

УДК 517

д.т.н., доцент Катушков В.О. ,
к.т.н., доцент Шульц Р.В., Сосса Б.Р.,
Київський національний університет будівництва і архітектури

СПІВВІДНОШЕННЯ МІЖ ОЧІКУВАНОЮ ТОЧНІСТЮ НАЗЕМНОГО ЛАЗЕРНОГО СКАНУВАННЯ ТА ВИМОГАМИ ДО ТОЧНОСТІ ВИКОНАННЯ ІНЖЕНЕРНО-ГЕОДЕЗИЧНИХ РОБІТ

Запропоновано загальний підхід до визначення точності наземного лазерного сканування при виконанні інженерно-геодезичних робіт та виконано порівняльний аналіз точності наземного лазерного сканування та точності інженерно-геодезичних робіт.

Ключові слова: наземне лазерне сканування, точність, допустиме відхилення, геодезичні роботи.

Постановка проблеми. На сьогоднішній день наземне лазерне сканування (НЛС) все більше використовується для вирішення найрізноманітніших задач, у тому числі, інженерно-геодезичних. Використовуючи, на початку, системи НЛС для знімання складних промислових об'єктів, користувачі цих систем поступово зацікавились новими галузями використання НЛС. В теперішній час НЛС широко використовується при будівництві, маркшейдерських роботах, охороні пам'яток культурної спадщини, для вирішення різних задач промисловості, класичного топографічного знімання та, навіть, у криміналістиці. Таким чином, цілком логічним є використання систем НЛС у інженерно-геодезичних роботах. В Україні ці технології розвинуті набагато менше ніж у світі з цілого ряду причин, у тому числі, фінансових; тому вищесказане, більшою мірою, відноситься до ринку розвинених країн, де, при сформованому списку провідних виробників обладнання, основна ринкова боротьба йде між виробниками програмного забезпечення. Особливістю інженерно-геодезичних робіт є їх достатньо висока точність в порівнянні з класичними геодезичними задачами та високі вимоги до представлення кінцевого продукту.

Огляд літератури. В Україні питання точності НЛС до теперішнього часу досліджене тільки в роботі [1]. В цій праці побудована строга теорія виконання попереднього розрахунку точності НЛС з врахуванням всіх факторів, що впливають на НЛС. В Росії питаннями точності НЛС займається колектив вчених з Новосибірська [2,3]. За кордоном питанню дослідження точності НЛС приділяється значно більша увага. Найбільш значні результати

отримано в роботах Boehler W., Bordas Vicent M., Marbs A., Schulz T., Reshetyuk Y., Lichti D.D., Gordon S.J., Staiger R. [4-8]. Зокрема досліджено вплив на точність НЛС точності геопривязки сканера, типу і стану відбиваючої поверхні, калібрування лазерних сканерів та ін. Стосовно застосування НЛС до вирішення задач інженерної геодезії, то найкращі результати отримані в роботах [9-11]. До теперішнього часу немає порівняльного аналізу точності наземного лазерного сканування та точності інженерно-геодезичних робіт.

Постановка завдання. Метою роботи є виконання порівняльного аналізу точності наземного лазерного сканування та вимог до точності інженерно-геодезичних робіт.

Виклад основного матеріалу. Історично склалось, що НЛС використовується, в основному, при зніманні складних промислових об'єктів та для цілей охорони пам'яток культурної спадщини. Не применшуючи ролі зазначених робіт, найбільш перспективним останнім часом є використання даної технології для вирішення задач інженерної геодезії.

До основних задач які вирішуються при проектуванні та будівництві цивільних або промислових споруд слід віднести:

1. Проведення інженерно-геодезичних вишукувань на території будівництва, а саме: створення опорних планових і висотних геодезичних мереж і проведення топографічного знімання для отримання актуального стану рельєфу і ситуації.

Результати знімання слугують вихідними даними для подальших проектних робіт. Дана стадія – одна з найменш точних серед всього комплексу інженерно-геодезичних робіт.

2. Створення та побудова геодезичної розмічувальної мережі будівництва.

Безпосередньо, розмічувальні роботи при будівництві – це знаходження і закріплення на місцевості точок і ліній, які визначають планове і висотне положення будівель та споруд.

3. Геодезичні роботи при монтажі будівельних конструкцій. Можна розділити на такі основні види: контроль геометричних параметрів і розмічування елементів конструкцій; детальні розмічувальні роботи; вивірка планового і висотного положення конструкцій, що монтуються, визначення геометричних параметрів об'єкта будівництва, що підлягає геодезичному контролю. В процесі будівництва визначення цих параметрів є невід'ємною складовою контролю якості. Так, забороняється починати наступний етап будівельно-монтажних робіт до закінчення виконавчого знімання та складання виконавчих схем (креслень).

По точності реалізації в ході будівництва геометричні параметри будівлі та споруди розділяють на технічної точності (10 мм і більше), підвищеної точності (2-10 мм) та прецизійні (0,2-2 мм або точніше). При цьому, під точністю реалізації в цьому випадку розуміють точність установки у взаємне місцеположення окремих конструктивних елементів. Точність реалізації визначається, в першу чергу, призначенням будівлі та, в меншій мірі, залежить від розміру та габаритів.

4. Виконавче знімання виконується для визначення відповідності збудованого об'єкта в цілому або окремих його частин проектним даним. На відміну від геодезичного контролю під час монтажу будівельних конструкцій, мета такого знімання – визначити фактичне планове і висотне положення будівель і споруд, їх частин, елементів, інженерних комунікацій, які постійно закріплені. Воно буває поточним і остаточним.

Поточне виконавче знімання проводиться в процесі будівництва і характеризує якість виконання робіт на поточному етапі.

Остаточне виконавче знімання виконують після завершення всіх будівельних і монтажних робіт. За результатами знімання отримують оцінку якості виконаних робіт шляхом порівняння фактичних параметрів будівлі або споруди з проектними даними та складають виконавчу документацію, яка використовується в подальшому при експлуатації об'єкта.

5. Геодезичний моніторинг – комплекс геодезичних робіт та систематичних спостережень за динамікою розвитку деформацій в період будівництва та експлуатації. Включає в себе спостереження за плановими і висотними зміщеннями основ і фундаментів, окремих конструктивних елементів та їх взаємні зміщення або деформації.

Спостереження за осадками та деформаціями будівель і споруд проводиться до моменту їх стабілізації. Для деяких об'єктів такі спостереження проводяться протягом всього терміну експлуатації.

Приведені задачі вирішуються з використанням різних геодезичних приладів. Проаналізуємо наявні методи та технології вирішення вищевказаних задач.

1. Проведення топографічного знімання відбувається класичними методами: аерофотознімання, тахеометричне знімання та нівелювання поверхні з одночасним зніманням ситуації (для відкритої рівнинної місцевості). На практиці найчастіше використовується метод тахеометричного знімання, часто, в комплексі з GNSS спостереженнями для одночасного створення планової опорної геодезичної мережі. Результатом є план території будівництва в масштабі від 1:500 до 1:2000, в залежності від призначення споруди.

2. Створення опорної розмічувальної мережі виконують методами побудови лінійно-кутових мереж або GNSS-мереж, при підвищених вимогах до висотних розмічувальних робіт для створення висотної мережі використовують геометричне нівелювання. При цьому використовують оптичні або цифрові нівеліри.

Розмічувальні роботи при будівництві виконуються кутомірними та далекомірними інструментами. В класичному вигляді, це теодоліт і рулетка або мірна стрічка. На практиці, переважна більшість розмічувальних робіт виконується за допомогою електронних тахеометрів.

Висотні розмічувальні роботи виконуються за допомогою геометричного нівелювання. Крім того, на окремих об'єктах можна використовувати тригонометричне нівелювання або ротаційні лазерні нівеліри.

3. Визначення геометричних параметрів споруд, їх частин і окремих конструкцій на будівельному майданчику можна робити безпосередніми або непрямыми вимірами. Безпосередній вимір полягає в безпосередньому вимірюванні величини, такої, як лінійна відстань за допомогою рулетки або мірної стрічки; або кут – шляхом встановлення кутомірного приладу на вершину кута. Непрямі виміри отримують аналітично – за допомогою координат точок елемента або конструкції. Використовуються, в основному, при відсутності прямого доступу до елемента або неможливості проведення прямих вимірювань.

4. Виконавчі знімання об'єкту загалом, як правило, проводяться методом, аналогічним тому, яким проводили топографічне знімання перед початком проектування. Це стосується, здебільшого, об'єктів I та II категорії складності. Для виконавчого знімання конструктивних елементів споруди для потреб подальших досліджень на стадії експлуатації використовують методи та технології аналогічні до тих, що використовуються для контрольних знімань на різних стадіях монтажу.

5. Спостереження за осадками і деформаціями будівель і споруд (геодезичний моніторинг) ведеться, як традиційними геодезичними методами, наприклад визначення вертикальних зміщень визначають за допомогою високоточного нівелювання, так і з використанням різноманітних автоматизованих комплексів.

Загалом можна стверджувати, що за допомогою систем НЛС технічно можна виконувати більшість робіт при проектуванні та будівництві інженерних споруд. Неможливим є виконання лише розмічувальних робіт. Враховуючи особливості конструкції і принцип дії систем НЛС (необхідність хоча б мінімального оброблення для отримання результатів у прийнятному вигляді),

такими системами не вдасться вирішити ті задачі, що потребують високого ступеню оперативності.

Для обґрунтування можливості використання наземних лазерних сканерів при вирішенні інженерно-геодезичних задач було проведено аналіз необхідної точності визначення геометричних параметрів при зведенні залізобетонних та металевих конструкцій, вимоги до точності виготовлення та зведення яких є найвищими. Згідно з [12], можна скласти узагальнюючу таблицю по вимогам до точності при будівельних роботах. В табл. 1 приведені значення допустимих відхилень при перевірці монтажу залізобетонних і металевих конструкцій.

Таблиця 1

Загальні вимоги до точності забезпечення геометричних параметрів в будівництві

№	Геометричні параметри	δ , мм
<i>Залізобетонні конструкції</i>		
1	Відхилення ліній площин перетинів від вертикалі (горизонталі) або проектного ухилу	10-100
2	Довжина або проліт елементів	20
3	Розмір поперечного перерізу елементів	3-6
4	Відмітки поверхонь і закладних виробів, що слугують опорами для сталевих або збірних залізобетонних колон і інших збірних елементів	5
5	Розташування анкерних болтів в плані і по висоті	5-20
6	Різниця відміток на стику двох суміжних поверхонь	3
7	Відхилення від суміщення орієнтирів при установці збірних елементів, а також відхилення закінчених монтажних конструкцій від проектного положення.	5-30
8	Розміри, що визначають збирання конструкцій при збірці окремих конструктивних елементів і блоків.	5-12 (лінійні) 12-30 (діагоналі)
<i>Металеві конструкції</i>		
9	Фактичне положення змонтованих конструкцій (крім 10)	5-20
10	Різниця відміток опорних поверхонь сусідніх колон і опор по ряду і прольоту.	3
11	Установка кранових шляхів (крім 12)	10-20
12	Стики рейок	2-4
13	Установка кранових шляхів для підвісних кранів	2-10

Аналіз значень відхилень показує такі основні значення: 2, 3, 5, 6, 10, 15, 20 і 100 мм. Причому, величина 2 мм зустрічається тільки при роботах з контролю за установки кранових шляхів, як різниця відміток, а 3 мм, переважно, як відмітки. Таким чином, дані роботи, оптимально виконувати за допомогою геометричного нівелювання.

Переважає більшість значень відхилень геометричних параметрів знаходиться в діапазоні 5-20мм. Ці вимоги відносяться до стадії контрольних вимірів та виконавчих знімків. При розрахунку необхідної точності вимірювання координат M для визначення відхилень фактичного від проектного положення приймаємо:

$$M = \delta \times 0,2 \quad (1)$$

З використанням формули (1) складемо таблицю для найтипівіших значень відхилень (табл. 2).

Таблиця 2

Співвідношення між допустими відхиленнями та точністю геодезичних вимірювань

Допустиме відхилення, мм	2	3	4	5	8	10	15	20
Точність вимірювань, мм	0,4	0,6	0,8	1,0	1,6	2,0	3,0	4,0

Тепер порівняємо отримані значення точності геодезичних робіт з точністю НЛС. Для цього спочатку виконаємо аналіз похибок, що впливають на точність НЛС.

Джерела похибок в результатах НЛС поділяються на інструментальні та методичні. Інструментальні похибок обумовлені збиранням сканера, взаємним монтажем деталей, проведенням юстуванням. Вони визначаються, безпосередньо, після збирання і юстування приладу і вказуються в технічних характеристиках наземного лазерного сканера. Крім того, величини цих похибок можуть бути визначені за допомогою періодичних калібрувань і/або під час проведення метрологічних повірок. Джерелом методичних похибок слугують зовнішні умови при проведенні сканування та характеристики об'єкта сканування. На відміну від інструментальних, методичні похибки можна врахувати при обробленні результатів вимірів, таким чином, максимально зменшивши їх вплив. Ці похибки умовно поділяються на похибки, що обумовлені зовнішнім середовищем та ті, що обумовлені характеристиками об'єкта сканування.

Отже, враховуючи те, що вплив методичних похибок можна зменшити, розглянемо інструментальні похибки сканерів, що найбільше впливають на точність визначення координат. Різні джерела по різному оцінюють кількість і вплив складових інструментальної похибки. Не виключаючи гіпотетичну складову так званої «стабільності роботи», що включає в себе нагрів сканера, його вібрацію та інші несистемні параметри, все ж, найбільша складова інструментальної похибки наземних лазерних сканерів припадає, по аналогії з класичними геодезичними приладами на кутову та лінійну похибки. При цьому, дані параметри мають вказуватись у технічних характеристиках сканерів.

Цікаво, що далеко не всі виробники систем НЛС надають інформацію про кутову точність сканерів, обмежуючись лише лінійною. Величина кутової похибки досить суттєво впливає на загальну точність визначення координат лазерним сканером, навіть у порівнянні з лінійною точністю.

Що стосується лінійної точності, то тут ситуація аналогічна ситуації з електронними тахеометрами з різним типом лазера. В НЛС використовуються три способи вимірювання відстані: фазовий, імпульсний і тріангуляційний. Тріангуляційний спосіб використовується в досить специфічному обладнанні для цілей промисловості та не підходить для використання в галузі будівництва.

Імпульсний метод вимірювання відстані полягає у вимірюванні часу проходження сигналу від джерела випромінювання до об'єкта і назад:

$$R = \frac{v \cdot \tau}{2}$$

де v – швидкість розповсюдження електромагнітних хвиль, τ – вимірний час з моменту подачі сигналу до його прийому.

Фазовий метод заснований на визначенні різниці фаз надісланого та прийнятого модульованого сигналу:

$$R = \frac{\varphi_{2R} \cdot v}{4\pi \cdot f}$$

де φ_{2R} – виміряна різниця фаз, f – частота модуляції.

Основна відмінність між фазовими та імпульсними віддалемірами полягає у дальності вимірювання і точності отриманих результатів.

Так, фазові сканери характеризуються високою точністю вимірювання на невеликих відстанях та меншим, у порівнянні з імпульсними, діапазоном роботи в більшу сторону. Відповідно, імпульсні сканери програють у точності, але виграють у відстані.

Для порівняння візьмемо 2 наземних лазерних сканери: Z+F Imager 5010 (Zoller+Fröhlich, Німеччина – фазовий метод вимірювання відстані) і GLS-1500 (Торсон, Японія – імпульсний метод вимірювання відстані), як найточніші в своєму класі (з відомими значеннями кутової та лінійної похибки).

Віддалемір Z+F Imager 5010 дозволяє вимірювати відстані до 187м, а GLS-1500 – до 330м. При цьому, точність вимірювання відстані Z+F Imager 5010 до 10м складає від 0,3 до 0,5мм (в залежності від альbedo поверхні), від 10 до 25м – 0,5-1,0мм, від 25 до 50м – 0,8-2,7мм, на 100м – від 2,0 до 10,0мм.

Точність вимірювання відстані GLS-1500 до 150м (за рахунок використання системи трьох лінз) складає 4мм.

На практиці, максимальна виміряна відстань та точність залежать, у тому числі, від зовнішніх факторів – ступеню освітлення, температури, альbedo об'єкта знімання, його конфігурації та ін. Але, як зазначалось вище, ці похибки відносяться до методичних та можуть бути мінімізовані.

Дослідимо точність визначення координат кожної точки за допомогою систем НЛС, враховуючи інструментальні похибки.

Похибка визначення координат M залежить від кутової та лінійної складових:

$$M = \sqrt{x^2 + d^2}$$

Лінійна похибка d на різних відстанях для зазначених сканерів складатиме (табл. 3).

Таблиця 3

Лінійна похибка наземних лазерних сканерів

Z+F					GLS				
Відстань, м	10	25	50	100	10	25	50	100	150
d , мм	0,30	0,50	0,80	2,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00

Для сканера Z+F дані по лінійній похибці на 150м відсутні, альbedo поверхні прийнято 80%.

Кутова складова в лінійній мірі вираховується за формулою

$$x = (\alpha'' * Dmm) / \rho''$$

де α - кутова похибка сканера в секундах, і для тих самих відстаней отримуємо (табл. 4).

Таблиця 4

Кутова похибка наземних лазерних сканерів

Z+F					GLS				
Кутова точність	25,2"				6"				
Відстань, м	10	25	50	100	10	25	50	100	150
d , мм	1,24	3,09	6,18	12,36	0,29	0,73	1,45	2,91	4,36

Як видно, невелика лінійна точність імпульсних сканерів компенсується більшою кутовою.

Отже, для відстаней 10, 25, 50 і 100 м значення похибки визначення координат складатиме (табл. 5).

Таблиця 5

Загальна похибка визначення координат наземним лазерним сканером

Z+F						GLS				
Відстань, м	10	25	50	100		10	25	50	100	150
М, мм	1,3	3,1	6,2	12,5		4,0	4,1	4,3	5,0	5,9

Для наочності представимо дані по точності визначення координат на відстані від 10 до 100м у вигляді графіка:

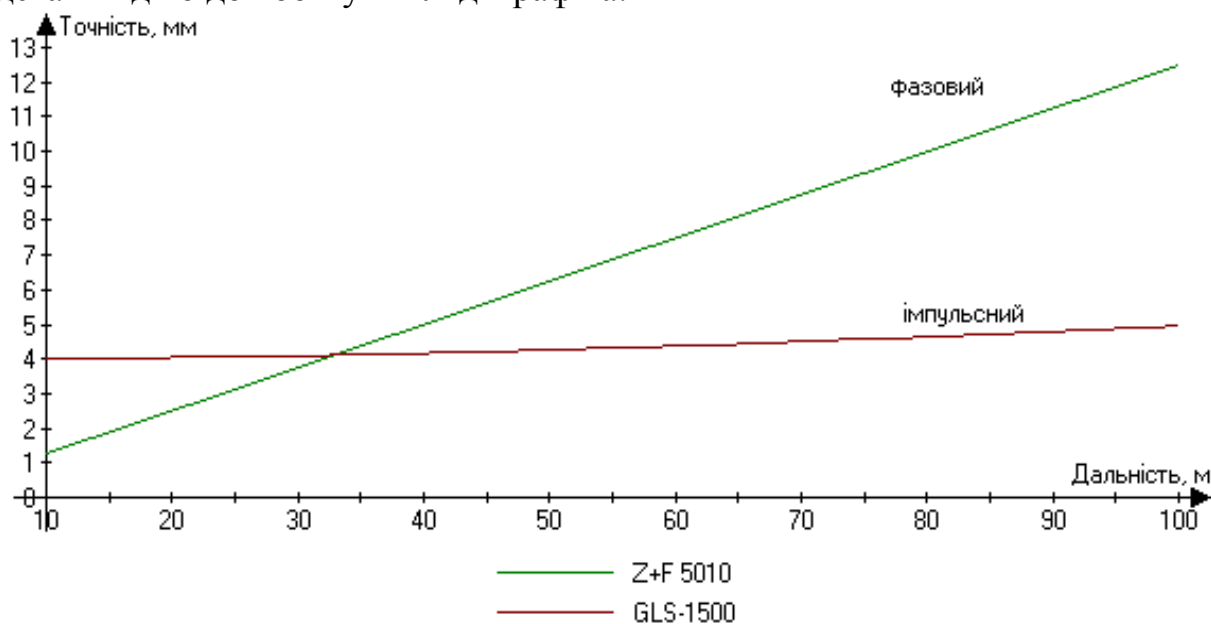


Рис. Зміна похибок для фазового та імпульсного сканерів в залежності від відстані сканування

З графіку видно, що на відстані 33м до об'єкта сканування вищу точність має сканер з фазовим типом лазера, а після 33м – з імпульсним. Причому, фазовим сканером можливо визначити координати з точністю близько 1,5мм на відстані 15м до об'єкта, в той час, як імпульсним – з точністю, кращою ніж 5мм на відстані 100м.

Крім того, для фазового сканера характерна стабільна відносна точність визначення координат – приблизно, 1/8000, а для імпульсного – підвищення відносної точності майже в 10 раз – від 1/2500 на 10м до 1/20000 на 100м.

Отже, точність визначення координат за допомогою наземного лазерного сканера складає 1,3 – 12,5 мм (10...100м, НЛС з фазовим методом вимірювання відстаней) та 4,0 – 5,9мм (10...150м, НЛС з імпульсним методом вимірювання відстаней).

Таким чином, порівнюючи таблиці 2 і 5 видно, що для досягнення необхідної точності визначення геометричних параметрів елементів та конструкцій при будівництві, в переважній більшості випадків, можна використовувати системи НЛС.

Крім того, враховуючи специфіку технології, визначення геометричних параметрів конструкцій як під час геодезичного контролю, так і під час виконавчих знімів за допомогою НЛС при зменшенні часу польових робіт дає набагато більше інформації про об'єкт знімання, ніж традиційні методи. Так, за результатами НЛС можна визначити не тільки відстань і напрямок між двома точками, але й величини і вектори прогину та кручення.

Висновки. Отже, незважаючи на наявність деяких стереотипів, системи НЛС вже можуть слугувати суттєвим доповненням до класичних методів виконання інженерно-геодезичних робіт. При наявності тільки одного недоліку – неможливості виконання розмічувальних робіт, ці системи дозволяють дуже сильно скоротити час польових робіт, при цьому отримати значно більший об'єм інформації та, що найважливіше, отримати точність, порівняну з точністю класичних методів. Також, при проведенні калібрування цих систем, теоретично, можливо досягнути точності високоточних геодезичних приладів. Для більш точних робіт, але на невеликих відстанях доцільно використовувати лазерні сканери з фазовим типом лазера, а для робіт, які потребують вимірів на великих відстанях або для крупних об'єктів доцільне використання лазерного сканера з імпульсним типом лазера.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Шульц Р.В. Теорія і практика використання наземного лазерного сканування в задачах інженерної геодезії: Автореф. дис. доктора техн. наук: 05.24.01 / Київський національний університет будівництва і архітектури – К., — 2012 р. -32 с.
2. Наземное лазерное сканирование: монография / В.А. Середович, А.В. Комиссаров, Д.В. Комиссаров, Т.А. Широкова. – Новосибирск: СГГА, 2009. – 261 с.
3. Комиссаров А.В. Методика исследования метрических характеристик сканов: Автореф. дис. кандидата техн. наук: 25.00.32 / Сибирская государственная геодезическая академия – Н., — 2007 г. -24 с.
4. Boehler W., Bordas Vicent M., Marbs A. Investigating laser scanner accuracy. XIXth CIPA Symposium at Antalya, Turkey, October 2003.
5. Schulz T. Calibration of a Terrestrial Laser Scanner for Engineering Geodesy. Dissertation for the degree of Doctor of Sciences. ETH Zurich, 2007, 172 p.
6. Reshetyuk Y. Self-calibration and direct georeferencing in terrestrial laser scanning. Doctoral thesis in Infrastructure, Geodesy. Royal Institute of Technology (KTH), Department of Transport and Economics, Division of Geodesy, Sweden, Stockholm, January 2009, 174 p.

7. Lichti D.D., Gordon S.J. Error propagation in directly georeferenced terrestrial laser scanner point clouds for cultural heritage recording. WSA2 Modelling and visualization, FIG Working Week 2004, Athens, Greece 22-27 May 2004, p 16.
8. Staiger R. Laser scanning in an industrial environment. FIG XXII International Congress Washington, D.C., USA, April 19-26, 2002, TS 6.6 Engineering Surveys for Industry and Research, 8 p.
9. Alba M., Roncoroni F., Scaioni M. Investigations about the accuracy of target measurement for deformation monitoring // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXVII. Part B5. Beijing 2008 pp. 1053-1060.
10. Berenyi A., Lovas T., Barsi A., Dunai L. Potential of terrestrial laser scanning in load test measurements of bridges // Periodica Polytechnica 2009 Civil Engineering 53/1 (2009) pp. 25–33.
11. Lindenbergh R., Pfeifer N., Rabbani T. Accuracy analysis of the leica HDS3000 and feasibility of tunnel deformation monitoring. ISPRS WG III/3 Workshop "Laser scanning 2005", Enschede, the Netherlands, September 12-14, 2005 6p.
12. СНиП 3.03.01-87. Строительные нормы и правила. Несущие и ограждающие конструкции. Государственный строительный комитет СССР. 124 с.

АННОТАЦИЯ

Предложен общий подход к определению точности наземного лазерного сканирования при выполнении инженерно-геодезических работ и выполнен сравнительный анализ точности наземного лазерного сканирования и требований к точности инженерно-геодезических работ.

SUMMARY

The general going is offered to determination of accuracy of terrestrial laser scanning at implementation of engineer-geodetic works and the comparative analysis of accuracy of terrestrial laser scanning and requirements is executed to accuracy of engineer-geodetic works.