



ЗАСТОСУВАННЯ СУПУТНИКОВИХ МЕТОДІВ ДЛЯ СТВОРЕННЯ ГЕОДЕЗИЧНОЇ МЕРЕЖІ ПРИ БУДІВНИЦТВІ МЕТРОПОЛІТЕНУ

Изложена методика создания геодезической сети с использованием спутниковых измерений для строительства метрополитена и передачи координат пунктов сети непосредственно в котлован станций. Выполнен сравнительный анализ координат пунктов, которые получены в результате спутниковых и традиционных линейно-угловых измерений. Установлено, что даже в неблагоприятных условиях спутниковые методы позволяют с необходимой точностью выполнять передачу плановых координат.

It is considered the methodology of a geodesic network creation using satellite measuring for metro construction and transmission of the network points coordinates directly into the foundation pit of a metro station. The comparative analysis of the points coordinates obtained in the result of satellite measuring and traditional angular-linear measuring is executed. It is established that even under unfavorable conditions the satellite methods allow to transmit the plane coordinates with necessary accuracy.

Постановка проблеми При спорудженні метрополітену геодезичне забезпечення є важливою складовою будівельного процесу. Діючі нормативні документи регламентують створення багатадійної лінійно-кутової мережі вздовж траси будівництва з обов'язковою передачею координат і напрямків від геодезичної мережі на денній поверхні в тунель через шахти або в місця спорудження окремих станцій метрополітену. Складність мережі та методика передачі координат визначаються відповідно до виду підземної споруди, особливостей її об'ємно-планувальної схеми, способів виконання будівельних робіт. При застосуванні класичних методів створення мережі виникає необхідність постійного розширення надземної геодезичної основи, а також прокладання полігонометричних ходів і полігонів до будмайданчиків. Такий комплекс – це суттєва частка робіт у загальному комплексі геодезичного забезпечення будівництва підземних споруд.

Наразі використання супутникових методів створення геодезичних мереж стало звичним явищем. Впровадження супутникових технологій дозволяє зменшити обсяги і прискорити темпи геодезичних робіт. Практично всі геодезичні підприємства і багато будівельних організацій використовують у своїй практиці високоточні GNSS-технології. Сфера застосування супутникових методів в інженерній геодезії досі чітко не визначена.

Особливі складності з впровадженням супутникових методів виникають при геодезичному забезпеченні будівництва складних та відповідальних інженерних споруд, до яких належать і лінії метрополітену. Як уже зазначалося, однією з особливостей геодезичного забезпечення будівництва метрополітенів є створення геодезичної мережі, яке загалом можна розділити на три складові: опорна геодезична мережа на денній поверхні; підземна геодезична мережа; зв'язок (передача) координат і напрямків від пунктів на денній поверхні до пунктів підземної геодезичної мережі. Якщо

остання створюється до певної міри традиційними методами, то формування мережі на денній поверхні та передачу координат і напрямків у тунель з теоретичної і практичної точки зору цілком можливо здійснити за допомогою супутникових методів вимірювань.

Таким чином, застосування супутникових методів для вирішення розглянутих задач є актуальним питанням, яке потребує детального дослідження.

Огляд останніх публікацій. Загальновідомо, що створення геодезичних мереж при будівництві підземних споруд, і ліній метрополітену зокрема, має певні особливості. Загальна теорія та методика побудови геодезичних мереж при будівництві метрополітену була розроблена в 50-60-ті роки минулого сторіччя, що повною мірою відображено в фундаментальній праці [4] та в нормативному документі [3]. З часом, у зв'язку з розвитком вимірювальної техніки, було вдосконалено певні розділи, що стосувалися головним чином методик виконання вимірювань [9,10] та методів математичного оброблення результатів цих вимірювань [10].

На жаль, загальний підхід до створення геодезичної мережі при будівництві метрополітену досі залишається незмінним. Чинні вітчизняні нормативи [6] фактично відображують стан, який відповідає кінцю ХХ ст. Не краща ситуація і в науковій та навчальній літературі [7], де фактично повторюються підходи та положення 25-річної давнини. Водночас сучасний ринок геодезичного обладнання і технологій розвивається дуже динамічно і постійно розширює спектр послуг, що надаються користувачу. На превеликий жаль, питанню впровадження сучасних геодезичних технологій, до яких відносяться і супутникові методи вимірювань, у практику геодезичного забезпечення будівництва приділяється недостатня увага.

Можливості застосування супутникових методів визначення місцеположення частково розглянуто в фундаментальних працях [1,5], у яких описано загальну теорію та методи визначення місцеположення і створення геодезичних мереж за допомогою супутникових вимірювань. Наразі не можна дати однозначної відповіді стосовно



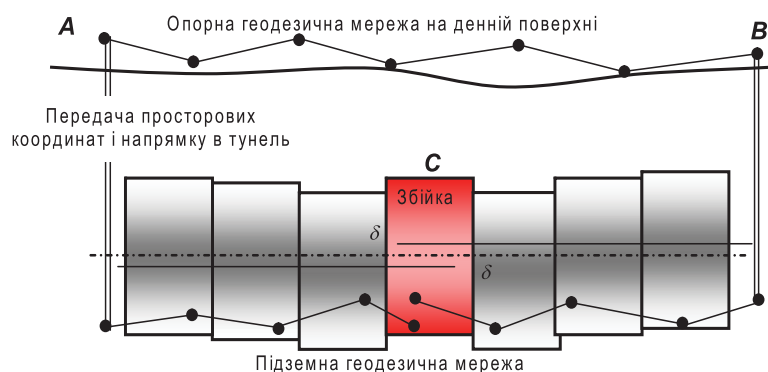
можливостей супутникових методів вимірювань при геодезичному забезпеченні будівництва підземних споруд.

Зазначимо також, що в літературі до сьогодні існує невизначеність між допустимими відхиленнями геометричних параметрів при будівництві метрополітену та переходом від цих відхилень до СКП виконання геодезичних робіт.

Постановка проблеми. Мета нашого дослідження – виявлення можливостей GNSS-технологій для геодезичного забезпечення будівництва метрополітенів. Основну увагу зосереджено на дослідженні питання передачі координат від пунктів геодезичної мережі на денній поверхні до пунктів підземної геодезичної мережі за допомогою супутникових методів вимірювань.

Основний зміст роботи. Дослідження проведено в два етапи. Спершу було розглянуто теоретичні питання, пов'язані з виконанням розрахунку необхідної точності створення геодезичної мережі й точності передачі координат у тунель. На другому етапі виконано експеримент з метою визначення відповідності отриманої точності передачі координат стосовно розрахункової.

Розглянемо випадок, коли тунель будується з двох сторін. Геодезичне супроводження будівництва виконується від пунктів підземної геодезичної мережі в тунелі, вихідні дані на які передаються з поверхні (мал. 1). У точці стику двох виробок фактичні осі тунелю внаслідок похибок вимірювань зміщені на величину незбіжки δ .



Мал. 1. Схема геодезичного забезпечення будівництва тунелю

Розрахуємо очікувану СКП виконання геодезичних робіт у точці C збіжки тунелю.

Проаналізувавши основні джерела похибок, що впливають на точність положення тунелю в плані, виявлено такі похибки [2]: m_1 – СКП геодезичної мережі на денній поверхні; m_2 – СКП передачі координат у шахту; m_3 – СКП передачі напрямку в шахту; m_4 – СКП підземної геодезичної основи; m_5 – СКП деформації пунктів підземної геодезичної основи; m_6 – СКП прив'язки приладу до підземної геодезичної основи; m_7 – СКП виконання розмічувальних робіт у тунелі.

Нехтуючи кореляційними зв'язками, отримуємо загальну похибку геодезичних робіт у тунелі в плані:

$$m_{\Pi} = \sqrt{m_1^2 + m_2^2 + m_3^2 + m_4^2 + m_5^2 + m_6^2 + m_7^2}. \quad (1)$$

Розглянемо кожен складову рівняння (1).

Для розрахунку точності геодезичної мережі використаємо параметричний метод вирівнювання. Коваріаційну матрицю пунктів мережі обчислимо за формулою

$$Q = \mu_0^2 (A^T P A)^{-1},$$

де μ_0 – апріорне значення СКП одиниці ваги; A – матриця коефіцієнтів.

Оскільки до початку будівельних робіт розробляється проект геодезичної мережі, то для мережі на денній поверхні коваріаційна матриця вже відома, а отже, відома і вагова матриця:

$$P_1 = Q_1^{-1}.$$

Об'єднавши вагові матриці запроєктованої наземної та підземної мережі, отримуємо [11]:

$$Q_{1/4} = \mu_0^2 [P_1 + (A^T P A)_4^{-1}]. \quad (2)$$

Вплив похибок підземної та наземної геодезичної мережі на точність геодезичних робіт у тунелі розраховуємо за формулою (2).

Похибка передачі координат у шахту тунелю залежить від точності приладу вертикального проектування, за допомогою якого виконують передачу координат. Для розрахунку цієї похибки використовуємо таке рівняння:

$$m_2 = 0,27 + 0,0141H. \quad (3)$$

У виразі (3) H – глибина передачі в метрах. Величину похибки отримуємо в міліметрах. Для більшості тунелів ця похибка незначна і нею при використанні приладів вертикального проектування можна нехтувати.

Похибка передачі напрямку до підземної геодезичної мережі збільшується із збільшенням відстані від місця орієнтування до місця виконання геодезичних робіт:

$$m_3 = \frac{m_{\text{ор}}}{\rho} S, \quad (4)$$

де $m_{\text{ор}}$ – похибка орієнтування; S – відстань до станції вимірювань.

Орієнтування виконується за допомогою сучасних гіротахеометрів. При цьому кількість ліній підземної геодезичної мережі, на яких визначають дирекційні кути з гіроскопічного орієнтування, може бути довільною; все залежить від довжини тунелю.

Величину зміни положення пункту підземної геодезичної мережі під впливом деформацій необхідно прийняти такою, при якій її величина не впливатиме на точність геодезичних робіт. Допустиму величину зміщення розраховуємо за формулою

$$m_5^2 \leq 0,11m_{\Pi}^2. \quad (5)$$

Якщо значення m_5 не перевищує значення від-



повідно до виразу (5), то це не впливатиме на подальшу точність вимірювань. При недопустимих переміщеннях їх необхідно враховувати та виключати з остаточних результатів вимірювань.

Приймаючи, що вимірювання в тунелі виконують за допомогою електронного тахеометра, вважатимемо, що до його початку прив'язки приладу до пунктів підземної геодезичної мережі вже проведено. В такому випадку похибку прив'язки m_6 приймають рівною похибці центрування та похибці орієнтування приладу. Як і у випадку з похибкою передачі координат, ця похибка не перевищує 1-2 мм, чим також можна знехтувати. При виконанні прив'язки за допомогою лінійно-кутових засічок найкраще очікувану похибку обчислювати за використанням параметричного способу за виразом, аналогічним виразу (2).

Похибка визначення залежить від методу та приладу, якими його виконують. При вимірюванні за допомогою електронного тахеометра отримаємо:

$$\begin{aligned} m_x^2 &= (m_z S \cos \beta \cos z)^2 + (m_\beta S \sin z \sin \beta)^2 + (m_S \sin z \cos \beta)^2; \\ m_y^2 &= (m_z S \sin \beta \cos z)^2 + (m_\beta S \sin z \cos \beta)^2 + (m_S \sin z \sin \beta)^2; \\ m_7 &= \sqrt{m_x^2 + m_y^2}. \end{aligned} \quad (6)$$

Розрахуємо величину можливої СКП визначення положення осі тунелю в плані $m_{\text{п}}$ у площині збійки. Приймаючи задане проектом допустиме відхилення тунельної виробки $\delta = 100$ мм, отримаємо:

$$m = \frac{\delta}{2,5} \Rightarrow m_{\text{п}} = \frac{2}{3} m.$$

Для кожної зустрічної виробки матимемо:

$$m_{\text{п}} = 0,19\delta = 19 \text{ мм.}$$

Коефіцієнт 0,19 відповідає величині в 2/3 загальної похибки, яка припадає на зміщення в плані. Для виразу (1) приймемо принцип рівного впливу і отримаємо СКП кожної складової:

$$m_i = \frac{m_{\text{п}}}{\sqrt{7}} = 0,07\delta. \quad (7)$$

Фактично СКП кожного джерела похибок становить 7 мм. Оскільки точність окремих видів робіт є значно вищою, приймемо такі значення СКП з орієнтовними поправковими коефіцієнтами, які перерозподіляють точність окремих джерел похибок:

$$m_{\text{п}} = \sqrt{2,9m_1^2 + 0,05m_2^2 + 0,5m_3^2 + 2,9m_4^2 + 0,5m_5^2 + 0,05m_6^2 + 0,05m_7^2}. \quad (8)$$

Значення коефіцієнтів фактично вибираються довільно, при їх виборі необхідно керуватись принципами практичної доцільності та здорового глузду.

Аналізуючи основні джерела похибок, що впливають на висотну точність вимірювання в будь-якій точці тунелю, виділимо такі похибки: m_{1h} – СКП висотної геодезичної мережі на денній поверхні; m_{2h} – СКП передачі висоти в шахту; m_{3h} –

СКП підземної висотної геодезичної основи; m_{4h} – СКП деформації пунктів підземної геодезичної основи; m_{5h} – СКП прив'язки приладу до підземної геодезичної основи; m_{6h} – СКП вимірювання перевищення в тунелі.

Отже, сумарна похибка визначення переміщень тунелю по висоті складе:

$$m_{\text{в}} = \sqrt{m_{1h}^2 + m_{2h}^2 + m_{3h}^2 + m_{4h}^2 + m_{5h}^2 + m_{6h}^2}. \quad (9)$$

Проаналізуємо кожну складову рівняння (9).

Для розрахунку точності геодезичної мережі на денній поверхні й під землею скористаємося виразами, аналогічними (2), і отримаємо:

$$Q_{(1/3)h} = \mu_0^2 [P_{1h} + (A^T P A)_{3h}^{-1}]. \quad (10)$$

Похибка передачі висоти в шахту тунелю залежить від методу передачі: скажімо, при використанні лазерних рулеток або електронних тахеометрів похибка передачі дорівнює точності вимірювання відстані даним приладом:

$$m_{2h} = a + bH10^{-6}, \quad (11)$$

де H – глибина передачі в метрах. Величину похибки отримуємо в міліметрах. По відношенню до загальної складової вона незначна.

Зміну положення пункту підземної геодезичної мережі, при якій її значення не впливатиме на точність спостережень за переміщеннями, розраховуємо за формулою:

$$m_{4h}^2 \leq 0,11m_{\text{в}}^2, \quad (12)$$

де $m_{\text{в}}$ – СКП визначення положення точки в тунелі по висоті. Якщо величина m_{4h} не перевищує величини відповідно до виразу (12), то вона не впливатиме на подальшу точність вимірювань.

Похибка прив'язки m_{5h} відповідає виміряній точності приладу. При використанні електронного тахеометра ця похибка головним чином залежить від точності вимірювання висоти тахеометра та візирної цілі. Сучасні методики дозволяють досягти точності вимірювання висоти приладу на рівні 1-2 мм. Якщо висотна прив'язка виконується до кількох точок, то очікувану похибку обчислюють за використанням параметричного способу за формулою, аналогічною до виразу (2):

$$Q_{5h} = \mu_0^2 (A^T P A)^{-1}. \quad (13)$$

Похибка вимірювання електронним тахеометром при односторонньому тригонометричному нівелюванні дорівнює:

$$m_z^2 = (m_z S \sin z)^2 + (m_S \cos z)^2. \quad (14)$$

Для визначення величини $m_{\text{в}}$ використовуємо величину допустимого відхилення тунельної виробки δ :

$$m_{\text{в}} = 0,09\delta.$$

Для виразу (9) приймемо принцип рівного



впливу і отримаємо СКП кожної складової:

$$m_i = \frac{m_B}{\sqrt{6}} = 0,04\delta. \quad (15)$$

СКП кожного джерела становить 4 мм. Як і у випадку розрахунку точності в плані, прийmemo СКП з орієнтовними значеннями поправкових коефіцієнтів, які перерозподіляють точність окремих джерел похибок:

$$m_B = \sqrt{2,7m_{1h}^2 + 0,05m_{2h}^2 + 2,7m_{3h}^2 + 0,5m_{4h}^2 + 0,05m_{5h}^2 + 0,05m_{6h}^2}. \quad (16)$$

Значення коефіцієнтів добирають так, аби можна було обчислити очікувану точність вимірювань і при необхідності оптимізувати схеми побудови наземної та підземної геодезичної мережі або підвищити точність вимірювань.

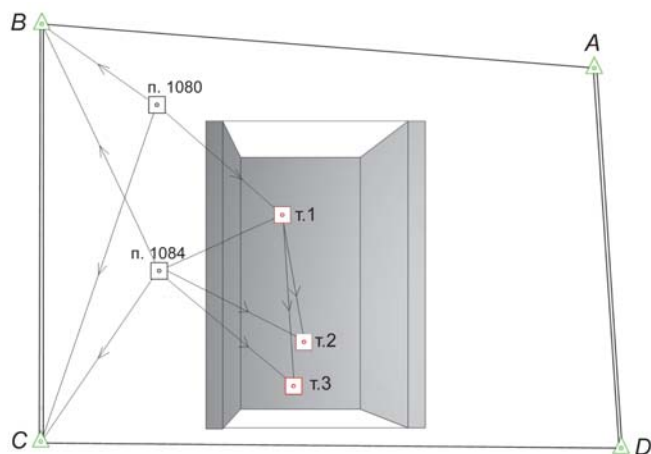
З виразів (8) і (16) отримаємо, що при передачі просторових координат у тунель метрополітену через станції похибка визначення координат на дні котловану не повинна перевищувати: для планових координат – $m_{XY} = 12$ мм; для висотної координати – $m_H = 6,6$ мм.

У ході експерименту з метою визначення максимально можливої точності передачі координат у край несприятливих умовах було виконано передачу координат на дно котловану станції метрополітену, що будується (мал. 2). Головна мета експерименту – порівняльний аналіз координат, які отримано традиційними методами лінійно-кутових побудов та методами супутникових вимірювань.

На якість результатів супутникових спостережень у котловані станції впливають такі фактори:

- обмежений простір і відповідно мале поле видимості супутників (великий кут відсічки);
- наявність додаткових перешкод над приймачами у вигляді розпірних труб, розташованих у два яруси;
- наявність рухомого кранового обладнання в зоні спостереження супутників;
- виконання будівельних робіт на об'єкті.

Спостереження проводились на пунктах лінійно-кутової мережі, координати яких було визначе-



Мал. 2. Схема передачі координат у котлован

но прокладанням полігонометричних ходів.

Супутникові спостереження виконувались одразу на двох пунктах із застосуванням стаціонарно встановленої станції GNSS на даху будинку. Тривалість сесії спостережень – 1,5 години.

Для отримання достовірних результатів дослідження було повторено двічі з використанням різних типів GPS-приймачів (Торсон GB1000 та Leica GNSS 1200) і одного спільного пункту на дні котловану станції.

Отримані результати спостережень дають можливість, по-перше, порівняти точність визначення координат на дні котловану лінійно-кутовим методом із визначенням місцеположення супутниковим методом. По-друге, вони дозволяють визначити СКП створення наземної геодезичної мережі GNSS-методом.

Результати спостережень у двох циклах з використанням різних GNSS-приладів наведено в табл. 1.

Таблиця 1. Порівняння результатів спостережень, м

№ точки	Лінійно-кутові виміри			GPS-спостереження			Різниця координат		
	X	Y	H	X	Y	H	ΔX	ΔY	ΔH
T.1	0,601	0,766	0,162	0,582	0,766	0,178	0,019	0,000	-0,016
T.2	0,329	0,639	0,971	0,311	0,646	0,942	0,018	-0,007	0,029
T.1	0,601	0,766	0,162	0,601	0,758	0,187	0,000	0,008	-0,025
T.3	0,560	0,097	0,888	0,546	0,112	0,931	0,014	-0,015	-0,043

За результатами спостережень проведено оцінювання точності GPS-спостережень у програмних засобах для оброблення даних за їх внутрішньою збіжністю (див. табл. 2).

Таблиця 2. Точність GPS-вимірів, мм

№ точки	m_{XY}	m_H
T.1	6,0	11,0
T.2	14,0	20,0
T.1	11,0	17,0
T.3	18,0	30,0

Порівняємо точність, отриману за результатами супутникових вимірювань, з допустимими значеннями (див. табл. 3).

Таблиця 3. Порівняльний аналіз результатів супутникових вимірювань з допустимими значеннями, мм

Показник	m_{XY}	m_H
GPS-виміри	12,3	19,5
Допуск	12,0	6,6

Планова точність супутникових вимірювань задовольняє вимоги до точності будівництва метрополітену. Як і очікувалось, висотну складову визначено зі значно нижчою точністю, ніж того вимагають розрахунки. Тепер порівняємо допустиму точність передачі координат з фактичною точністю передачі, визначеною за різницями координат (див. табл. 4).



Таблиця 4. Порівняльний аналіз точності вимірювань за різницями координат та допустимими значеннями, мм

Показник	m_{xy}	m_H
Різниця	13,0	30,0
Допуск	12,0	6,6

Отримані результати підтверджують зроблені на початку статті припущення щодо можливостей супутникових методів вимірювань при геодезичному забезпеченні будівництва підземних споруд. У найскладніших умовах спостережень підтверджено, що планова точність супутникових вимірювань задовольняє вимоги до точності геодезичного забезпечення. Одержані різниці координат свідчать про наявність певного систематичного зсуву в координатах, що, можливо, пов'язано з визначенням параметрів переходу між різними системами координат і що потребує додаткового дослідження.

Висновки. Результати дослідження свідчать про достатню точність супутникового методу визначення місцеположення для геодезичного забезпечення будівництва метрополітену в плані. Розглянуто в статті питання потребує подальшого дослідження. Особливу увагу необхідно звернути на можливість підвищення точності визначення висотної складової супутниковими методами, оскільки інструментальна точність визначення перевищень при цьому в кілька разів вища від отриманої експериментальним шляхом.

Література

1. Антонович, К.М. Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии. Т. 1 [Текст] / К.М. Антонович: науч. изд.-е. – М.: Картоцентр; Новоси-

бирск: Наука. – 2005. – 334 с.

2. Білоус, М.В. Розроблення методики спостережень за переміщеннями тунелів метрополітену на стадії будівництва [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.24.01 / М.В. Білоус. – Київ, КНУБА, 2011. – 16 с.

3. ВСН 160-69. Инструкция по геодезическим и маркшейдерским работам при строительстве транспортных тоннелей (Минтрансстрой) [Текст] (Дата введ.: 1970-04-01).

4. Геодезия в тоннелестроении. – В 2 ч. [Текст] / А.Н. Баранов, К.И. Егупов, Е.И. Зельдер [и др.]. – М.: Геодезиздат; 1952. – Ч. 1. – 503 с.; 1953. – Ч. 2. – 492 с.

5. Глобальна система визначення місцеположення. Теорія і практика [Текст] / Б. Гофманн-Велленгоф, Г. Ліхтенеггер, Д. Коллінз; пер. з англ.; під ред. Я. С. Яцківа. – К.: Наук. думка, 1995. – 380 с.

6. ДБН В.2.3-7-2003. Споруди транспорту. Метрополітени [Текст]. – К.: Держбуд України, 2003. – 195 с. (Чинні з 01.07.2003).

7. Дейнека, Ю.П. Геодезичні роботи в тунелюбудуванні [Текст] / Ю.П. Дейнека. – Л.: Вид-во Нац. ун-ту "Львівська політехніка", 1999. – 220 с.

8. Жуков, Б.Н. Геодезический контроль инженерных объектов промышленных предприятий и гражданских комплексов [Текст] / Б.Н. Жуков, А.П. Карпик. – Новосибирск: СГГА, 2006. – 118 с.

9. Левчук, Г.П. Прикладная геодезия. Геодезические работы при изысканиях и строительстве инженерных сооружений [Текст] / Г.П. Левчук, В.Е. Новак, Н.Н. Лебедев; под. ред. Г.П. Левчука. – М.: Недра, 1983. – 400 с.

10. Поликашечкин, А.И. Геодезическо-маркшейдерское обеспечение строительства подземных сооружений в городах [Текст] / А.И. Поликашечкин. – М.: Недра, 1990. – 288 с.

11. Chrzanowski, A. Optimization of the Breakthrough Accuracy in Tunneling Surveys [Text] / A. Chrzanowski // The Canadian Surveyor. – 1981. – Vol. 35. – № 1. – P. 5-16.

Надійшла 16.11.11

* * *

УДК 528.48

Р. В. Шульц

МОБІЛЬНІ КОМПЛЕКСИ ЛАЗЕРНОГО СКАНУВАННЯ ЗАЛІЗНИЧНИХ КОЛІЙ

Представлен обзор современных мобильных систем лазерного сканирования железнодорожных путей. Предложены формулы для выполнения предварительного расчета точности мобильного лазерного сканирования. В процессе экспериментальных исследований точности мобильного лазерного сканирования обнаружены факторы, которые снижают фактическую точность такого метода сканирования, что необходимо обязательно учитывать при выполнении работ.

A review of the modern mobile systems of railway tracks laser scanning is presented. The formulas for preliminary calculation of mobile laser scanning accuracy are given. In the process of the experimental research some factors reducing the actual accuracy of laser scanning have been discovered; these factors must be taken into account during execution of the works.

Постановка проблеми. У будь-якій державі система залізниць є однією з найважливіших транс-

портних інфраструктур. До цієї системи, окрім безпосередньо залізничної колії, входить цілий комплекс інженерних споруд. Експлуатація залізниць передбачає виконання постійного контролю

© Р. В. Шульц, 2012