання лише завдяки додатковим резервованим відстаням.

У роботі [4] описано точне позиціонування за допомогою глобальної навігаційної супутникової системи в залізничному будівництві під час будівництва та обслуговування залізничної лінії. Цей метод дозволяє визначити точне положення з межею абсолютної різниці від 10 до 15 мм. Однак іоносферна затримка є найвпливовішим джерелом помилок у позиціонуванні GPS [5]. Щоб підвищити точність вимірюваної оцінки, необхідно вирішити проблему спільної обробки результатів вимірювань функціонально пов'язаних величин [6]. Надлишкові вимірювання можуть підвищити точність оцінок вимірюваних значень, але призводять до неузгодженості результатів вимірювань. Для мінімізації кількості спостережень у мережі досить широко використовується метод параметричного корегування, а також модель витрат [7], модель ідеально створених вимірювань [8] і модель помірної надмірності [9]. Кращим рішенням є завчасне визначення кількості вимірювань, що буде надано в цій статті нижче. Існують декілька видів досліджень щодо моніторингу залізничних об'єктів інфраструктури [10–13]. Такі об'єкти будуються та експлуатуються в умовах обмеженої прямої видимості або утрудненого спостереження. Вони потребують використання кількох інструментів для швидкого й точного визначення положення та орієнтації, наприклад безпілотного літального апарату та двох роботизованих тахеометрів [13]. Це

призводить до ускладнень і подорожчання вишукувальних робіт. Прогресивний метод наземного лазерного сканування ще не широко використовується для залізничних колій, за винятком мостів і тунелів [11]. Крім того, ці автори не сумніваються, що точність вимірювання дальності під час наземного лазерного сканування не така висока, як у традиційних інструментів, таких як нівеліри й тахеометри. Більшість робіт щодо залізничної інфраструктури виконується за допомогою мобільних лазерних сканерів [10]. Однак ці методи стосуються виявлення дефектів, відстані або розмірів. Вони не використовуються для робіт з вирівнювання колії під час ремонтних робіт. Для високошвидкісної залізниці діагностика сумісності опорних точок має бути важливим кроком, яким на практиці часто нехтують [12]. Тому розвиток власної еталонної мережі є вкрай актуальним для залізниці.

Оптимальна кількість спостережень у геодезичній мережі є важливим інженерним питанням при оцінюванні роботи споруди. Автори роботи [14] навели гібридний підхід, який поєднує інформаційну ентропію та еволюційний алгоритм для оптимізації вимірювальної структури геодезичної мережі. Визначено цільову функцію, якою була інформаційна ентропія геодезичної системи спостереження через ентропію вектора параметрів з істинними значеннями. Це дозволяло відбирати лише ті спостереження, що мали найвищу інформативність. Недоліки цього підходу полягають у тому, що процедуру потрібно запускати кілька разів, і ця процедура залежить від різних методів вимірювання, а також від шуму в наборах даних вимірювання. Існує багато складних математичних алгоритмів, які забезпечують точність геодезичних розрахунків, наприклад метод багатокритеріального прийняття рішень [15], вимірювання невизначеності та моделювання за методом Монте-Карло [16], ентропія як логарифмічна міра ймовірності [17]. Тим не

менш найпростішим методом є метод найменших квадратів [18].

Для уникнення вищезазначених випадків у смузі відведення залізниці необхідно встановити так звану «мережу умовних реперів». Подібні геодезичні базові точки використовуються для оцінювання зміщення контрольних точок на дамбі [19] або тунелі [20]. Але на залізниці такий підхід ще не застосовувався. Крім того, для відновлення геометрії колії в початкове положення в деяких випадках неможливо використовувати національну або локальну геодезичну мережу через її віддаленість або незручність розташування.

Визначення мети та завдання дослідження. Метою статті є створення математичної основи для розрахунку місць розміщення власних реперів біля залізниці. Ці реперні пункти будуть контрольними точками, які використовуватимуться колійно-експлуатаційними дільницями, колійними машинними станціями, інженерно-геодезичними відділами, колійно-знімальними дільницями, службами та відділами, а також проєктними та будівельними організаціями під час проведення вишукувань, проєктування, експлуатації, ремонту, реконструкції або нового будівництва. Це дозволить підтримувати колію в справному стані та використовувати для вирівнювання колії під час ремонтних робіт. У роботі розглянуто розрахунковий метод розташування контрольних точок умовної реперної мережі на кривій ділянці залізниці. Новизна полягає у використанні теореми середнього значення інтегрального числення для обчислення координат кривої незалежно від національної геодезичної мережі.

Основна частина дослідження

Методика вимірювань і розрахунків. Перед будівництвом залізниці потрібно провести геодезичні вишукування, розмітити точки, що лежать на лініях будівництва, встановити необхідні репери, спроектувати осі на основу. Електронний тахеометр є

найефективнішим приладом для такої роботи [21]. Для отримання експериментальних даних координат кривої використовувався тахеометр для візування кругової кривої залізничних колій з прямим визначенням координат на двадцятиметрових відрізках за типовою процедурою, що містить встановлення стійки зі світловідбивачем у кожній точці залізничної колії, вимірювання і запис відстані до цієї точки, а також горизонтального і вертикального кутів до неї. Ці вимірювання є основою для визначення планового та висотного положення цих точок відносно тахеометра. Місця дислокації електронного тахеометра будуть основними точками умовної еталонної мережі. Ці контрольні точки мають залишитися для майбутніх ремонтних робіт. У процесі експлуатації відбувається зміщення осі залізниці. Для повернення колії у вихідне положення ремонтники використовуватимуть дані геодезичного вимірювання з однієї точки, яка називається «полюсом» – базовою точкою умовної геодезичної мережі. Розглянемо, скільки реперів потрібно для виведення залізничної кривої з одного полюса.

Розташування контрольних точок залежить від довжини і кривизни залізничної кривої, а також кількості реперів n . Цю криву можна зобразити за допомогою функції $f(x)$ (рис. 1). Ця функція буде визначена нижче як апроксимація експериментальних даних. Розділимо дугу на рівні частини $l_n = \frac{l}{n}$. Кількість секцій становить $\frac{n}{2}$ або $\frac{n-1}{2}$. Кожна частина l_i ($i = 1, \dots, n$) пов'язана зі значенням абсцис x_i . Точка c є серединою частини l_i . Точку c вибирають так, щоб заштриховані сектори мали однакову площу по обидві сторони кривої ($S_{Л}$ і $S_{П}$). Точка c_i відповідає значенню абсциси c .

Для визначення координат точки використовується теорема про середнє значення інтегрального числення

$$\int_{x_{i-1}}^{x_i} f(x) dx = f(c_i) (x_i - x_{i-1}) \quad c_i \in (x_{i-1}; x_i). \quad (1)$$

Результати і обговорення.

Координати точки вимірювали за допомогою електронного тахеометра для кривої ділянки залізниці. Ця крива

розташована між станцією *M* і станцією *N* Південної залізниці. Дані координат вимірних точок кривої наведено в табл. 1 і показано на рис. 3.

Таблиця 1

Дані координат вимірних точок кривої

x	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5	9,0
y	-23	-57,22	-66	-80,27	-109	-146	-149,43	-212,53	-210,32	-256,06	-299,78
x	9,5	10,0	10,5	11,0	11,5	12,0	12,5	13,0	13,5	14,0	x
y	-329,37	-389,5	-432,62	-433,27	-522,83	-508,08	-565,6	-671,92	-727,15	-762,79	y

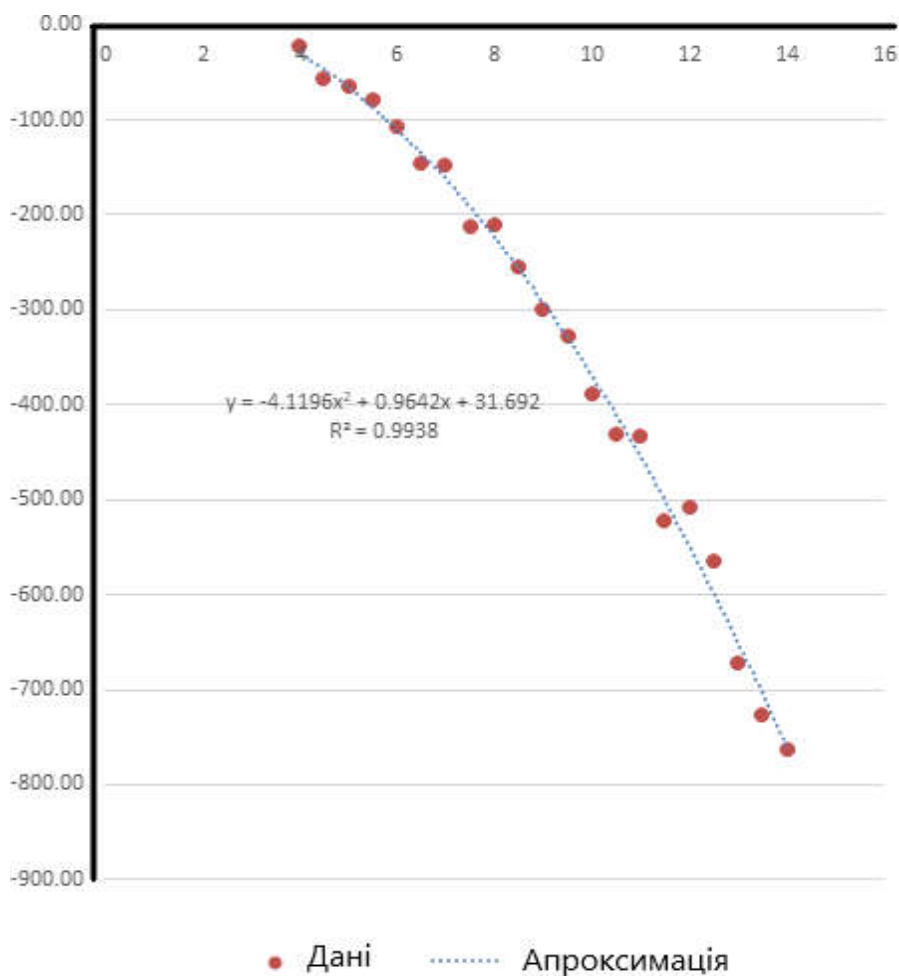


Рис. 3. Лінія регресії

Експериментальні дані апроксимовано функцією $y = -4x^2 + x + 32$ ($R^2 = 0,9938$). Довжина дуги кривої на ділянці (4; 14)

дорівнює $l = 710,08$ м. Щоб встановити 11 реперів, криву розбивають на $\frac{11-1}{2} = 5$ частин однакової довжини

$$l_5 = \frac{710,08}{5} = 142,016 \text{ м.}$$

За допомогою функції

$$y = -4x^2 + x + 32$$

для кожної частини знайдено значення абсцис x_i (табл. 2).

Таблиця 2

Значення абсцис для інтервалів

№	1	2	3	4	5
$(x_{i-1}; x_i)$	(4; 7,232)	(7,232; 9,399)	(9,399; 11,148)	(11,148; 12,655)	(12,655; 14)
l_i	142,016	142,016	142,016	142,016	142,016

Використовуючи теорему про середнє значення координати середніх точок c_i ,

були знайдені для кожної частини. Для першого інтервалу

7,232

$$\int_4^{7,232} (-4x^2 + x + 32) dx = (7,232 - 4) * (-4c_1^2 + c_1 + 32), c_1 \in (4; 7,232)$$

$$c_1 \approx 5,695.$$

Для другого інтервалу

9,399

$$\int_{7,232}^{9,399} (-4x^2 + x + 32) dx = (9,399 - 7,232) * (-4c_2^2 + c_2 + 32), c_2 \in (7,232; 9,399)$$

$$c_2 \approx 8,399.$$

І так далі для всіх п'яти інтервалів.

Після знаходження середніх точок поділу за стандартними формулами обчислюють площі

$$S_L = \int_{x_{i-1}}^{c_i} (f(c_i) - f(x)) dx, \quad (4)$$

$$S_{\Pi} = \int_{c_i}^{x_i} (f(x) - f(c_i)) dx. \quad (5)$$

У результаті були розраховані координати середини c_i , а також значення лівої S_L та правої S_{Π} площ (табл. 3).

Таблиця 3

Координати середини сегментів для п'яти частин кривої

Номер	1	2	3	4	5
$(x_{i-1}; x_i)$	(4; 7,232)	(7,232; 9,399)	(9,399; 11,148)	(11,148; 12,655)	(12,655; 14)
c_i	5,694724	8,339453	10,28623	11,90988	13,33344

Ліва і права площі однакові (табл. 4).

Таблиця 4

Значення площ для п'яти частин кривої

Номер точки	1	2	3	4	5
$(x_{i-1}; x_i)$	(4; 5,695)	(5,695; 7,232)	(7,232; 8,339)	(8,339; 9,399)	(9,399; 10,286)
S	57,49712	57,49712	38,48464	38,48464	31,05328
Номер точки	1	2	3	4	5
$(x_{i-1}; x_i)$	(10,286; 11,148)	(11,148; 11,91)	(11,91; 12,655)	(12,655; 13,333)	(13,333; 14)
S	31,05328	26,75872	26,75872	23,86834	23,86834

Припустимо, що координата контрольної точки умовної реперної мережі (полюс P) дорівнює $(-10; -80)$. За допомогою

апроксимованої функції та формул (2) і (3) визначено полярні координати (φ та p), наведено в табл. 5 і на рис. 4.

Таблиця 5

Полярні координати середніх точок для полюса $(-10; -80)$

Координата	Номер точки				
	1	2	3	4	5
c_i	5,694724	8,339453	10,28623	11,90988	13,33344
$y(c_i)$	-92,0248	-237,8465	-380,94	-523,4714	-665,7896
φ	-37,4582	-83,37278	-86,14355	-87,17158	-87,71897
p	19,7717	158,9083	301,623	444,0123	586,2541

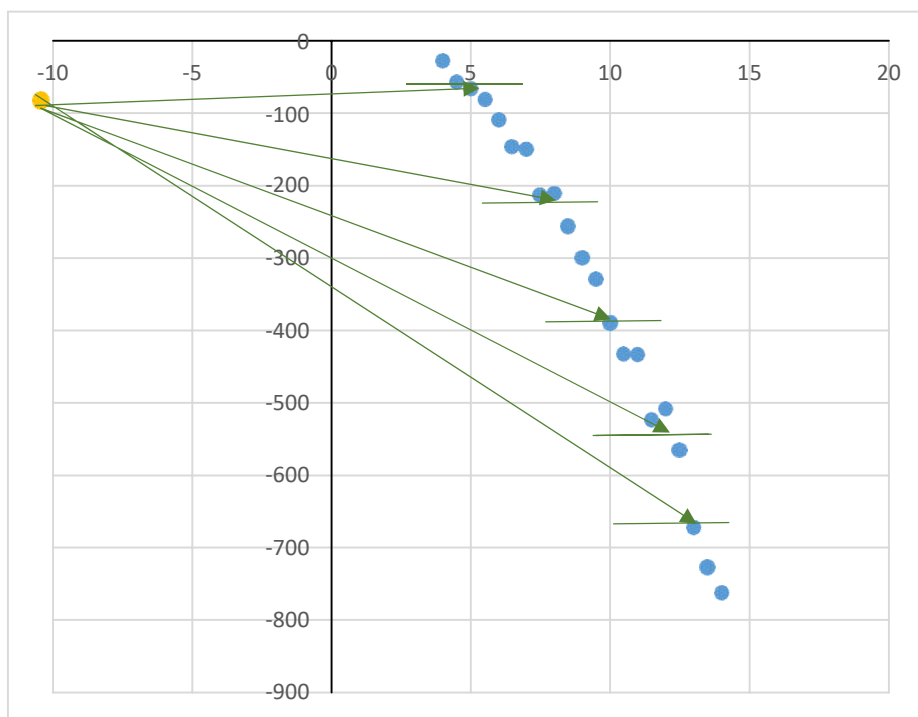


Рис. 4. Геодезична розмітка залізничної кривої для полюса $(-10; -80)$

Використовуючи описаний вище алгоритм, отримаємо полярні координати

для іншої полюсної відстані OP (0; -500). Розрахунок наведено в табл. 6 та на рис. 5.

Таблиця 6

Полярні координати середніх точок для полюса (0; -500)

Координата	Номер точки				
	1	2	3	4	5
c_i	5,694724	8,339453	10,28623	11,90988	13,33344
$y(c_i)$	-92,0248	-237,8465	-380,94	-523,4714	-665,7896
φ	89,20029	88,17796	85,06217	-63,09579	-85,40195
p	408,0149	262,2861	119,5035	26,32017	166,3249

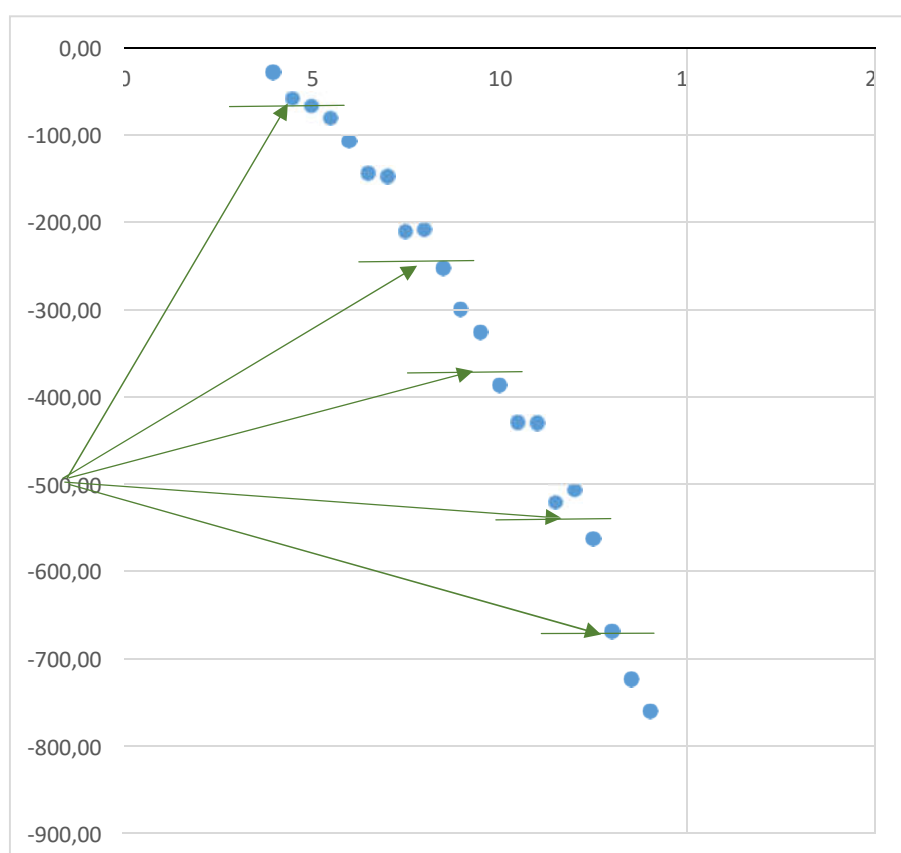


Рис. 5. Геодезична розмітка залізничної кривої для полюса (0; -500)

Відповідно до отриманих результатів запропонований метод дозволяє легко розрахувати координати кривої з будь-якої точки умовної реперної мережі залізниці. Надалі ремонтники використовуватимуть ці контрольні точки залізничної кривої, що дозволяє легко привести зміщені криві в проектне положення. Горизонтальне

відхилення показує, наскільки вісь колії відхилилася від проектної осі колії. Наприклад, колієвимірвальна машина визначила, що відхилення становить 180 мм. Це означає, що колію потрібно перемістити на 180 мм. Оскільки горизонтальне відхилення не впливає на кут, необхідно лише додати відхилення до довжини p

променя P_i від полюсної точки мережі умовного репера залізниці та виконати корегування колії.

Висновки. Створення «власної» умовної реперної мережі дозволяє залізницям виконувати розбиття ліній і кривих незалежно від наявності чи віддаленості контрольних точок місцевої чи державної геодезичної мережі. У статті розроблено математичне обґрунтування розміщення власних реперів біля залізниці. Після вибору умовного репера були проведені розрахунки координат залізничної кривої, розділеної на п'ять частин. Показано, що кількість точок не впливає на точність визначення координат.

Отже, можна відмовитися від меншої кількості реперів, що збільшує швидкість розбиття. Визначено полярні координати для двох полюсних відстаней від умовного репера. Встановлено, що використання теореми про середнє значення інтегрального числення для знаходження координат точки дає більш точні дані, оскільки цей метод не передбачає заміни дуги хордою. Описаний спосіб визначення полярних координат з будь-якої точки власної мережі умовних реперів має практичне значення. Після відхилення осі колії внаслідок руху поїздів ремонтники можуть поставити її в проектне положення без додаткового розрахунку.

Список використаних джерел

1. Celms A., Parsova V., Reke I., Akmentins J. Tendencies of development of local geodetic network in Riga city. *Baltic Surveying*. 2018. Vol. 9. P. 8-15. URL: <http://dx.doi.org/10.22616/j.balticsurveying.2018.013> (last access: 01.08.2022).
2. Celms A., Reke I., Brinkmanis-Brimanis M., Pukite V. 2019. Evaluation of the Local Geodetic Network in Jurmala City. *Baltic Surveying*. 2019. Vol. 10. P. 8-15. URL: <https://doi.org/10.22616/j.balticsurveying.2019.001> (last access: 01.08.2022).
3. Kriauciunaite-Neklejonoviene V., Rekus D., Balevicius G., Kolbovskij O. Technology of Geodetic Control at Railway Construction Stages. *Baltic Surveying*. 2018. Vol. 8. P. 52-60. URL: <https://doi.org/10.22616/j.balticsurveying.2018.007> (last access: 01.08.2022).
4. Bartonek D., Bures J., Svabensky O. Optimized GNSS RTK measurement planning for effective point occupation via heuristic analysis. *Engineering Computations*. 2015. Vol. 34 (1). P. 0352. URL: <https://doi.org/10.1108/EC-11-2015-0352> (last access: 01.08.2022).
5. Xinlong W., Yafeng L. Study on adaptability of GPS ionospheric error correction models. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*. 2009. Vol. 81 (4). P. 316-322. URL: <https://doi.org/10.1108/00022660910967309> (last access: 01.08.2022).
6. Ho M. D., Muravyov S. V. Accuracy enhancement of measurand estimate on the base of additive combined measurements. *Sensor Review*. 2020. Vol. 40 (3). P. 377-383. URL: <https://doi.org/10.1108/SR-01-2020-0009> (last access: 01.08.2022).
7. Postek P. New Computer Simulation Method for First-Order Design of Geodetic Network: Aiming for Low Cost. *Journal of Surveying Engineering*. 2021. Vol. 147 (1). P. 04020020. URL: [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)su.1943-5428.0000334](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)su.1943-5428.0000334) (last access: 01.08.2022).
8. Třasák P., Štroner M. Outlier detection efficiency in the high precision geodetic network adjustment. *Acta Geodaetica et Geophysica*. 2014. Vol. 49. P. 161-175. URL: <http://dx.doi.org/10.1007/s40328-014-0045-9> (last access: 01.08.2022).
9. Nowak E., Odziemczyk W. Impact analysis of observation coupling on reliability indices in a geodetic network. *Reports on Geodesy and Geoinformatics*. 2018. Vol. 106 (1). P. 1-7. URL: <http://dx.doi.org/10.2478/rgg-2018-0008> (last access: 01.08.2022).
10. Soilán M., Sánchez-Rodríguez A., Del Río-Barral P., Perez-Collazo C., Arias P., Riveiro B. Review of laser scanning technologies and their applications for road and railway infrastructure

monitoring. *Infrastructures*, 2019. Vol. 4 (420). P. 58. URL: <http://dx.doi.org/10.3390/infrastructures4040058> (last access: 01.08.2022).

11. Wu C., Yuan Y., Tang Y., Tian B. Application of terrestrial laser scanning in the architecture, engineering and construction industry. *Sensors*. 2022. Vol. 22 (1). P. 265. URL: <http://dx.doi.org/10.3390/s22010265> (last access: 01.08.2022).

12. Yan G., Li Y., Liu C. Multiple incompatible datum points identification in vertical control network for high-speed railway based on likelihood ratio test. *Journal of Applied Geodesy*. 2022. Vol. 16 (1). P. 1-8. URL: <https://doi.org/10.1515/jag-2021-0008> (last access: 01.08.2022).

13. Zhang D., Fang T., Ai J., Wang Y., Zhou L., Guo J., Mei W., Zhao Y. UAV/RTS system based on MMCPF theory for fast and precise determination of position and orientation. *Measurement*. 2022. Vol. 187. P. 110342. URL: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.110342> (last access: 01.08.2022).

14. Mrówczyńska M., Sztubecki J. The network structure evolutionary optimization to geodetic monitoring in the aspect of information entropy. *Measurement*. 2021. Vol. 179. P. 109369. URL: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.109369> (last access: 01.08.2022).

15. Kobryń A. Multicriteria Decision Making in Geodetic Network Design. *Journal of Surveying Engineering*. 2020. Vol. 146 (1). P. 04019018. URL: [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)su.1943-5428.0000301](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)su.1943-5428.0000301) (last access: 01.08.2022).

16. Niemeier W., Tengen D. Uncertainty assessment in geodetic network adjustment by combining GUM and Monte-Carlo-simulations. *Journal of Applied Geodesy*. 2017. Vol. 11 (2). P. 67-76. URL: <http://dx.doi.org/10.1515/jag-2016-0017> (last access: 01.08.2022).

17. Mrówczyńska M. Analysis of the horizontal structure of a measurement and control geodetic network based on entropy. *Geodesy and Cartography*. 2013. Vol. 62 (1). P. 23-31. URL: <https://doi.org/10.2478/geocart-2013-0002> (last access: 01.08.2022).

18. Kokeza Z., Vujasinović M. Development of software for geodetic network adjustment in open-source environment. *Савремена теорија и пракса у градителству*. 2018. Vol. 13 (1). P. 260-271. URL: <http://dx.doi.org/10.7251/stp1813260k> (last access: 01.08.2022).

19. Xuan Vinh D. Analyzing the Displacement of Horizon Geodetic Network at Tuyen Quang Hydropower. *VNU Journal of Science: Earth and Environmental Sciences*. 2019. Vol. 35 (3). P. 93-107. URL: <https://doi.org/10.25073/2588-1094/vnuces.4398> (last access: 01.08.2022).

20. Alizadeh-Khameneh M. A., Andersson J. V. Geodetic Network Design in Tunnel Surveys. *Journal of Surveying Engineering*. 2020. Vol. 146 (4). P. 06020003. URL: [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)su.1943-5428.0000325](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)su.1943-5428.0000325) (last access: 28.08.2022).

21. Ten Y., Oymatov R., Khayitov K., Saydalieva G., Nulloev U., Nematov I. Application of modern geodetic tools in the operation of railway reconstructions. *E3S Web of Conferences*, 2021. Vol. 227. P. 04004. URL: <http://dx.doi.org/10.1051/e3sconf/202122704004> (last access: 01.08.2022).

Мамонов Костянтин Анатолійович, доктор економічних наук, професор кафедри земельного адміністрування та геоінформаційних систем, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова. E-mail: kostia.mamonov2017@gmail.com. Тел.: (099) 291-73-54. ORCID 0000-0002-0797-2609.

Саяпін Олександр Сергійович, кандидат технічних наук, доцент кафедри вишукувань та проектування шляхів сполучення, геодезії та землеустрою, Український державний університет залізничного транспорту. Тел.: (057)730-10-70. E-mail: sayapin09@ukr.net.

Орел Євген Федорович, кандидат технічних наук, доцент кафедри вишукувань та проектування шляхів сполучення, геодезії та землеустрою, Український державний університет залізничного транспорту. Тел.: (057)730-10-70. E-mail: orel@kart.edu.ua. ORCID 0000-0002-6261-1558.

Камчатна Світлана Миколаївна, кандидат технічних наук, доцент кафедри вишукувань та проектування шляхів сполучення, геодезії та землеустрою, Український державний університет залізничного транспорту. Тел.: (057)730-10-70. E-mail: kamchatnayasn@gmail.com. ORCID 0000-0001-5711-4146.

Пустовойтова Оксана Михайлівна, кандидат технічних наук, доцент кафедри будівельних конструкцій, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова. Тел.: (057) 707-31-10. E-mail: oksana_pustov@ukr.net. ORCID 0000-0003-4078-4834.

Mamonov Kostiantyn, D. Sc. (Tech.), Professor, Department of Land Administration and GIS O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, E-mail: kostia.mamonov2017@gmail.com. Tel.: (099) 291-73-54.

Saiapin Oleksandr, PhD, associate professor, Department of Research and Design of Means of Communication, Geodesy and Land Management, *Ukrainian State University of Railway Transport*. Tel.: (057)730-10-70. E-mail: sayapin09@ukr.net.

Orel Yevhen, PhD, associate professor, Department of Research and Design of Means of Communication, Geodesy and Land Management, *Ukrainian State University of Railway Transport*. Tel.: (057)730-10-70. E-mail: orel@kart.edu.ua.

Kamchatna Svitlana, PhD, associate professor, Department of Research and Design of Means of Communication, Geodesy and Land Management, *Ukrainian State University of Railway Transport*. Tel.: (057)730-10-70. E-mail: kamchatnayasn@gmail.com.

Pustovoitova Oksana, PhD (Tech.), Associate Professor, Building Construction Department, O. M. Beketov National University of Urban Economy. Tel.: (057) 707-31-10. E-mail: oksana_pustov@ukr.net.

Статтю прийнято 31.08.2022 р.