

ГЕОДЕЗІЯ ТА ЗЕМЛЕУСТРІЙ (193)

УДК 528.117

**ВПЛИВ ПОМИЛОК У ВИЗНАЧЕННІ УХИЛУ ТРАСУВАННЯ НА ТОЧНІСТЬ
ГЕОДЕЗИЧНОГО ОБҐРУНТУВАННЯ ТРАСИ**

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

**INFLUENCE OF ERRORS IN DETERMINATION OF TRACING SLOPE ON THE
ACCURACY OF GEODETIC BASE FOR ROUTE**

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

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.196.2021.242225>

***Анотація.** Накопичення помилок у передачі координат при проектуванні залізничної лінії призводить не тільки до зміни будівельної вартості та обсягів робіт, але й змінює умови проектування ліній і величину експлуатаційних витрат. У статті математично обґрунтовано чинники, які впливають на довжину лінії, що проектується. Встановлено, що вплив помилок у ходах робочого обґрунтування проявляється в розбіжності істинної та запроєктованої протяжності траси. Неврахування цієї помилки призведе до значних перевитрат коштів під час будівництва лінії більшої протяжності, ніж це необхідно.*

***Ключові слова:** геодезичне обґрунтування, ухил трасування, керівний ухил, еквівалентний ухил, точність.*

***Abstract.** The purpose of this article is to study and develop a methodological approach to solving the problem of accuracy of the geodetic base of the route. For this purpose, the following tasks are set: mathematical substantiation the dependence of the line length on the ratio of the trace slope and the guide slope; description of the function of optimal use of the guiding slope at high speed; determination of the impact of errors in the course of the geodetic justification on the route length. Starting from the determined point and further to the right, artificial development of the line is required. Because when a trace is planed using level curves, this point can be reached sooner or later, and in some cases, this point can not be reached not at all, the line length designed according to the plan will be slightly different than in the case of tracing with usage the exact data. Thus, the obtained results indicate the following. If the error positions during a high-speed segment are such that the ordnance datum of the passage is less than the truth, the route length will be less than the true and vice versa. This trivial result indicates that the location of geodetic support points on different sides of the pass is not recommended. It is established that due to the accumulation of errors in the transmission of coordinates in the working substantiation networks, the conditions of the line design and the amount of operating costs change. It is mathematically substantiated that the line length depends on the depth of the excavation on the pass and the height of the embankment at the point, and also on the difference of ordnance datum at these points. The difference between the trace slope and the guiding slope has an inversely proportional effect. In addition, the function of optimal use of the guide slope at a high-speed segment has the form of a broken line according to its fractures the need for artificial development of the route can be established. The influence of errors in the*

course of the working justification is manifested in the discrepancy between the true and projected route length. If this error is not taken into account, it will lead to significant overspending during building a longer line than necessary. Further development of the problem of increasing the accuracy of tracing and reducing the impact of errors is planned in the direction of creating methods of digital modelling and automated programs.

Keywords: *geodetic base, tracing slope, guiding slope, equivalent slope, accuracy.*

Вступ. Сучасний рівень розвитку автоматизованих систем, що застосовуються при проєктуванні залізничної лінії, робить можливим реалізацію проєктів практично будь-якої складності. Це відкриває великі перспективи перед проєктувальниками, даючи змогу знаходити оптимальні рішення при будівництві залізничної лінії із застосуванням методів цифрового моделювання й автоматизованих програм. При цьому розширення технічних можливостей має ґрунтуватися на відповідальному підході до вибору конфігурації траси залізничної лінії, її параметрів у плані й профілі. Це питання дуже важливе й для безпеки руху, і для економічної ефективності проєктів, заснованої на пошуку таких технічних рішень, які забезпечать не тільки оптимальну вартість будівництва, але й не призведуть надалі до підвищення вартості обслуговування залізничної лінії.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Встановлення та аналіз профілю дороги є важливими завданнями в інженерних вишукуваннях. У сучасних підходах використовуються бортові лазерні датчики для точного вимірювання змін висоти вздовж визначеного маршруту. Однак тут задіяний складний сенсорний механізм, такий як мобільна система виявлення і визначення дальності, і якість одержуваного зображення погіршується через безліч чинників. Практичний приклад у дослідженні [1] показує, що якість отриманих профілів на основі запропонованого підходу досягає міліметрової точності. Отже, при реалізації пропонованого підходу стає можливим точний і економічний аналіз профілю дороги. Однак, незважаючи на те, що

існуючі методи лазерного сканування ефективні на великих площах, вони неефективні при виявленні змін геометричних елементів і створенні зображень за короткі періоди часу на невеликих площах. Як показало дослідження [2], на невеликих похилих ділянках побудова траси має доволі низьку точність порівняно з плоскими ділянками. Середньоквадратичне відхилення контрольних точок становило $\pm 0,12$ м в горизонтальній площині і $\pm 0,09$ м у вертикальній площині.

Істотним елементом трасування залізничних і автомобільних доріг є ухил проєктної лінії поздовжнього профілю, який визначається відношенням різниці відміток переламів профілю на елементі до його довжини. При проєктуванні нової дороги на карті фіксуються точки, де буде проходити нова дорога. Проєктувальнику дуже важливо знати якомога точніше ухил у кожній такій точці. Ця проблема в [3] була зведена до задачі пошуку відрізка найкоротшої довжини через точку, яка з'єднає дві компланарні лінії. Нахил в точці можна визначити за допомогою двох найближчих до цієї точки кривих рівня. Нахил задається відрізком найкоротшої довжини, який з'єднає дві криві рівня. Оскільки крива рівня складається з послідовних компланарних сегментів прямих ліній, ця задача може бути зведена до знаходження відрізка найменшої довжини, який з'єднає два компланарних відрізки прямих, розташованих на двох послідовних кривих рівня. Помилка визначення ухилу в даному дослідженні не перевищувала 1 %.

У різних геодезичних мережах спостереження виконуються повторно. Ці

спостереження, які називають вихідними спостереженнями, незалежні. На етапі проєктування для підвищення точності можна враховувати або середнє значення помилки вихідних спостережень, або помилку самих вихідних спостережень. Звичайний аналіз помилки заснований на звичайній оцінці методом найменших квадратів, який використовує середнє значення вихідних спостережень. У статті [4] була досліджена ефективність результатів визначення помилки. Для проведення дослідження надійності були спроектовані нівелірна мережа та мережа GPS, і був обчислений середній коефіцієнт успішності методів. Один із методів покращує точність трасування приблизно на 34 % для мережі нівелювання і на 38 % для мережі GPS у порівнянні зі звичайними методами проєктування траси. Стаття [5] описує, як ефективно використовувати геодезичні технології в муніципальному дорожньому будівництві і враховувати помилки топографічної зйомки і картування на ранній стадії будівництва муніципальних доріг.

В основному якість геодезичного трасування залежить від вихідних даних або методів, використовуваних для їх отримання. Однак різні методи просторової інтерполяції, що використовуються для одних і тих самих даних, можуть давати різні результати. У статті [6] порівнюється точність різних методів просторової інтерполяції, таких як IDW, Kriging, Natural Neighbor і Spline. Оскільки інтерполяція важлива при створенні матриці висот, важливо провести порівняльний аналіз таких методів, щоб з'ясувати, який з них дає більш точні результати. Набір даних було взято авторами [6] з аерофотограметричної зйомки. Розрахувавши середню абсолютну помилку і середньоквадратичну помилку, автори виявили, що результати не сильно відрізняються. Однак найбільш точні результати отримано за допомогою методів інтерполяції Spline і Kriging.

У статті [7] пропонується можливість застосування сучасних геодезичних

технологій в суміжних галузях, таких як цивільне будівництво і роботи із створення дорожньої інфраструктури. Ці методи можуть допомогти у визначенні проблем вже існуючих доріг і бути основою планування ремонтно-відновлювальних робіт. При цьому зменшення помилки вимірювань призведе до більшої точності визначення обсягів робіт і знизить їх вартість. Використовуючи ці технології, автори [7] виявили реальні деформації і їх основні причини та тим самим змогли прийняти оптимальне технічне рішення для відновлення конструкції дороги. Щоб підготувати проєкт відновлення існуючої або будівництва нової дороги і робочі креслення, необхідне знання існуючих місцевих об'єктів. Виконання будівництва або реконструкції дороги направлено на використання цифрових моделей рельєфу і допомогу в більш точному проєктуванні, зменшенні впливу на навколишнє середовище і оптимізації робіт. Однак через надлишкові точки висоти для автоматичного створення та проєктування моделі рельєфу ресурси можуть використовуватися нерационально. Методика, подана в статті [6], може бути придатною для усунення зайвих точок вимірювання висоти, утримуючи їх в певних положеннях рельєфу.

У дорожніх проєктах виникають труднощі з нанесенням точок дотику розрахованої вертикальної кривої, точки повороту і проміжних точок через відмінності в масштабі по горизонталі і вертикалі. Ця проблема викликана тим фактом, що пропорційне співвідношення між двома різними масштабами невідомо для довжини з певним ухилом в поздовжньому профілі [8]. Метою [9] було показати, що обстеження місцевості дає найкращі результати з використанням інтегрованих методів вимірювання (класична зйомка і лазерне сканування LiDAR). Стаття [9] містить порівняння результатів досліджень, отриманих з використанням даних LiDAR, з даними, отриманими в результаті прямих

вимірювань. Проведені дослідження показали деякі обмеження методу отримання даних від LiDAR. Це пов'язано з тим, що метод не дає змоги визначати координати точок вимірювання, які описують топографію в місцях, не доступних для лазерного променя. Підсумовуючи вищезазначені джерела, з'ясовано, що до переваг усіх згаданих методів належать міліметрова точність і можливість обробки великих масивів даних. У той же час є деякі недоліки, наприклад, ці засоби неефективні при виявленні змін геометричних елементів і створенні зображень протягом коротких періодів часу на невеликих ділянках або на невеликих похилих ділянках, які мають доволі низьку точність в порівнянні з плоскими ділянками. При цьому якість результату погіршується через безліч чинників. Також автори не досліджують математичну залежність величини похибки від різних чинників. Отже, одним з актуальних завдань є підвищення точності класичної зйомки для таких місць.

Визначення мети та завдання дослідження. Метою даної публікації є

дослідження і розробка методологічного підходу до вирішення проблеми точності побудови геодезичного обґрунтування траси. Для цього поставлено такі завдання: математично обґрунтувати залежність довжини лінії від співвідношення ухилу трасування й керівного ухилу; описати функцію оптимального використання керівного ухилу на напруженому ході; визначити вплив помилок в ходах робочого обґрунтування на протяжність траси.

Основна частина дослідження.

Розглянемо випадок, коли пункти геодезичного обґрунтування розташовані по різні боки подоланого перевалу. На рис. 1 зображено істинний профіль місцевості АСВ, отриманий у результаті точних наземних робіт, наприклад, у результаті прокладання ходу геометричного нівелювання, і профіль місцевості АС'В, побудований за планом в горизонталях. Точки А і В є пунктами основного геодезичного обґрунтування, визначені з точністю, що дає змогу не враховувати помилки вихідних даних. Положення точки С' під С показано умовно.

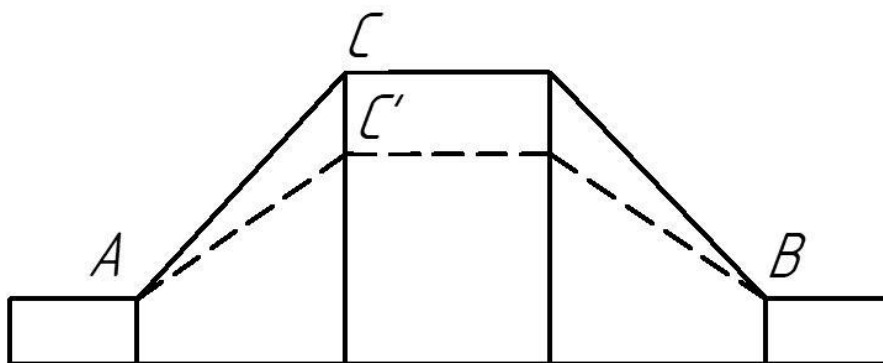


Рис. 1. Профіль місцевості

Позначимо керівний ухил як i_k й еквівалентний ухил від опору на кривих як $i_{ек}$, тоді ухил трасування $i_{тр}$ буде дорівнювати керівному ухилу, який пом'якшено на кривих ділянках на величину $i_{ек}$

$$i_{тр} = i_k - i_{ек}. \quad (1)$$

Позначимо відмітки точок А, В, С, С' відповідно $H_A, H_B, H_C, H_{C'}$. При подальших розрахунках будемо вважати, що величина $H_C - H_{C'}$ досить мала і не впливає на вибір кратності тяги. Розрахунок спростимо і будемо його вести для одиночної тяги. Припустимо, що на ділянках АС і СВ

природний ухил місцевості $i_{пр}$ більше $i_{к}$, тоді довжина лінії, наприклад, на ділянці АС визначиться за формулою

$$S_{AC} = \frac{H_c - H_c - h_b - h_H}{i_{к} - i_{ек}}, \quad (2)$$

де h_b и h_H – глибина виїмки на перевалі й висота насипу в точці А, м.

Маємо

$$\Delta' S = S_{AC'} = S_{AC} = \frac{H_{c'} - H_c - (h'_b - h_b)C - (h'_H - h_H)A}{i_{к} - i_{ек}} \quad (4)$$

для відрізка траси СВ.

$$\Delta'' S = \frac{H_{c'} - H_c - (h''_b - h_b)C - (h''_H - h'_H)B}{i_{к} - i_{ек}}. \quad (5)$$

Для попередніх висновків величина $i_{ек}$ для обох відрізків траси АС і СВ прийнята однаковою. Якщо відволіктися від спеціальних умов, на підставі яких можуть бути обрані при проектуванні висота насипу й глибина виїмки, а взяти до уваги тільки умови найкращого використання керівного

При цьому припускаємо, що висота насипу в точці А не може змінити умови трасування (збільшити довжину лінії) при підході до А зліва. Аналогічно можна записати

$$S_{AC'} = \frac{H_{c'} - H_A - h_b - h'_H}{i_{к} - i_{ек}}. \quad (3)$$

ухилу на напруженому ході і враховуючи (3), то

$$h_b + h_H = \varphi(H_c - H_A; S) \quad (6)$$

і функція φ має задовольняти такі умови:

$$i_{тр} \geq i_{пр}, \quad \varphi=0;$$

$$i_{тр} < i_{пр} \leq i_{тр} + \frac{20}{S_0}, \quad \frac{d\varphi}{d(H_c - H_A)} = const; \quad (7)$$

$$i_{пр} > i_{тр} + \frac{20}{S_0}, \quad \frac{d\varphi}{d(H_c - H_A)} = 0, \quad h_b + h_H = 20 \text{ м},$$

де S_0 – найкоротша відстань між А й С.

У загальному вигляді функція може бути подана графіком, показаним на рис. 2.

Починаючи від точки $i_{тр} + \frac{20}{S}$ і далі вправо, потрібен штучний розвиток лінії. Оскільки при трасуванні за планом в горизонталях вихід на цю точку може настати раніше або пізніше необхідного моменту, а в деяких випадках і зовсім не настати, то і довжина лінії, запроєктована за планом, буде мати дещо іншу величину, ніж

у випадку трасування за точними даними. Таким чином, отримані результати свідчать: якщо при трасуванні на напруженій ділянці положення помилок в ходах робочого обґрунтування таке, що відмітка перевалу виходить менше істинної, то довжина траси буде менше істинної і навпаки. Цей результат говорить про те, що розташування точок геодезичної опори з різних боків перевалу не може бути рекомендовано.

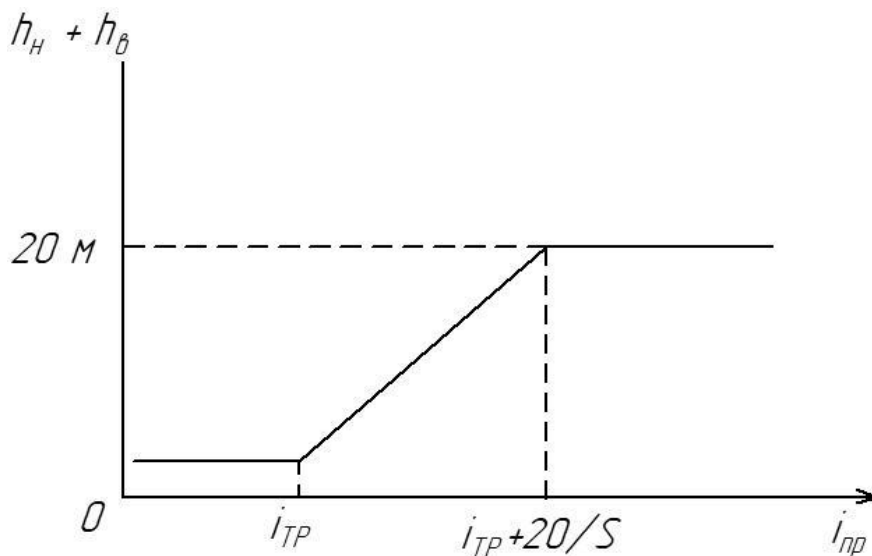


Рис. 2. Графічна залежність між висотою насипу й глибиною виїмки та ухилом траси

Висновки. Встановлено, що через накопичення помилок у передачі координат у мережах робочого обґрунтування змінюються умови проектування лінії і величина експлуатаційних витрат. Математично обґрунтовано, що довжина лінії залежить прямо пропорційно не тільки від глибини виїмки на перевалі й висоти насипу в точці, але й від різниці відміток у цих точках. Обернено пропорційний вплив має різниця між ухилом трасування й керівним ухилом. Крім того, функція оптимального використання керівного ухилу на напруженому ході має вигляд

ламаної лінії, за переламаними якої може бути встановлено необхідність штучного розвитку траси. Вплив помилок у ходах робочого обґрунтування проявляється в розбіжності істинної та запроєктованої протяжності траси. Неврахування цієї помилки призведе до значних перевитрат коштів під час будівництва лінії більшої протяжності, ніж це необхідно. Подальший розвиток проблеми підвищення точності трасування та зменшення впливу помилок планується в напрямку створення методів цифрового моделювання й автоматизованих програм.

Список використаних джерел

1. Han J.-Y., Chen A., Lin Y.-T. Image-Based Approach for Road Profile Analyses. *Journal of Surveying Engineering*. American Society of Civil Engineers. 2016. Vol. 142 (1). P. 06015003. URL: [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)su.1943-5428.0000160](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)su.1943-5428.0000160) (last access: 12.04.2021).
2. Park J. H., Lee W. H. Orthophoto and DEM Generation in Small Slope Areas Using Low Specification UAV. *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*. 2016. Vol. 34 (3). P. 283–290. URL: <https://doi.org/10.7848/KSGPC.2016.34.3.283> (last access: 12.04.2021).
3. Deaconu O., Deaconu A. Numerical methods to find the slope at a point on map using level curves. Application in road designing. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 789. P. 012017. URL: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/789/1/012017>. (last access: 12.04.2021).

4. Erdogan B., Durdag U. M., Hekimoglu S. Efficacy of the conventional deformation analysis based on different strategies on the design stage of the network. *Survey Review*. 2020. Vol. 52 (372). P. 278–286. URL: <https://doi.org/10.1080/00396265.2018.1553009>. (last access: 12.04.2021).
5. Dainian J. Surveying and mapping technology in urban road engineering construction. *Geomatics Observation*. 2020. Vol. 2 (2). P. 49–59. URL: <https://doi.org/10.35534/go.0202010c>. (last access: 12.04.2021).
6. Ajvazi B., Czimmer K. A comparative analysis of different DEM interpolation methods in GIS: case study. *Geodesy and Cartography*. 2019. Vol. 45 (1). P. 43–48. URL: <https://doi.org/10.3846/gac.2019.7921>. (last access: 12.04.2021).
7. Herban I. S., Vilceanu C.-B., Grecea C. Road-Structure Monitoring with Modern Geodetic Technologies. *Journal of Surveying Engineering*. 2017. Vol. 143 (4). P. 05017004 URL: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)SU.1943-5428.0000218](https://doi.org/10.1061/(ASCE)SU.1943-5428.0000218) (last access: 12.04.2021).
8. Ince H., Erdem N. A method for drawing vertical curve in longitudinal profile in road project. *Survey Review*. 2018. Vol. 51 (368). P. 413–421. URL: <http://dx.doi.org/10.1080/00396265.2018.1470071>. (last access: 12.01.2021).
9. Kotlarz P., Siejka M., Mika M. Assessment of the accuracy of DTM river bed model using classical surveying measurement and LiDAR: a case study in Poland. *Survey Review*. 2020. Vol. 52 (372). P. 246–252. URL: <https://doi.org/10.1080/00396265.2019.1696515>. (last access: 12.04.2021).

Мамонов Костянтин Анатолійович, доктор економ. наук, професор кафедри земельного адміністрування та геоінформаційних систем Харківського національного університету міського господарства імені О. М. Бекетова, e-mail: kostia.mamonov2017@gmail.com, тел.: (099) 291-73-54, ORCID 0000-0002-0797-2609.
Камчатна Світлана Миколаївна, канд. техн. наук, доцент кафедри вишукувань та проектування шляхів сполучення, геодезії та землеустрою Українського державного університету залізничного транспорту. Тел. (057)730-10-70. E-mail: kamchatnayasn@gmail.com, ORCID 0000-0001-5711-4146.
Орел Євген Федорович, канд. техн. наук, доцент кафедри вишукувань та проектування шляхів сполучення, геодезії та землеустрою Українського державного університету залізничного транспорту. Тел. (057)730-10-70. E-mail: orel@kart.edu.ua, ORCID 0000-0002-6261-1558.
Саяпін Олександр Сергійович, канд. техн. наук, доцент кафедри вишукувань та проектування шляхів сполучення, геодезії та землеустрою Українського державного університету залізничного транспорту. Тел. (057)730-10-70. E-mail: sayapin09@ukr.net.

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.
Kamchatnaya Svitlana, PhD (Tech.), 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.
Orel Yevhen, PhD (Tech.), 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.
Saiapin Oleksandr, PhD (Tech.), 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.

Статтю прийнято 20.05.2021 р.