

Міністерство освіти та науки України  
Державний вищий навчальний заклад «Криворізький національний університет»  
Національний університет «Львівська політехніка»

На правах рукопису

Намінат Олександр Сергійович

УДК: 528.482+528.8.042

**УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ ГЕОДЕЗИЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ  
МОНІТОРИНГУ ЛІНІЙНИХ ОБ'ЄКТІВ В ЗОНАХ ВПЛИВУ ПІДЗЕМНИХ  
ГІРНИЧИХ РОБІТ.**

Спеціальність 05.24.01 – геодезія, фотограмметрія та картографія

Дисертація на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Науковий керівник –  
доктор технічних наук, професор  
В.Д.Сидоренко

Львів 2020 р.

## АНОТАЦІЯ

**Намінат О.С. Удосконалення методів геодезичного забезпечення моніторингу лінійних об'єктів в зонах впливу підземних гірничих робіт. – Рукопис.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.24.01 – геодезія, фотограмметрія та картографія. – Національний університет „Львівська політехніка” МОН України, Львів, 2019.

У дисертаційній роботі вирішена актуальна науково-технічна проблема - розробка методики знімання лінійних об'єктів, що ґрунтується на оптимізації процесу із врахуванням взаємного розташування сканера й об'єктів зйомки. Використання розробленої методики та дотримання запропонованої послідовності роботи зменшили похибки визначення місцеположення контрольних точок при скануванні лінійного об'єкта. Запропонована методика охоплює всі етапи знімального процесу, включаючи попередній аналіз, знімання і постобробку отриманих результатів з кінцевою метою отримання тривимірної, достовірної та інформативної моделі лінійної споруди. Розроблена методика дозволяє підвищити оперативність проведення моніторингу лінійних споруд в зонах впливу підземних гірничих робіт.

Розглянуто можливість застосування технологій наземних лазерних систем при вирішенні основних завдань маркшейдерського забезпечення на лінійних об'єктах.

Запропоновано методику побудови цифрової моделі лінійної споруди за результатами наземної лазерної зйомки з урахуванням усіх розроблених рекомендацій щодо оптимізації самого процесу.

Здійснено дослідження впливу кута нахилу, кольору і типу поверхні, що впливають на точність вимірювання НЛС. Також виконано дослідження впливу просторової роздільної здатності НЛС і кута нахилу лазерного променя НЛС на точність і якість отриманих результатів.

У роботі запропонована методика визначення помилки візування лазерного променя для подальшого калібрування НЛС. Встановлено оптимальні відстані сканування для наступного аналізу просторового положення лінійних об'єктів.

Знайдено залежності, які впливають на щільність сканування та величини похибок. Встановлена залежність впливу висоти сканера і відстані на щільність кутового кроку сканування, температури прогріву на точність, зміни лінійного кроку сканування і відстані на щільність, залежності кількості точок від відстані. Розраховані стандартні відхилення отриманих результатів.

Упровадження результатів дасть змогу отримувати дані не тільки з реперів профільної лінії, але і всього об'єкту в цілому, що значно збільшить області виявлення рушійних процесів у тілі лінійного об'єкту, і дасть змогу вчасно реагувати на наслідки природнього або техногенного впливу.

Ключові слова: наземне лазерне сканування, тривимірна модель, деформація, лінійний об'єкт, дорога, цифрова модель, моніторинг.

Список наукових праць:

1. Намінат О.С. Использование GPS-систем при определении деформаций земной поверхности в горнодобывающих регионах / О. С. Намінат, М. В. Литвиненко. // збірник тез доповідей студентів. – 2008. – С. 15–18.

2. Намінат О. С. Дослідження факторів, які впливають на точність геодезичних GPS-вимірювань при вирішенні маркшейдерсько-геодезичних задач / О. С. Намінат. // Гірничо-металургійний комплекс: досягнення, проблеми та перспективи розвитку. – 2009. – С. 47.

3. Намінат О. С. Необхідність створення єдиної маркшейдерсько-геодезичної опорної GPS-мережі для якісного моніторингу геодинамічних полігонів / О. С. Намінат. // Гірничо-металургійний комплекс: досягнення, проблеми та перспективи розвитку. – 2010. – С. 45–46.

4. Naminat O. S. Study of factors affecting the accuracy of geodetic GPS-measurements in solving mine-surveying tasks / O. S. Naminat, V. D. Sidorenko. // "Видавничий дім". – 2010. – С. 137–138.

5. Намінат О.С. Визначення неоднорідностей та порожнеч в гірському масиві методом спектрального сейсмічного профілювання / В. Д.Сидоренко, В. М. Здешиц, О. С. Намінат, М. А. Сорокопуд. // Вісник КТУ: збірник наукових праць. – 2011. – №29. – С. 78–82.
6. Намінат О. С. Наземное лазерное сканирование как метод мониторинга линейных сооружений / О. С. Намінат, А. В. Болотніков. // Сборник трудов научного симпозиума «Неделя горняка-2012» г. Москва. – 2012. – С. 34–37.
7. Намінат О. С. Прогнозирование и оценка состояния устойчивости бортов карьера №4, внешних и временных / О. С. Намінат, Е. А. Несмашний, А. В. Болотніков. // Гірничий вісник ДВНЗ "Криворізький національний університет". – 2012. – №95. – С. 69–74.
8. Намінат О. С. Сегодняшняя необходимость в 3d кадастре / О. С. Намінат. // Наукові аспекти геодезії, землеустрою та інформаційних технологій. Університет новітніх технологій. матеріали II науково-практичної конференції 10-13 червня м. Київ. – 2013. – С. 28–32.
9. Намінат О. С. Геоінформаційні технлогії наземного лазерного сканування в гірничо-видобувному регіоні / [О. С. Намінат, В. Д. Сидоренко, М. В. Шолох та ін.]. // Гірничий вісник ДВНЗ "Криворізький національний університет". – 2013. – №35 – С. 42–46.
10. Намінат О. С. Сучасні технології лазерного сканування в гірничо-видобувному регіоні / [О. С. Намінат, В. Д. Сидоренко, М. В. Шолох та ін.]. // ДВНЗ «Криворізький національний університет», матеріали конференції сталий розвиток промисловості та суспільства, том 1. – 2013. – С. 44–45.
11. Намінат О.С. Геодезическое обеспечение мониторинга деформационных процессов линейного сооружения в зоне влияния горных работ / О. С.Намінат, В. Д. Сидоренко, О. Є. Куліковська, В. В. Стеценко. // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Гірничо-геологічна. – 2013. – №1. – С. 191–198.



12. Намінат О. С. Особливості камеральної обробки наземного лазерного / [О. С. Намінат, В. Д. Сидоренко, М. В. Шолох та ін.]. // ДВНЗ «Криворізький національний університет», матеріали конференції сталий розвиток промисловості та суспільства, том 1. – 2013. – С. 47–48.

13. Намінат О. С. Методика зйомки лінійних споруд методом наземного лазерного сканування для подальшого моніторингу / О. С. Намінат, В. Д. Сидоренко. // *Металлургическая и горнорудная промышленность*, г. Днепропетровск. – 2014. – №6. – С. 83–88.

14. Намінат О. С. Сучасні методи визначення просторового положення об'єктів гірничого відводу / [О. С. Намінат, В. Д. Сидоренко, М. В. Шолох та ін.]. // *Гірничий вісник ДВНЗ "Криворізький національний університет"*. – 2014. – №97. – С. 34–39.

15. Намінат О. С. Джерела виникнення помилок при отриманні просторових координат точок за допомогою наземного лазерного сканування / О. С. Намінат, В. Д. Сидоренко. // «ГЕОПРОСТІР 2015»: Перша міжнародна науково-технічна конференція: тези доповідей, м.Київ.. – 2015. – С. 26–28.

16. Намінат О. С. Наземне лазерне сканування, як основа складання цифрових топографічних планів / О. С. Намінат, В. В. Бешевець. // ДВНЗ «Криворізький національний університет», матеріали конференції сталий розвиток промисловості та суспільства. – 2015. – С. 37.

17. Намінат О. С. Спосіб визначення лінійних елементів зйомки місцевості безпіотною моделлю / О. С. Намінат, О. Є. Куліковська, Ю. Ю. Атаманенко. // *Гірничий вісник. м. Кривий Ріг*. – 2016. – №101. – С. 41–45.

18. Намінат О. С. Дослідження точносних характеристик наземних лазерних сканерів / О. С. Намінат. // IV міжнародна науково-практична конференція «геоінформаційні технології у територіальному управлінні та експертних дослідженнях». – Збірник наукових матеріалів конференції, м. Одеса. – 2017. – №4. – С. 81–86.

19. Намінат О.С. Аналіз факторів, що впливають на точність результатів вимірювань наземного лазерного сканера / Намінат О.С. // East European Scientific Journal, Warsaw. – 2018. - №9 (37). – p. 4-12.

20. Naminat O. A field surveying on the geodetic control of engineering linear structures using a terrestrial laser scanner / Naminat O., Palamar A. // Geodesy and Cartography, Vilnius. – 2019. – Volume 45 Issue. – p.49–56.

## ANNOTATION

**Naminat A.S. Improvement of methods for surveying monitoring of linear objects in areas exposed to underground mining. - Manuscript.**

Dissertation for the degree of PhD, specialty 05.24.01 - geodesy, photogrammetry and cartography. - Lviv Polytechnic National University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Lviv, 2018.

In the dissertation work solved an actual scientific and technical problem - the development of a technique of mapping line features based on the optimization of the surveying process by taking into account the mutual scanner location and subjects, the use of the work developed by the sequence, reducing the error when scanning the subject. The proposed methodology covers all stages of the surveying process, including preliminary analysis, survey and post-processing of the results obtained with the ultimate goal of obtaining a three-dimensional, reliable and informative model of a linear structure. Using the developed models allows to reduce the time of terrestrial-based laser surveying.

The possibility of using terrestrial laser systems for solving the main tasks of mine surveying at linear objects is considered.

The proposed technique for constructing a digital model of a linear structure based on the results of a ground-based laser survey, taking into account all developed recommendations for optimizing the process itself.

Investigations of the influence of the angle of inclination, color and type of the surface, affecting the accuracy of the LLS measurement, are performed. A study was

also made of the effect of the spatial resolution of the NLS and the angle of inclination of the laser beam of the NLS on the accuracy and quality of the results obtained.

In this paper, a technique is proposed for determining the error of the sight of the laser beam for further calibration of the LLS, which will improve the accuracy of the data obtained. Optimal shoulders for scanning are determined for further analysis of the spatial position of linear objects.

Dependencies are found that affect the scanning density and the magnitude of the error. Thus, the dependence of the influence of the scanner height and distance on the density, the angular step of the scan and the distance on the density, the heating temperature on the accuracy, changes in the linear step of the scan and the distance on the density, and the dependence of the number of points on the distance. Standard deviations of the obtained results are calculated.

The implementation of the results will allow us to obtain data not only from the reference line, but also from the whole object, which will significantly increase the areas of detection of the moving processes in the body of the linear object and will allow timely response to the consequences of natural or man-made impacts.

Key words: ground laser scanning, three-dimensional model, deformation, linear object, road, digital model.

## ЗМІСТ

<b>ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ .....</b>	<b>10</b>
<b>ВСТУП .....</b>	<b>11</b>
<b>1. СУЧАСНИЙ СТАН ТЕХНОЛОГІЙ З ВИЗНАЧЕННЯ ДЕФОРМАЦІЙ ПОВЕРХНІ І НАДР ЗЕМЛІ .....</b>	<b>17</b>
1.1 Причини і необхідність визначення деформацій поверхні і надр. ....	17
1.2. Аналіз існуючих методів визначення деформацій інженерних споруд. ....	26
1.3. Области застосування та переваги сучасного методу наземного лазерного сканування. ....	30
1.4. Сучасний стан технологій з визначення деформаційних процесів поверхні і надр Землі. ....	34
Висновки до розділу 1 .....	42
<b>2. ХАРАКТЕРИСТИКИ НАЗЕМНИХ ЛАЗЕРНИХ СКАНЕРІВ, ОСНОВНІ ПОХИБКИ ПРИ ВИКОНАННІ РОБІТ НАЗЕМНИМ ЛАЗЕРНИМ СКАНЕРОМ.....</b>	<b>43</b>
2.1 Наземні лазерні сканери, що використовуються сьогодні .....	43
2.2 Вимірювання сучасними наземними лазерними сканерами, основні етапи робіт. ....	53
2.3 Класифікація похибок у результатах наземного лазерного сканування .....	57
2.4 Програмне забезпечення для обробки даних, отриманих за допомогою наземних лазерних сканерів.....	67
Висновки до розділу 2 .....	78
<b>3. РОЗРОБКА МЕТОДИКИ ВИЗНАЧЕННЯ ДЕФОРМАЦІЙ ЛІНІЙНИХ СПОРУД ЗАСОБАМИ НАЗЕМНОГО ЛАЗЕРНОГО СКАНУВАННЯ .....</b>	<b>79</b>
3.1 Сучасні інструменти і технології отримання тривимірних координат для моніторингу лінійних споруд .....	79
3.2 . Методика зйомки лінійних споруд методом наземного лазерного сканування для подальшого моніторингу .....	81
3.3 Створення цифрових планів лінійних споруд на основі наземного лазерного сканування з метою подальшого моніторингу. ....	89
3.4. Методика створення просторових тривимірних моделей лінійних інженерних споруд .....	94

3.5 Аналіз факторів, що впливають на точність результатів вимірювань наземного лазерного сканера.....	96
Висновки до розділу 3.....	112
<b>4. ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ ЛАЗЕРНОГО СКАНЕРА ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ДЕФОРМАЦІЙ ЛІНІЙНИХ ІНЖЕНЕРНИХ СПОРУД ТА ЇХ ПОДАЛЬШОГО МОНІТОРИНГУ .....</b>	<b>114</b>
4.1 Використання наземного лазерного сканера для моніторингу лінійної споруди. ....	114
4.2 Геологічна будова району робіт - дорога «Техбаза – кладовище «Західне»	119
4.3 Ведення польових робіт з геодезичного контролю інженерних лінійних споруд із застосуванням наземного лазерного сканера. ....	124
4.4. Методика ведення робіт з обробки даних наземного лазерного сканування для вирішення завдання геодезичного контролю лінійних об'єктів.....	135
4.5 Аналіз результатів спостережень за деформацією лінійних споруд НЛС та класичними методами. ....	141
Висновки до розділу 4.....	164
<b>ВИСНОВОК.....</b>	<b>166</b>
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....</b>	<b>168</b>

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

- ГМЗ – геодезичні мережі згущення
- ДГМ – державна геодезична мережа
- ЗАПР – засоби автоматичного проєктування
- ЛСС – лазерні скануючі системи
- НЛС – наземний лазерний сканер
- ПЗ – програмне забезпечення
- ПВО – планово-висотна основа
- СКП – середньоквадратична помилка
- ТЛВ – точки лазерного відображення
- ЦММ – цифрова модель місцевості
- ЦМО – цифрова модель об'єкта
- ЦП – цифрові плани
- ЦТМ – цифрова тривимірна модель
- RGB – red, green, blue (адитивна кольорова модель)
- TIN – Triangular Irregular Networks

## ВСТУП

### Актуальність дослідження

В Україні існує декілька потужних гірничодобувних регіонів з приблизно однаковими проблемами в геодезичному забезпеченні. У Криворізькому залізорудному басейні понад 130 років ведуться розробки як підземним, так і відкритим способами. Розробка підземним способом ведеться на глибині більше ніж 1500 метрів. Внаслідок цього значна територія міста з сотнями кілометрів автомобільних доріг, по яких за добу проїжджають тисячі одиниць автомобільного транспорту, опинилася в зоні підземних пустот, масового обвалення, хвостосховищ і відвалів. Це у свою чергу, призводить до постійної зміни напружено-деформованого стану денної поверхні. Вищезазначене є небезпечним і потребує постійного моніторингу з метою прогнозування та забезпечення цілісності стану поверхні.

Враховуючи те, що гірничі роботи ведуться все ближче до цивільних споруд, інженерних об'єктів міського значення, виникають небезпечні ділянки у межах міста, які потребують постійного контролю для прогнозування їх впливу на фізичну поверхню Землі. Тому сучасна організація моніторингу повинна бути ефективно спланована, яка змогла б забезпечити достатню точність і оперативність отримання інформації. Необхідна організація "банків" даних зі збору отримуваних і розрахованих результатів для їх порівняння з попередніми.

Сьогодні наукові розробки в області створення засобів вимірювань на основі лазерно-скануючих систем забезпечують більш якісне вирішення завдань тривимірного моделювання об'єктів.

Тому розробка наукового і практичного, обґрунтованого методичного забезпечення моніторингу лінійних об'єктів в зонах впливу підземних гірничих робіт на основі сучасних досягнень в області лазерного сканування є актуальним завданням.

Математичним і методичним аспектам моніторингу інженерних споруд геодезичними методиками присвячена велика кількість наукових робіт. Значний внесок у розробку геодезичних методів, засобів і технологій геодезичного

забезпечення інженерних споруд внесли вітчизняні вчені, а саме: Асташенков Г.Г., Брайт П.І., Бурак К.О., Войтенко С.П., Гавриленко Ю.М., Ганьшин В.Н., Денисов А.І., Костецька Я.М., Куліковська О.Є., Левчук Г.П., Міхелев В.Д, Могильний С.Г., Перович Л.М., Піскунов М.Є., Сидоренко В.Д., Третяк К.Р., Черняга П.Г., Чибіряков В. К., Шульц Р.В., та інші.

Розвитку технології лазерного сканування сприяли праці багатьох зарубіжних вчених, як-от: Heipke, Schmidt, Paffenholz, Przybilla, Ryan A. Kromer, Matthew J. Lato, D. Jean Hutchinson, Hao Yang, Xiangyang Xu, Медведєв Е.М., Мельников С.Р., Середович В.А, S. Jaillet, E. Ployon, N. Paparoditis та ін.

Пошук ефективного та якісного вирішення геодезичних завдань на основі автоматизованих і високопродуктивних лазерно-скануючих систем став основним поштовхом презентованих досліджень.

#### **Мета та завдання досліджень**

Метою дисертаційної роботи є розробка методики моніторингу лінійних споруд засобами лазерно-скануючих технологій та просторового моделювання інженерних лінійних споруд на основі даних лазерного наземного сканування.

Основні завдання досліджень:

- оцінка та аналіз існуючого досвіду лазерно-скануючого знімання та ведення моніторингу;
- практичне обґрунтування критеріїв, що визначають витрати, якість і повноту лазерно-скануючого знімання, моделювання та моніторингу лінійних інженерних споруд;
- розробка рекомендацій з просторового моделювання лінійних інженерних споруд для подальшого їх використання та ведення моніторингу об'єкта;
- виявлення причин похибок отримуваних просторово-цифрових моделей лінійних інженерних споруд;
- дослідження основних технічних параметрів сучасних наземних лазерних сканерів;
- дослідження з удосконалення технологій геодезичних вимірювань для моніторингу інженерних лінійних споруд;



- апробація запропонованої методики.

### **Методи дослідження**

Для вирішення поставлених завдань у роботі використовувалась сукупність методів. Метод аналізу, що включав аналіз усіх існуючих методик і розробок за питаннями, що досліджувались, порівняння результатів експериментів. Метод формалізації, який демонструє зведення результатів до графічної форми порівняння різних методів до кількісних характеристик. Метод експерименту сприяв виявленню кращих характеристик досліджуваної методики. Комп'ютерні технології використовувались для моделювання результатів, їх порівняння та обробки даних. Метод порівняння - для виявлення оптимальних показників при дослідженні різноманітних способів вимірювань. Метод абстрагування застосовувався при виключенні недостовірних даних з результатів вимірів.

Теоретичні методи (найменших квадратів, теорія помилок вимірів) використовувалися для обґрунтування оцінки похибок отримуваних просторово-цифрових моделей лінійних споруд. Експериментальні методи (аналіз даних експериментальні зйомки, модельні дослідження) дозволили розробити рекомендації щодо просторового моделювання лінійних споруд.

Методика досліджень включає в себе використання теорії ймовірностей, обчислювальної математики та статистичного опрацювання результатів вимірювань, а також теорії помилок вимірювань і прийоми математичного аналізу. Програмні продукти для отримання та опрацювання даних наземного лазерного сканування RISCAN PRO 1.2, CYCLONE 7.0, програмний комплекс MICROSOFT EXCEL 2013, програмне забезпечення Golden Software Surfer 12.0, програмний комплекс AUTOCAD 2012, GeoniCS 10, Credo DAT та Topcon Tools.

### **Наукова новизна роботи**

До найбільш вагомих результатів, які винесені на захист, належать такі: встановлено аналітичні залежності похибок визначення положення об'єктів від режимів щільності сканування, відстані до об'єкта сканування, для оцінки параметрів точності створюваних просторових моделей лінійних інженерних споруд; зроблено аналітичне порівняння результатів нівелювання та

полігонометрії з результатами наземного лазерного сканування; удосконалено методику моніторингу інженерних лінійних споруд із застосуванням лазерно-скануючих систем; виведено залежності отримуваних даних від кількості станцій, кроку сканування, відстані та кута сканування. Розроблено технологічну схему визначення просідань і моніторингу лінійних споруд.

Наукові положення, що виносяться на захист:

- підтверджено ефективність використання наземного лазерного сканування, для визначення швидкоминучих деформаційних процесів на лінійному об'єкті в зоні впливу підземних гірничих робіт;

- складено технологічний ланцюг виконання вимірювань для визначення форми і деформацій лінійних споруд із застосуванням наземного лазерного сканера;

- опрацьовано методику аналізу й моделювання результатів вимірювань для визначення деформацій лінійних інженерних споруд;

- визначено параметри ведення лазерно-скануючої зйомки, що дозволяють оптимізувати знімальний процес;

- обґрунтовано ефективність використання методики моніторингу деформаційних процесів на прикладі лінійних інженерних споруд. Об'єкт і предмет дослідження

Об'єктом дослідження є деформаційні процеси інженерних лінійних споруд в зоні впливу підземних робіт. Предмет дослідження - методи і технології визначення деформацій інженерних споруд із застосуванням сучасних геодезичних способів. Геодезичний контроль просторових переміщень лінійних інженерних споруд.

#### **Особистий внесок здобувача:**

Основні наукові положення, які становлять зміст дисертації були сформульовані та вирішені автором самостійно. Серед наукових праць, які опубліковані у співавторстві в роботі використані лише ті ідеї, які є результатом його особистої праці. Особистий внесок автора полягає у аналізі сучасних способів зйомок лінійних інженерних споруд для ведення моніторингу та

нормативних документів, розроблення методики знімання наземними скануючими системами, удосконалення методики обробки даних для отримання просторових моделей, встановлення аналітичних залежностей похибок вимірювань наземного сканування.

### **Апробація матеріалів дисертації**

Основні результати наукових досліджень були представлені на наукових семінарах кафедри геодезії ДВНЗ «Криворізький національний університет» (2012-2017 рр.); основні теоретичні й експериментальні результати дисертаційної роботи доповідалися на Міжнародній науково-технічній конференції «Сталий розвиток промисловості та суспільства 2013, 2014», науково-технічній конференції «Форум гірників - 2012» (м. Дніпропетровськ), міжнародній науково-технічній конференції «тиждень гірника 2013» (м. Москва) та інших.

Результати роботи використовувалися для виконання науково-дослідної тематики науково-дослідної частини ДВНЗ «Криворізький національний університет». Дисертаційна робота виконана в межах науково-дослідних робіт: № 9-882-11 Дослідження стану автодороги «Техбаза-кладовище «Західне» і гірського масиву в зоні впливу гірничих робіт методами наземного лазерного сканування та спектрально-сейсмічного профілювання. Авторський нагляд. Термін дії: 06.05.2011-31.07.2014 рр. Замовник: ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг»; № 9-880-11 Дослідження масиву гірських порід у зоні впливу гірничих робіт шахти «Родіна» методами лазерного сканування і спектрально-сейсмографічного профілювання з метою контролю безпечної експлуатації автодороги «Техбаза-кладовище «Західне». Термін дії: 04.05.2011-30.05.2014. Замовник: ПАТ «Криворізький залізорудний комбінат». (державний реєстраційний номер 01110005580).

### **Структура та обсяг роботи:**

Дисертаційна робота складається з вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел (150 найменувань), додатків. Повний обсяг дисертаційної роботи 198 сторінок, 76 рисунків, 19 таблиць.

## **Публікації**

За темою дисертації опубліковано 18 наукових статей, що затверджені ВАК України, у тому числі одна з яких входить до видання, що індексується міжнародною наукометричною базою даних Scopus.

## **Практичне значення отриманих результатів**

Результати удосконаленої методики та рекомендацій з ведення спостережень, що отримані в дисертаційній роботі використовувались у приватних та державних установах, що підтверджуються актами впровадження. Результати розробок рекомендовані до застосування на практиці службами зсуву підприємств для визначення деформацій інженерних споруд, ведення моніторингу об'єктів. Практичні результати рекомендується до впровадження в навчальний процес.

Автором запропонована методика порівняння TIN-моделей дорожнього одягу автодороги, що дозволило отримувати результати усієї поверхні покриття, а не тільки частин, де закріплені репери профільної лінії.

Встановлено залежності виникнення похибок при використанні наземних скануючих систем, що дозволяє підвищити точність кінцевого результату.

Виконано порівняння даних, що були отримані наземним лазерним сканером та класичними методами - полігонометрією та нівелюванням.

## **1. СУЧАСНИЙ СТАН ТЕХНОЛОГІЙ З ВИЗНАЧЕННЯ ДЕФОРМАЦІЙ ПОВЕРХНІ І НАДР ЗЕМЛІ**

Швидке виявлення деформацій є актуальним завданням для регіонів з територіями, на яких спостерігаються техногенні зміни земної поверхні та в її надрах. Таким регіоном є місто Кривий Ріг. У ньому постійно ведуться гірничі відкриті та підземні роботи, що впливають на цілісність інфраструктури міста.

У першому розділі роботи автором виконаний аналіз причин та існуючих методів визначення деформацій поверхні і надр землі. Більш детальну увагу приділено лінійним інженерним об'єктам, наприклад автодороги, на одній з яких і велись експериментальні дослідження. Розглянуто прилади, які використовуються для виявлення кількісних характеристик деформаційних процесів. Опрацьовано сфери застосування наземного лазерного сканеру для задач моніторингу інженерних об'єктів. Цей аналіз визначає подальший напрямок досліджень автора.

### **1.1 Причини і необхідність визначення деформацій поверхні і надр**

Стан промислових міст на сучасному етапі почасти залежить від інтенсивності техногенного впливу людини і зведення нових структур для поліпшення стану економіки. Але ці зміни нерідко призводять до негативних наслідків. Для сучасного міста дуже важливі транспортні сполучення як внутрішні, так і зовнішні, які можна назвати «артеріями міста». Такими є й лінійні споруди, а саме автодороги. В Україні протягом року виникає більше однієї тисячі надзвичайних ситуацій, на ліквідацію наслідків яких витрачається значна частка валового доходу [1]. З появою динаміки росту кількості надзвичайних ситуацій у країні економіка найближчим часом не буде в змозі впоратися з ліквідацією їх наслідків. Дві третини надзвичайних ситуацій мають техногенний характер, тобто виникають у результаті антропогенної діяльності[2]. У зв'язку з цим розкриття природи техногенних катастроф, створення теорії формування та розробка заходів із зниження їх наслідків є актуальною проблемою сучасної науки.

У роботі розглядається більш вузька проблема - дослідження деформацій, що виникають у сфері надрокористування внаслідок прояву сучасних геодинамічних процесів. З другої половини ХХ століття в науках про Землю відбувається радикальний перегляд поглядів на роль і місце геодинамічного фактора як у фундаментальних проблемах, так і у вирішенні прикладних задач, пов'язаних з надрокористуванням. Початок процесу трансформації уявлень про ступінь сучасного руху земної кори, мабуть, слід віднести до моменту появи на початку ХХ століття гіпотези А. Вегенера про дрейф континентів, яка вже у другій половині століття здобула статус теорії тектоніки літосферних плит [2].

Поява супутникових технологій геодезії дозволила експериментально визначити чисельні значення цих переміщень. Ці аномальні рухи високоамплітудні, короткоперіодичні, просторово локалізовані і володіють пульсаційною та знаковмінною спрямованістю [3].

І, нарешті, впровадження диференціальних GPS-технологій у періодичному (дискретному) і безперервному варіантах моніторингу за зміщеннями та деформаціями дозволило виявити новий клас геодинамічних рухів у розломних зонах з різними періодами спостережень 30-60сек, 40-60хв і підтвердити рух з періодами до року і більше [4].

Розглядаючи всю гаму спостережуваних циклічних знаковмінних і трендових рухів, можна зробити висновок, що основною властивістю геологічного середовища, особливо в розломних зонах, є знаходження її в безперервному русі.

У зв'язку з цим, роль і місце сучасної геодинаміки важко переоцінити у фундаментальній сфері наук про Землю. Але ще більше її роль важлива при вирішенні практичних завдань у гірничодобувній галузі при видобутку, переробці та транспортуванні корисних копалин, у численних сферах освоєння підземного простору, не пов'язаних з гірничою справою, а також у всіх областях будівництва. Геодинаміка дуже тісно пов'язана з геодезією, адже велику частину спостережень за геодинамічними процесами виконують саме геодезисти.

Геодинаміці як самостійній науковій дисципліні кращі вчені спрямовують широке і різноманітне коло питань [5]. Загальна, або глобальна, геодинаміка

вивчає глибинні процеси, що визначають рушійний механізм перетворень у товщі порід. Локальна, або регіональна, геодинаміка вивчає розвиток невеликих ділянок денної поверхні. Д.Л. Теркот і Дж.Шуберт у передмові до видання "Геодинаміка" визначають її як науку, що вивчає рух і деформації, які відбуваються в земній корі, мантії і ядрі, і їх причини [6].

Одним з не менш важливих об'єктів, якому необхідні спостереження за деформаційними процесами, є автодорога. Утримування автодоріг у належному стані скорочує статистику дорожньо-транспортних пригод та може зберегти не один десяток життів. Автодорога - складна інженерна споруда, яка піддається різним впливам (динамічні навантаження від руху транспорту, тиску від ваги споруди, погодні умови, а також будь-які інші фактори), що негативно впливають на її міцність, стійкість і довговічність [7].

У дорожньому одязі, що довгостроково експлуатується, яке багато років вважалося надійним, поступово накопичуються зміни в стані ґрунтів, які в кінцевому рахунку призводять до деформацій, що веде за собою обмеження з використанням споруди, а іноді й до повного виходу її з подальшої експлуатації. Запобігти появі і розвитку деформацій допоможе знання інженерно-технічними працівниками можливих причин, що викликають їх [8].

Сьогодні питання визначення деформацій поверхні землі є дуже актуальним, особливо в гірничих регіонах. Достовірні дані про стан лінійної споруди, на які можна повністю покласти, дають можливість своєчасно зробити прогноз стану необхідної ділянки та уникнути катастрофи, згубних наслідків і руйнувань. Звідси виникає необхідність у якісних даних. Саме тому методики їх отримання вдосконалюються, допрацьовуються, а також створюються нові.

Ці методики в більшості випадків представляють систему спостережень за станом територій для своєчасного виявлення змін, їх оцінки, прогнозу, попередження та усунення наслідків негативних процесів. У даний час моніторинг - переважно технічна та інформаційно-аналітична робота, пов'язана із застосуванням технічних засобів контролю. Це - одночасно міра запобіжного, поточного і наступного контролю [9].

Так які ж причини виникнення деформацій? Відомо, що на земну поверхню впливають природні процеси глобального і локального масштабу. Такі дії проявляються ендогенними і екзогенними процесами. Геологічне середовище реагує на зовнішні впливи переміщенням гірських порід, деформаціями та хімічними перетвореннями [10].

Найважче в прогнозуванні деформацій - це не мати можливості проведення експериментів з природними явищами, такими як: просадка ґрунту, утворення тріщин і т.п. Неможливо точно вгадати час, місце тієї чи іншої природної події. Також під час самого процесу деформування земної поверхні відбувається перерозподіл напружень маси в масиві, через що постійно змінюється навантаження на різні місця [11].

Висока концентрація людей, будівель і споруд, інфраструктури міст, промислових об'єктів породжує величезне навантаження на геологічне середовище, викликаючи її зміни. У свою чергу геологічне середовище «реагує» на зовнішні впливи, що негативно позначається на стані будівель і споруд та іншої інфраструктури. При значній величині осідань у фундаменті і стінах будинків з'являються тріщини і обвалення [12].

Потужним чинником впливу на геологічне середовище міст і великих мегаполісів є будівництво підземних споруд. Зведення та експлуатація підземних об'єктів ведеться в умовах інтенсивного водовідливу від зведених споруд, що викликає зниження гідростатичних напорів і статичних рівнів горизонтів підземних вод.

Аналіз надзвичайних ситуацій у будівництві показав, що споруди під час своєї експлуатації постійно знаходяться в коливальному режимі під дією вібрації, оскільки на них впливають навантаження від сезонних зсувів масиву гірських порід, зміни гідрологічного режиму і від поруч розташованих об'єктів різного призначення [13]. Амплітуда коливань (зсувів) різних споруд може бути в межах від часток - мм до декількох метрів, а частота - від 0,1 Гц до десятків тижнів. Тому критерієм стійкості до зсувів різного роду споруд можна вважати положення центру коливань і допустиму амплітуду, частоту (довжину хвилі)



коливань деформаційних процесів, що проходять у них, тобто утворюється випадкове поле - параметри якого представляють різні множини [14].

Так як в роботі об'єктом дослідження є автодорога, необхідно розглянути причини виникнення деформацій автодоріг у цілому.

Автодорога, як інженерна споруда, дуже чутлива до несприятливих впливів навколишнього природного середовища та сталого впливу транспорту. Зростання динамічного впливу автотранспорту на автодорогу сприяє інтенсивному накопиченню залишкових деформацій у ньому і нерідко на дорогах, побудованих порівняно недавно. Під деформаціями доріг мають на увазі залишкові зміни її форми і розмірів у процесі експлуатації. Деформації можуть бути пружними і непружними (залишковими). Пружні деформації проявляються під час руху транспорту. Залишкові деформації дорожнього одягу можуть бути викликані додатковим ущільненням ґрунтів, пластичними деформаціями ґрунту під навантаженням, сезонним промерзанням ґрунтів та іншими процесами, що відбуваються в ґрунтах[15].

Накопичення залишкових деформацій може викликати пошкодження або руйнування, що ускладнюють експлуатацію, а в деяких випадках - неможливість подальшого використання. У всіх випадках перш ніж розробляти заходи з ліквідації деформацій, необхідно виявити чинники, що спричинили їх розвиток.

#### *Причини деформацій, її швидкості (наслідки).*

Однією з причин появи руйнувань автодорожнього одягу є швидкоминучі деформації земної кори. Їх наявність дозволяє проводити діагностування з метою гарантування безпечної експлуатації. Встановлено, що просторово-часова мінливість руйнувань одягу відображає, з одного боку, деформаційні процеси пластичного характеру, пов'язані з проходженням припливів у твердому тілі Землі і, з іншого боку, сейсмічні деформаційні процеси, що відображають моменти переходу від пластичних деформацій до розривних[16].

*Причини деформацій дорожнього покриття, що пов'язані з ґрунтами в земляному одязі.*

1. Глинисті ґрунти при одній і тій же вологості можуть мати різну щільність - у результаті цього змінюються міцність і несуча здатність ґрунтів.

2. Глинисті ґрунти, покладені в насип з певною щільністю, можуть мати різну вологість. Шари ґрунту з підвищеною вологістю мають більш низькі характеристики з міцності (питоме зчеплення і кут внутрішнього тертя), ніж ґрунти з меншою вологістю. Тому вони можуть стати причиною пластичних деформацій.

3. Розробка ґрунтів у кар'єрі, приводить до зміни їх структури. Ґрунти з порушеними (зруйнованими) природними структурними зв'язками після укладання їх у насипі не можуть у повному обсязі відновлювати ці зв'язки в процесі експлуатації.

4. Динамічні дії автомобілів, (вібрації, удари коліс у тріщини та ями) викликають зниження на 20-30% несучої здатності ґрунтів.

5. Сезонні промерзання і відтавання глинистих ґрунтів викликають зниження міцності ґрунтів на 20-30% у порівнянні з їх значеннями до промерзання. Промерзання глинистих ґрунтів супроводжується спученням, у результаті змінюється структура ґрунту і зменшується щільність [17].

Як відомо, масштабна розробка родовищ корисних копалин пов'язана із потужним техногенним впливом на верхню частину земної кори. Тривалі терміни експлуатації родовищ, великі обсяги переміщуваних гірських порід, концентрація видобутку на обмежених територіях - все це сприяє порушенню початкового напружено-деформованого стану земної кори на великих територіях. У результаті такого впливу поряд з природними геомеханічними процесами, такими як тектонічні зрушення по структурних блоках, виникають так звані геомеханічні процеси, викликані техногенною діяльністю людини. Такі процеси за силою їх прояву схожі з природними, а їх небезпека посилюється тим, що вони відбуваються в областях концентрації економічної діяльності людини [18]. Таким чином, джерелом формування наведених геомеханічних процесів є порушення початкової рівноваги в напруженому стані верхньої частини земної кори в результаті видобутку корисних копалин. Вторинне поле напруг формується за

рахунок утворення виїмок і пустот у гірському масиві і за рахунок порушення ізостазичної рівноваги внаслідок переміщення великих обсягів гірських порід, особливо при відкритих розробках[19].

Актуальність дослідження наведених геомеханічних процесів викликана тим, що в районі гірничопромислового міста Кривого Рогу існують такі потенційно небезпечні райони та проявляються внаслідок досягнутих масштабів виробництва.

#### *Основні причини деформацій лінійних споруд.*

Під спільним впливом багаторазово повторюваних навантажень від автомобілів та природних факторів у земляному одязі і в дорожньому покритті виникають напруження і деформації, які, поступово накопичуючись, можуть призвести до їх руйнування[20]. Під деформацією розуміють зміну розмірів або форми тіла без зменшення його маси і без втрати суцільності. Руйнування - це зміна розмірів і форми тіла із зміною (зменшенням) маси тіла або втратою суцільності.

Причиною виникнення деформацій можуть бути проєктні помилки і будівельні недоліки, недоліки в утриманні та ремонті, умови експлуатації доріг, природно-кліматичні чинники. Найчастіше причиною виникнення деформацій є поєднання декількох з перерахованих факторів, що діють одночасно. Основні фактори, що є причинами утворення та накопичення деформацій та появи руйнувань конструктивних елементів автомобільних доріг можна розділити на зовнішні, незалежні від дороги, внутрішні, безпосередньо залежні від дороги, та техногенні фактори [21].

До внутрішніх факторів належать фізико-механічні характеристики дорожньої конструкції і матеріалів її шарів, а також показники напружено-деформованого стану цих шарів і матеріалів під дією навантаження від коліс автомобілів і зміни водно-теплогового режиму [22].

До найбільш важливих внутрішніх факторів можна віднести такі:

- недоуцільнення або нерівномірне уцільнення в поперечному напрямку шарів нежорстких дорожніх полотен та земляного одягу;
- нерівномірний знос (стирання) покриття під дією коліс автомобілів;

– утворення пластичних деформацій в асфальтобетонних покриттях і шарах з бітумомінеральним сумішей. Особливо в періоди нагрівання цих покриттів до високої температури може статися бічне випирання матеріалу. У холодний період, навпаки, збільшується міцність і жорсткість асфальтобетону, відбувається утворення температурних тріщин;

– поява структурних руйнувань і накопичення залишкових деформацій у покритті та інших шарах дорожнього одягу від дії коліс важких автомобілів. Особливо в період найбільшого зволоження ґрунту, коли їх несуча здатність знижується до мінімальних значень [15];

Накопичення деформацій у конструктивних елементах дороги в процесі експлуатації відбувається нерівномірно. Можна умовно виділити кілька характерних періодів зміни транспортно-експлуатаційного стану дороги у часі (рис. 1.1).

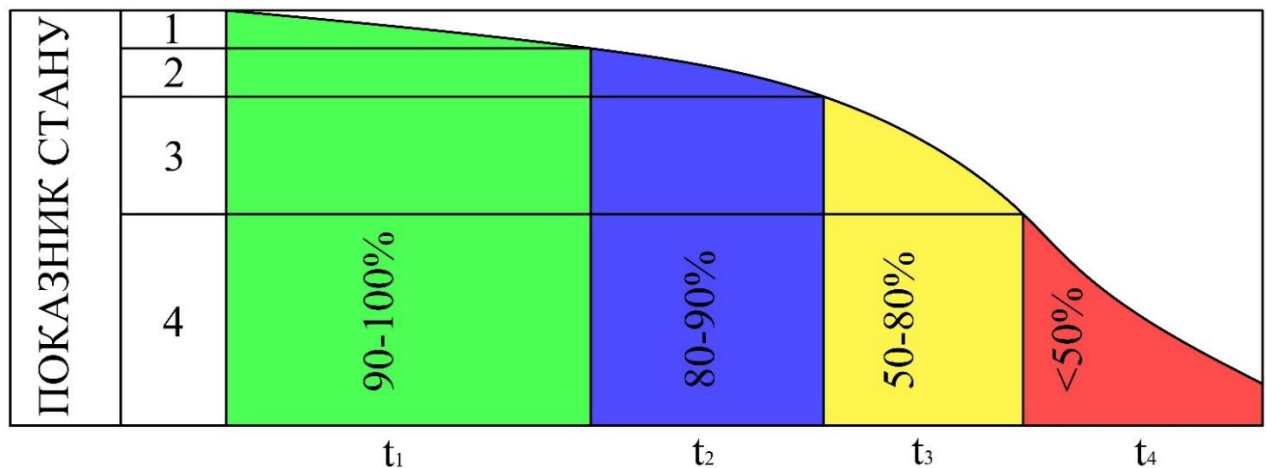


Рис. 1.1 Характерні періоди зміни стану дороги:

1 - дуже хороший, 2 - добрий, 3 - задовільний, 4 - погане, неприпустиме,  
 $t_1, t_2, t_3, t_4$  - тривалість різних періодів у %.

Перший період триває після завершення будівництва і введення автомобільної дороги в експлуатацію. У цей час відбувається повільне, малопомітне зношення покриття. Для їх усунення достатньо виконувати систематичні роботи з підтримання стану дороги. Затримка за термінами або неповне виконання цих робіт призводить до істотного скорочення тривалості першого періоду і настання другого.

У другий період помітно збільшується знос покриття, знижуються його зчіпні якості і рівність, з'являються тріщини та вибоїни. Ступінь і швидкість розвитку цих деформацій залежать насамперед від інтенсивності та вантажного транспортного потоку.

Для усунення накопичення деформацій та інших дефектів необхідно вчасно виконувати роботи з ремонту дороги з відтворенням її первинних транспортно-експлуатаційних характеристик [20].

Третій період характерний накопиченням деформацій не тільки в покритті, а й в інших шарах дорожнього покриття. Починає виявлятися ефект старіння матеріалів шарів дорожнього покриття. В результаті збільшується площа деформацій дорожнього покриття, з'являються її руйнування.

Для підтримання прийняттного стану одягу автодороги необхідно вчасно виконувати роботи з його відновлення, щоб уникнути передчасної реконструкції всієї дороги (рисунок 1.2)

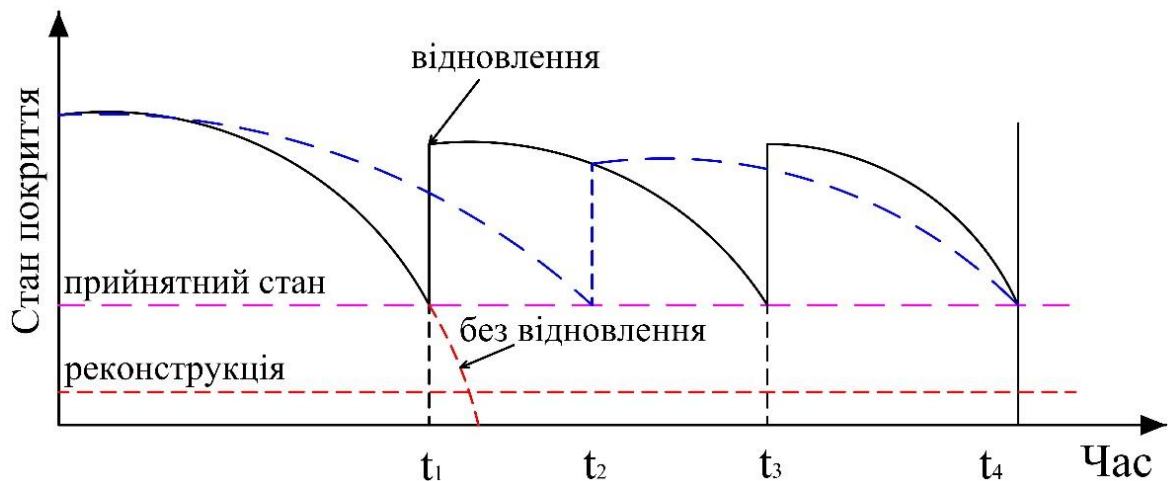


Рис. 1.2 Терміни поточних ремонтів дороги

Важливо зазначити, що тривалість того чи іншого стану дороги значною мірою залежить від рівня експлуатаційного утримання та своєчасності виконання робіт з попередження і ліквідації виникаючих деформацій і руйнувань. Однією з таких робіт є визначення деформації дорожнього одягу [20].

Вимірювання деформацій виконуються з метою:

- визначення абсолютних і відносних величин деформацій і порівняння їх з розрахунковими;

- виявлення причин виникнення та ступеня небезпеки деформацій для нормальної експлуатації споруд, прийняття своєчасних заходів у боротьбі з виникаючими деформаціями або усунення їх наслідків;
- отримання необхідних характеристик стійкості;
- уточнення розрахункових даних фізико-механічних властивостей ґрунтів;
- уточнення методів розрахунку і встановлення граничних допустимих величин деформацій [23].

## **1.2. Аналіз існуючих методів визначення деформацій інженерних споруд**

На даний час основним нормативним документом, що визначає питання визначення деформацій будівель і споруд, є ДСТУ Б В.2.1-30:2014 [24]. У цьому нормативному документі у якості основного методу вимірювання вертикальних переміщень рекомендовано геометричне нівелювання, що виконується оптичними нівелірами. Горизонтальні переміщення фундаментів будівель і споруд рекомендується вимірювати одним з таких методів або їх комбінуванням: створних спостережень, окремих напрямів, методами триангуляції і фотограмметрії [25].

Метод гідронівелювання забезпечує точність геометричного нівелювання і дозволяє створювати стаціонарні автоматизовані системи з дистанційним зніманням інформації. Застосовується тільки для вимірювань вертикальних деформацій. Система гідростатичного нівелювання дозволяє автоматично за допомогою електричних і оптико-електронних датчиків визначати зміну рівня рідини в ємностях. Система дозволяє вимірювати з середньою квадратичною помилкою порядку 0,1 мм. Гідронівелювання застосовують для вивірки по висоті опорних площин будівельних конструкцій і технологічного обладнання в умовах, коли виконання геометричного нівелювання ускладнено [26].

При використанні гідростатичного нівелювання застосовують різні системи, конструкція яких залежить від умов проведення робіт і необхідної точності.

Розрізняють гідромеханічне, гідродинамічне і гідростатичне нівелювання.

Гідромеханічне нівелювання засноване на принципі виміру перевищення як функції надлишкового тиску (або розрідження), створюваного в вимірювальній системі стовпом рідини і реєстрованого датчиком тиску. Цей спосіб дозволяє вимірювати перевищення до декількох метрів, але з порівняно невисокою точністю - 1-2 см. Застосовується він для попередньої установки будівельних конструкцій.

У гідродинамічному нівелюванні виміри виконуються в процесі безперервної зміни рівня рідини в сполучених сосудах, що встановлюються на визначених точках. Спосіб в основному застосовують при необхідності автоматизованого вимірювання осідань споруди [26].

На точність гідростатичного нівелювання істотний вплив роблять зовнішні умови (головним чином, через різницю температур в ємностях і водяному шлангу) [27].

З усіх способів гідронівелювання гідростатичний є найбільш поширеним і придатним для геодезичних вимірювань при виконанні монтажних робіт. Існують автоматизовані системи гідростатичного нівелювання, у яких зміна положення рівня рідини в ємностях визначається автоматично за допомогою електричних або оптико-електронних датчиків [28].

Метод геометричного нівелювання застосовується тільки для вимірювань вертикальних деформацій. У більшості випадків він використовується як основний. На даний час найбільша ступінь автоматизації геометричного нівелювання досягається при використанні цифрових нівелірів. Ці прилади є пасивними. У якості приймального пристрою в них використана ПЗС-матриця (прилад із зарядовим зв'язком), що встановлюється в площині зображень, створюваних зоровою трубою цифрового нівеліра. На відміну від традиційних оптичних нівелірів, при роботі з цифровим нівеліром відлік проводиться автоматично і вноситься в пам'ять приладу. [29].

Унікальні можливості цифрових нівелірів забезпечують можливість збільшити продуктивність на 50% в порівнянні з традиційними оптико-механічними приладами, а також досягти високого рівня точності вимірювань, що

дозволяє їх використовувати для виконання нівелірних робіт усіх класів і для спостережень за деформаціями. Особливо ефективно їх використання при вимірюванні деформацій споруд та дослідженні рухів земної кори, викликаних як природними причинами, так і техногенними факторами.

Швидкість нівелювання і діапазон вимірюваних перевищень можуть бути в кілька разів підвищені, якщо використовувати принцип вимірювань, заснований на скануванні лазерним пучком у вертикальній площині з кутовою швидкістю, закон зміни якої відомий. Так як частота сканування може складати сотні Гц і більше, то швидкість пересування відбивача вздовж траси практично не обмежена [29].

Тригонометричне нівелювання. Застосовується тільки для вимірювань вертикальних деформацій в умовах різких перепадів висот [30].

Визначення горизонтальних деформацій виконують наступними методами: спостереження по створах, окремих напрямків, триангуляції, допускається використання методів полігонометрії та трилатерації [31].

Виконання геодезичні робіт вищезгаданими методами виконуються за допомогою кутомірних приладів, як-от: теодоліти або тахеометри. Зараз найпоширеніший кутомірний прилад для цих методів – тахеометр.

Електронний тахеометр об'єднує теодоліт, світловіддалемір і мікроЕОМ, дозволяє виконувати кутові і лінійні вимірювання та здійснювати спільне опрацювання результатів цих вимірювань. Моделі тахеометрів, які мають безвідбивачевий режим, можуть вимірювати відстані практично до будь-якої поверхні [32].

Широке поширення в інженерно-геодезичних роботах електронних тахеометрів забезпечують швидкість, автоматизацію і достатню точність вимірювань, що розширює можливості тригонометричного нівелювання. А поява безвідбивачевих тахеометрів з похибкою  $m_z=1-3'$ ,  $m_s=1-4$  мм і менше сприяє їх застосуванню в контролі за осіданнями. Вимірювання осідань фундаментів і споруд проводиться з точністю 1, 2, 5 і 10 мм в залежності від ґрунтів, розрахункових величин, унікальності і часу експлуатації об'єкту [33].



Існують методи якими можна одночасно визначити як вертикальні, так і горизонтальні рухи, а саме: фотограмметричні, наземного сканування, навігаційні, автоматизованих систем.

Також все більшого розвитку зазнають системи змішаного типу. Одним з таких прикладів є автоматизована система на основі супутникових технологій. Так міст Цинь Ма в Гонконзі відомий як найдовший міст у світі (довжина 1377 м) несе автомобільну і залізну дороги. При різних видах навантаження він відчуває деформації від декількох сантиметрів до декількох метрів, що впливають на цілісність конструкції. Поруч з ним побудовані ще два підвісних мости: Тінь Кау (1177 м) і Кап Шуї Мун (820 м.) [34].

Розроблена Департаментом автодоріг Гонконгу інструментальна система спостереження в реальному часі за конструкціями за допомогою GPS складається з п'яти підсистем: самих GPS приймачів, систем збору локальних і глобальних даних, системи комп'ютерів і оптико-волоконної мережі, що дозволяють більш точно і надійно здійснювати моніторинг та оцінку структурних змін стану основних компонентів підвісних мостів із тросовими розтяжками і застосовувати отримані результати для планування, проведення технічних оглядів і технічного обслуговування. У мережу GPS приймачів входить дві базові станції та 27 приймачів, жорстко встановлених на різних точках конструкцій трьох мостів. Ця система дозволяє повноцінно в реальному часі та в повному обсязі вести моніторинг за станом такої складної лінійної споруди.

Складена таблиця 1.1 існуючих методів. Точність цих методів залежить від приладів, які будуть використовуватись, та зовнішніх факторів на об'єкті ведення робіт.

Так як в роботі планується розглянути метод наземного лазерного сканування для визначення деформацій, його потрібно розглянути більш детально. Що дасть змогу зробити висновки про доцільність виокристання його та покаже різницю у кількості даних по об'єкту, використовуючі які, можна зробити більш глибокий аналіз деформаційних процесів.

Таблиця 1.1

## Методи визначення деформацій

Метод визначення	
вертикальні	горизонтальні
методи ГНСС	
наземне лазерне сканування	
методи зондування	
геометричне нівелювання	тріангуляція
тригонометричне нівелювання	трилатерація
гідронівелювання	полігонометрія
барометричне нівелювання	створні методи
	метод окремих напрямків

### 1.3. Області застосування та переваги сучасного методу наземного лазерного сканування

Наземне лазерне сканування на сьогоднішній день - це оперативний і продуктивний спосіб отримання точної та найбільш повної просторової інформації про об'єкт. Суть технології полягає у визначенні точних просторових координат точок поверхні об'єкту. Вимірювання проводяться з дуже високою швидкістю - від декількох тисяч до мільйона точок у секунду, як наслідок за лічені хвилини прилад вимірює кілька мільйонів точок, які точно повторюють поверхню об'єкту сканування.

Результатом роботи НЛС є растрове зображення - скан, значення пікселів якого являють собою елементи вектору з наступними компонентами: координатами кожної точки; інтенсивністю відбитого сигналу; RGB - складової, що характеризує реальний колір точки.

Іншою формою представлення результатів наземного лазерного сканування є масив точок лазерних відображень (ТЛВ) від об'єктів, що знаходяться в полі зору сканера, з п'ятьма характеристиками - просторовими координатами (x, y, z), інтенсивністю і реальним кольором.

Основним призначенням наземного лазерного сканера (НЛС) є отримання тривимірних моделей досліджуваних об'єктів. Для цього можуть використовуватися й інші методи, проте наземне лазерне сканування на

сьогоднішній день є найбільш ефективним у випадках, коли необхідно забезпечити високу детальність моделей при оперативному виконанні знімальних робіт. Основними перевагами даної технології є:

- дистанційність. Це дає значну перевагу перед іншими методами, що припускають виконання вимірювань контактним способом, особливо при зйомці важкодоступних ділянок або протяжних об'єктів;

- висока швидкість виконання вимірювань. Швидкість виконання вимірювань сучасними НЛС становить до кількох сотень тисяч точок за секунду. Така швидкість дозволяє охоплювати зйомкою великі площі за короткий час, що значно підвищує продуктивність праці;

- інформативність отриманої моделі. Щільність точок, виміряних на поверхнях, дозволяє детально відобразити геометричні характеристики досліджуваного об'єкта. Результати вимірювань мають високу надійність;

- автоматизація процесу виконання вимірювань. Під час вимірювань не потрібне наведення на визначені точки НЛС виконує зйомку довільно, із заданим кроком. Це мінімізує вплив людського фактору на результати вимірів і значно прискорює польові роботи;

- безперервність отриманої моделі. На відміну від традиційних дискретних вимірювань, наземне лазерне сканування дозволяє отримувати точкові моделі високої щільності, тобто результатом вимірювань є практично безперервна модель об'єкта.

Наведені переваги методу наземного лазерного сканування стосовно геодезії дозволяють говорити про високу ефективність його застосування для вивчення геометричних параметрів об'єктів складної форми, об'єктів, що містять велику кількість окремих елементів, або протяжних об'єктів. Наземне лазерне сканування може застосовуватися для вирішення наступних завдань:

- тривимірні зйомки для подальшого проєктування та реконструкції різних об'єктів. Тривимірне представлення значно полегшує завдання візуального ознайомлення з об'єктами, їх реконструкції, коректного вписування нових елементів в існуючу структуру. Крім тривимірних моделей, на основі даних

наземного лазерного сканування створюються також традиційні матеріали у вигляді планів і креслень;

- моніторинг інженерних споруд і природних об'єктів. Використання наземного лазерного сканування успішно використовується для стеження за деформаціями резервуарів, тунелів, моніторингу зсувних процесів. Суміщення тривимірної моделі Новосибірського судноплавного шлюзу, виконаної за результатами наземної сканера зйомки, з даними датчиків, що відстежують відносні зсуви елементів споруди, дозволило автоматизувати процеси діагностики та прийняття інженерних рішень. Дана система дає змогу визначати не тільки величини і напрямки зсувів елементів, але і в якій точці зафіксовані зміщення[30];

- створення цифрових топографічних планів великих масштабів на території з високою щільністю забудови та промислових об'єктів. На даний час для топографічних зйомок використовується сучасне геодезичне обладнання: електронні тахеометри і GPS-приймачі. Основна відмінність технології наземного лазерного сканування від традиційних методів топографічних зйомок полягає в тому, що координуються не окремі пікети, а весь об'єкт в цілому, що підвищує якість і надійність топографічних планів. Автоматичний режим вимірювань також значною мірою звільняє результати зйомки від впливу людського фактору і скорочує час польових робіт;

- документування геометричних характеристик унікальних архітектурних об'єктів, пам'ятників старовини та археологічних об'єктів. Сферою, у якій наземне лазерне сканування спочатку застосовувалося найбільш активно, є зйомка архітектурних об'єктів складної форми, як-от: ліпні елементи фасадів будівель, великі скульптури, пам'ятники старовини. Отримувані точкові моделі дозволяють вести точний облік і документування геометричних параметрів таких об'єктів;

- геометричний контроль будівництва будівель і споруд, проєктування та монтажу фасадних конструкцій. Постійною складовою робіт зі зведення будинків є геодезичний контроль монтажу конструкцій. Наземне лазерне сканування дозволяє здійснювати контроль відповідності положення елементів конструкції проектним показникам. Особливо ефективно використання даного методу при

зйомці складних металоконструкцій. Останнім часом у будівництві все більшого поширення набувають навісні вентилявані фасади (НВФ) і світлопрозорі конструкції, що дозволяють поліпшити зовнішній вигляд будівель. Результати зйомки фасадів з використанням НЛС дозволяють на стадії проєктування точно розрахувати обсяг і специфікації застосовуваних матеріалів. Така проблема на сьогоднішній день стоїть досить гостро, так як точність і детальність проєкту безпосередньо впливають на довговічність і безпеку конструкції [35];

- гарантування безпеки життєдіяльності. Наземне лазерне сканування дозволяє створювати тривимірні моделі різних об'єктів. Застосування таких моделей дозволяє дистанційно здійснювати оперативне управління людьми і технікою у випадку виникнення надзвичайних ситуацій, планувати положення камер стеження, проєктувати системи пожежогасіння та сигналізації. Тривимірні моделі в поєднанні зі спеціалізованими базами даних можуть служити інформаційною основою для підвищення оперативності та ефективності управлінських рішень на об'єктах підвищеної небезпеки та в умовах надзвичайних ситуацій;

- будівництво та експлуатація інженерних споруд: контроль на відповідність геометричних параметрів новозбудованих об'єктів та проєктної документації на ці об'єкти; коригування проєкту в процесі будівництва; виконавча зйомка в процесі будівництва і після його закінчення; оптимальне планування і контроль переміщення й установки споруд і устаткування; моніторинг зміни геометричних параметрів експлуатованих споруд і промислових установок з визначенням величин планових і висотних деформацій; оновлення генплану і відтворення втраченої будівельної документації діючого об'єкта;

- гірничо-промисловість: визначення об'ємів виробок і складів сипучих матеріалів; створення цифрових моделей відкритих кар'єрів і підземних виробок з метою їх моніторингу; маркшейдерський супровід бурових і вибухових робіт;

- нафтогазова промисловість: створення цифрових моделей промислових і складних технологічних об'єктів і обладнання з метою їх реконструкції та моніторингу;

- суднобудування: моделювання різного виду тренажерів; створення двовимірних і тривимірних геоінформаційних систем управління підприємством;
- археологія;
- кінематограф;
- фіксація ДТП;
- музейна справа [36].

#### **1.4. Сучасний стан технологій з визначення деформаційних процесів поверхні і надр Землі**

В Україні все більше набирає популярність і впроваджується, можливо, найбільш значуще технологічне нововведення в геодезії, архітектурі та ряді інших суміжних галузей - лазерні скануючі системи (ЛСС).

Результатом роботи лазерних скануючих систем є масив тривимірних координат точок лазерних відображень (ТЛВ) від поверхні вимірюваних об'єктів з високою щільністю, який надалі можливо відобразити в тривимірному просторі у вигляді точкової тривимірної моделі об'єкта. Такий вид відображення даних відрізняється високою візуалізацією в порівнянні з двовимірними кресленнями [37].

Використання ЛСС в геодезії дозволяє говорити про високий ступінь збору геопросторових даних [38].

Проте використання ЛСС на сьогодні в нашій країні ускладнюється через відсутність затвердженої технічної літератури, яка описує різноманітні методики виконання роботи, а також єдиної термінології та класифікації даного виду обладнання. Наприклад, на один і той же тип пристрою від різних виробників дано такі визначення:

RIEGL (Австрія) - системи лазерні дзеркальні;

Leica Geosystems (Швейцарія) - системи лазерні координатно-вимірювальні скануючі;

Zoller+Frohlich GmbH (Німеччина) - сканери лазерні;

Faro Technologies (США) - сканери вимірювальні лазерні.

Для розділення ЛСС на типи більш доцільним буде прийняти за основу загальні ознаки класифікації геодезичних приладів на основі [39]. Провівши аналіз різних існуючих моделей скануючих систем, можна запропонувати наступну класифікацію в залежності від класу, типу та характеру пристрою (рисунок 1.3).



Рис. 1.3 Схематична класифікація лазерних скануючих систем

Виходячи із запропонованої класифікації, найбільш доцільним типом лазерної скануючої системи для виконання геодезичного моніторингу є наземний лазерний сканер (НЛС) геодезичного типу, статичний, інженерний.

Приклади застосування НЛС, при визначенні деформацій, за кордоном мають більш поширене застосування. Нижче наведені приклади використання деяких з них.

Для виявлення мінімальних зміщень об'єкта сканером Leica Scan Station (наступне покоління цього сканера використовувалось автором при вимірюванні досліджуваного об'єкту) польські вчені виконали дослідження. Метою даного дослідження є порівняння відхилень цілей за допомогою наземного лазерного сканера. Відхилення визначались за трьома напрямками (осі координат X, Y, Z). Для цього використовувалась марка-базис з двома мішенями розташованих під кутом  $90^\circ$  одна до одної (рисунок 1.4). Експеримент проводився п'ятьма циклами (0,001m, 0,003m, 0,005m, 0,010m, 0,020m) і, нарешті, на декількох відстанях досягав максимального діапазону вимірювань сканера. Дані оброблялися за

допомогою ПЗ Cyclone та Matlab. Аналіз отриманих результатів створює нову можливість для використання лазерного сканера при точних вимірюваннях для визначення невеликих деформації об'єктів [40].

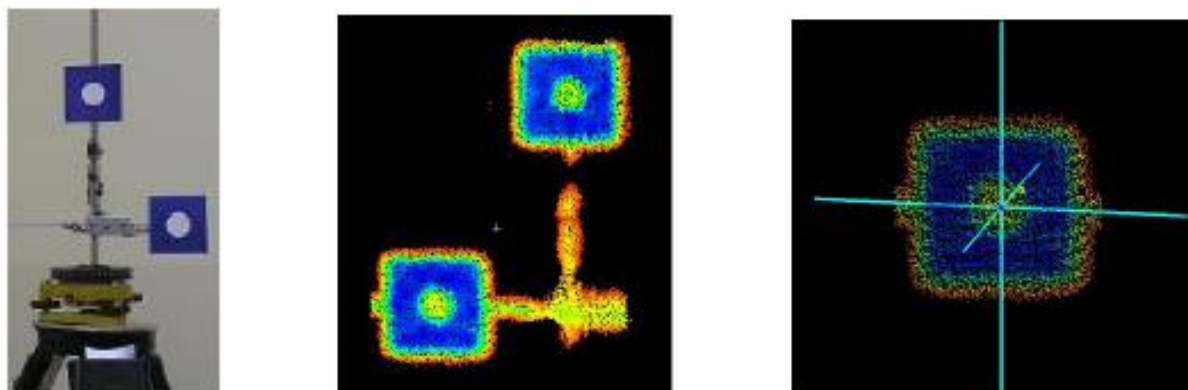


Рис. 1.4 Марка-базис

Аналіз даних показує, що на відстані 49,982 м максимальна різниця між вимірюваними та теоретичними значеннями складала 2 мм для всіх передбачуваних циклів по трьох осях. Згідно з [41] було помічено, що помилки при вимірюванні можуть бути результатом програмного забезпечення Cyclone, яке автоматично призначає центр знаку HDS. Це може підтвердити той факт, що, відповідно до результатів, на максимальній відстані під час експерименту (290,643 м) можна отримати ще кращі результати (максимальне відхилення 7 мм). Інший висновок полягає в тому, що максимальна відмінність між теоретичними та фактичними значеннями виникає спорадично [40].

Визначенням деформацій частини покрівлі займались у Талліннському технологічному університеті. Визначались переміщення підвісного даху (ширина 73 м, довжина 37 м, висота 32 м). Проведено три серії спостережень: спочатку без навантаження, потім під навантаженням мокрого снігу (приблизно 70 т), а через три місяці - з очікуванням повернення даху у первісне положення. У дослідженні підкреслюється перевага методу НЛС при веденні моніторингу недоступних об'єктів. Конструкція даху представлена на рисунку 1.5. Висота даху над поверхнею сягає 32 м [42].

Сканування виконувалось сканером Leica ScanStation C10 із закріплених точок ПВО. Обробка даних виконувалась в ПЗ 3D Cloud Cloud Processing Leica



Cyclone 8.0, аналіз результатів виконувався в ПЗ Autodesk AutoCAD Civil 3D 2013.

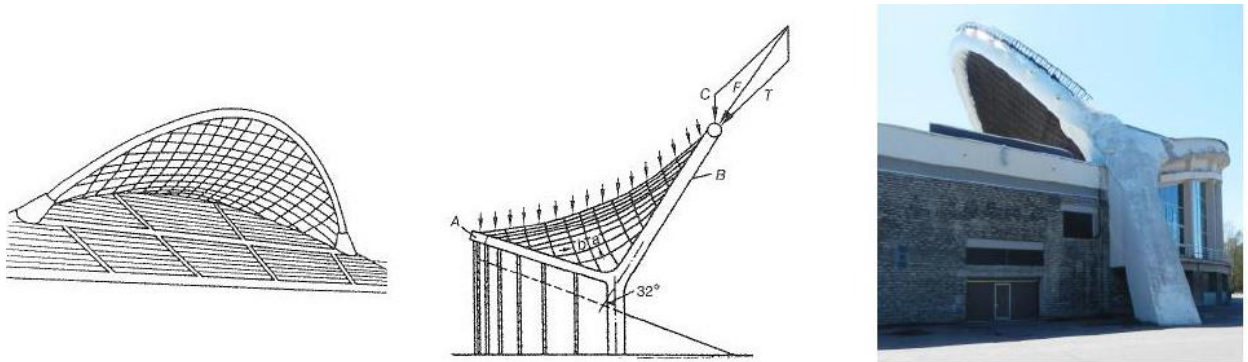


Рис. 1.5 Схема кабельної мережі даху та його фото

Порівняння результатів першого і другого циклу показують, що деформації під впливом снігу сягають до -11,3 см у нижній частині даху (зображені темними кольорами на рисунку 1.6 а), а на вищому боці біля передньої арки дах піднявся вгору до +3,1 см (рис. 1.6 а). Східна сторона, розташованого в центрі рисунка, залишається практично незмінною. Порівняння даних за другий і третій цикл показує, що форма даху не повністю повернула свою оригінальну геометрію. 72% фактично піднялося в центральній частині. Результати показують зростання до +12,1 см (рисунок 1.6 б зображений червоним кольором). Віддалені частини на краях не відновилися від снігового навантаження, що вказує на те, що 1% поверхні було ще нижчий, до -3,8 см, лише 27% даху повністю відновили початкову форму.

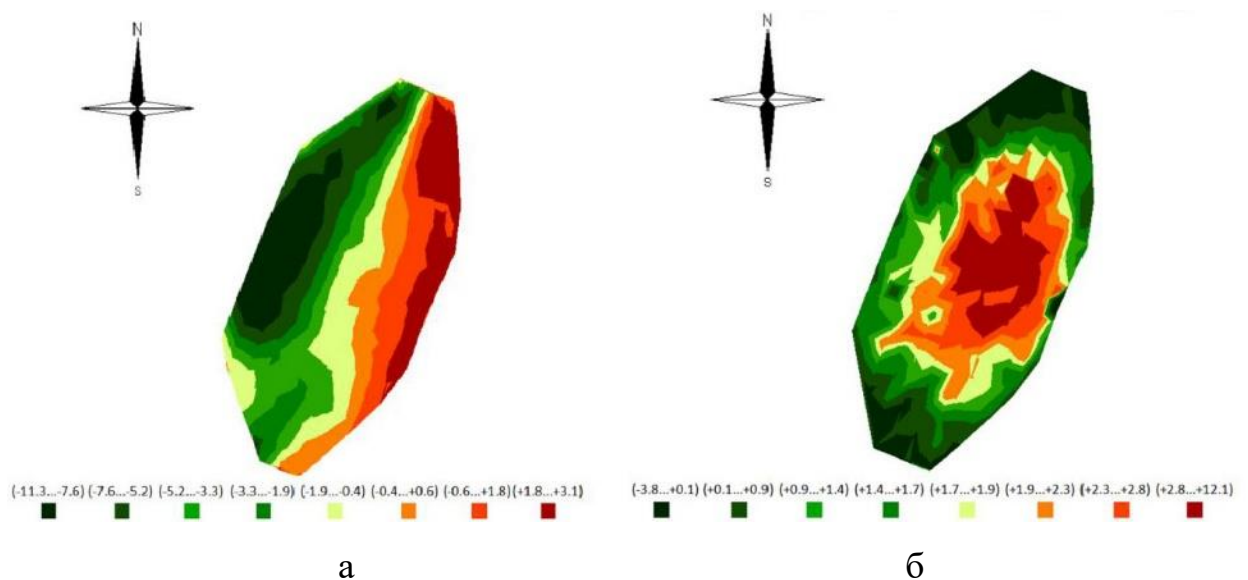


Рис. 1.6 Результати порівняння поверхонь (см)

Хоча НЛС в основному вважаються придатними для використання при температурах вище нуля і бажано в сухих умовах, але дослідженням доведено інше. На сьогоднішній день НЛС здатні отримувати дані в несприятливих умовах навколишнього середовища. Загалом технологія НЛС виявилася корисною для моніторингу складного та недоступного об'єкту [42].

Ще одним незручним об'єктом для безпосередніх спостережень класичними методами є мости. Тому за їх станом зручно спостерігати безконтактним методом НЛС. Так у Іспанії був відсканований міст Segura Roma для аналізу геометричних параметрів арок (рисунок 1.7) [43].

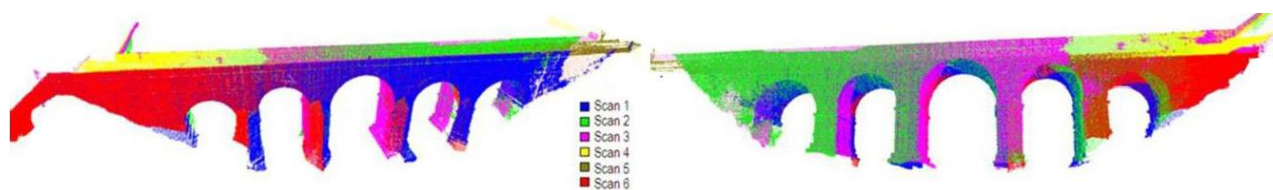


Рис. 1.7 Відсканований міст Segura Roma

За допомогою даних НЛС визначались вертикальні переміщення мосту, а також стан матеріалів, з яких його зведено (розтріскування, відшаровування, зміна геометричної форми). При веденні робіт здійснена вибірка методів, серед яких були такі: фотограмметричний, нівелювання, традиційне використання НЛС та сканування з точок з відомими координатами. Відповідно отримана точність результатів наступна: 4,9-9,1 мм; <3,5 мм; >3,5 см, 9-11 мм [43]. З результатів очевидно, що контролювання координат сканерних станцій значно покращує результати сканування.

Ще один дослід проведений у залізничній галузі. Окрім визначення деформаційних процесів арки НЛС під час реконструкції над залізничною колією, виконано більш детальний аналіз порівняння методів НЛС з традиційним методом та НЛС і фотограмметрії. Так на об'єкті велось постійне спостереження за допомогою роботизованого тахеометра Leica TS15 по марках. Аналіз методів проводився по 6 марках, що були встановлені на арках у різних місцях, координати яких визначались по черзі різними методами. Для сканування використовувався сканер FARO Focus<sup>3D</sup>, ПЗ для сканування - Faro Scene, для обробки хмарин точок Leica Cyclone. Для фотограмметричних робіт

використовувалась камера Nikon D3200, для обробки зображень ПЗ Visual SFM [44].

Після проведених робіт отримано наступні результати. Розходження координат марок між координуванням тахеометром і НЛС склали 1-20 мм. Але побудова автоматичних розрізів за допомогою методів CAD на основі знімання тахеометром неінформативна та не повна через малу кількість даних. Якість розрізів, в цілому, можна покращити за рахунок встановлення більшої кількості контрольних марок, що, в свою чергу, призведе до збільшення часу робіт та матеріальних затрат.

Для порівняння методу НЛС та фотограмметрії обрана одна і та ж сама область арки. Ця область була близькою до гладкої однорідної поверхні. Так як поверхня не ідеально гладкої форми, хмарина точок була виправлена та зрівняна методом найменших квадратів за допомогою ПЗ Shapes [45], і накладені одна на одну. Розбіжність між двома методами показана на рисунку 1.8. При цьому розбіжність накладання поверхонь склала не більше 3 мм. Зростаюча різниця даних ближче до вершини арки, може бути більш слабким зображенням у віддалених місцях [44].

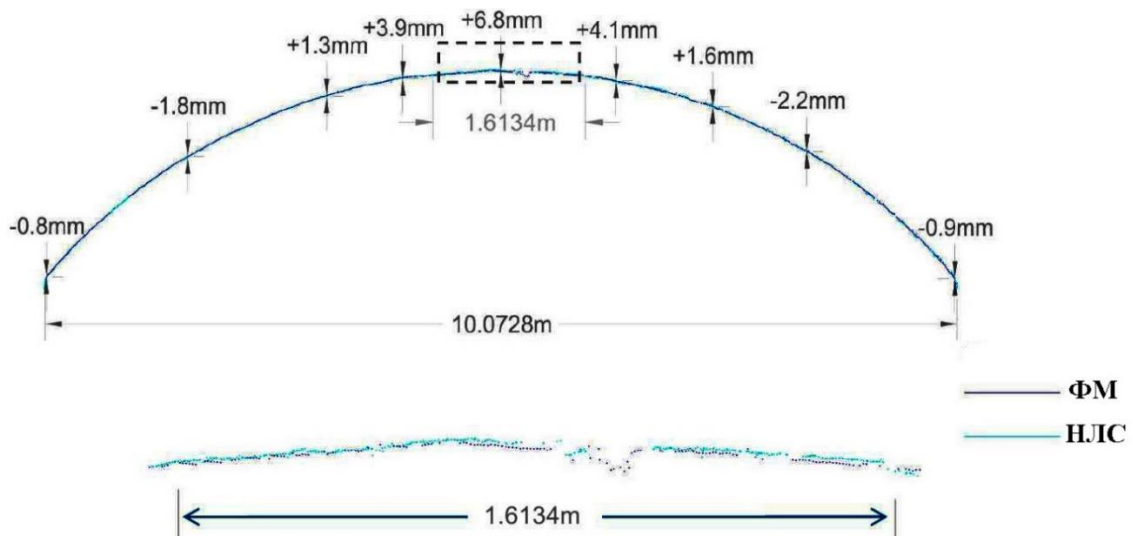
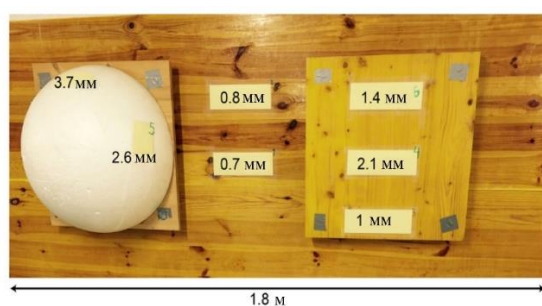


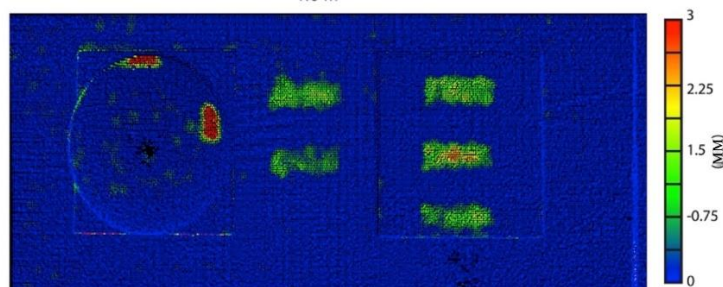
Рис. 1.8 Порівняння методу НЛС та фотограмметрії

Щодо точності наземних лазерних сканерів. Так у Канаді разом зі швейцарськими вченими розроблений новий алгоритм обробки даних, отриманих за допомогою НЛС. Проведено контрольований експеримент у лабораторії, щоб

перевірити здатність цього алгоритму для виявлення дуже малих переміщень з реальними даними НЛС. Був використаний сканер Optech IIRIS 3D LiDAR. Сканер встановили на 4,6 м від мішені, в приміщенні; мішень складалася з твердої деревини, прикріпленими дерев'яними тілами різної неправильної форми [46]. У цілому було виконано сканування твердої поверхні 50 разів при середній відстані між точками 6 мм. Після калібрування сканувань на поверхню були поміщені випробувальні зразки з картону (поверхня 200x70 мм) у семи різних місцях (рисунок 1.9а). Кожна окрема частина становила від 0,2 мм до 3,7 мм в товщину. Щоб перевірити здатність алгоритму для виявлення переміщень у похилих напрямках до сканера, у двох місцях на півсфері прикріплені два шматки таким чином, щоб кут падіння лазерного променя був приблизним  $45^\circ$ . Після розміщення шматочків мішень сканували ще 50 раз у тому ж місці сканера для створення хмарин точок з даними (рисунок 1.9б).



а) об'єкти сканування



б) відсканована поверхня

Рис. 1.9 Марки для сканування

Алгоритм був задіяний таким чином, що стандартне відхилення в такому випадку є систематичною помилкою в опорному скануванні і віднімається з відфільтрованих точок даних хмарини в наступному кроці. Точність калібрування стандартного відхилення дозволяє фільтрувати дані до 1/100-мм. Після фільтрації і калібрування даних обчислене стандартне відхилення склало 0,3 мм, що відповідає 0,6 мм  $L_0D$ , при моделювання 3D поверхні.

Цей метод перевірено в польових умовах. Був відсканований скальний схил 54 рази з п'ятихвилинними інтервалами із середньою відстанню 200 м. Кожне сканування складалося приблизно з 360000 точок із середнім кроком сканування між точками 25 мм. Після обробки результатів було встановлено, що стандартні

відхиленням склали 0,55 мм, що робить кожную точку рівня виявлення на похилій площині при 95% довірчому інтервалі (1,96 стандартних відхилень) у межах 1,1 мм [47].

Після огляду автором різних видань, в тому числі закордонних, було встановлено, що об'єктом застосування НЛС для визначення деформацій інженерних споруд у більшості випадків є мости або тунелі. У деяких випадках - це автоматизовані системи контролю залізничних колій. Застосування лазерів на автодорогах використовується як метод для планування подальшої реконструкції доріг, фіксації ДТП або виявлення якості покриття. Застосування НЛС у гірничих регіонах маловивчені, основний напрямок таких місць - це сканування кар'єрів для вирішення інженерних завдань, пов'язаних з плануванням розробки або визначенням об'ємів. Тому питання застосування НЛС на лінійних об'єктах у зонах зрушення, що мають швидкі деформаційні процеси залишається маловивченим. Воно залишається актуальним для м. Кривий Ріг, адже згідно з [48] величини осідання у деяких локаціях міста сягають 1,5-2 метри.

Виділені важливі фактори вибору системи моніторингу об'єкту є комплексний підхід до вирішення проблеми. На сьогоднішній день в Україні вирішення основних завдань геодезичного моніторингу пов'язане з використанням методик і методів, розроблених і впроваджених у державні стандарти приблизно в період з 1977 по 2000 р., відповідно принципи і засоби вимірювання даних методів ґрунтуються на застарілих технологіях. Звідси виникає проблема застосування отриманої інформації до сучасних засобів вимірювання. Крім того, застарілі методики не відповідають вимогам і завданням модерної концепції будівельної та промислової індустрії.

Застосування НЛС на даний час у тій чи іншій інженерній сфері вимагає значних досліджень, класифікації завдань і розробок, для оновлення та створення документації, методичних вказівок при виконанні польових робіт і камеральної обробки результатів. Тому вищенаведені висновки з даного розділу підкріплюють актуальність теми та досліджень дисертаційної роботи.

## Висновки до розділу 1

Підсумовуючи опрацювання літературних джерел в області визначення деформаційних процесів наземними лазерними сканерами, можна зробити наступні висновки:

1. Здійснено аналіз існуючих методів визначення деформаційних процесів денної поверхні. Обґрунтована необхідність виявлення зміни в часі просторового положення покриття автомобільної дороги для уникнення небажаних техногенних наслідків. Проаналізовано методи геодезичного контролю стану інженерних об'єктів, у тому числі методом наземного лазерного сканування.
2. Окремо розглянуті причини деформацій, що безпосередньо виникають у дорожньому одязі, та причини деформацій у гірничих регіонах, які мають вплив на інженерні споруди в їх зоні впливу. Презентовані основні фактори, що мають безпосередній вплив на стан лінійних інженерних об'єктів, на прикладі автодороги.
3. Накопичення деформацій у конструктивних елементах дороги в процесі експлуатації відбувається нерівномірно, тому запропоновано умовний поділ на кілька характерних періодів зміни транспортно-експлуатаційного стану дороги у часі.
4. Наведені області застосування наземних лазерних систем у тому числі для визначення деформаційних процесів; форми представлення результатів, що ними отримуються, та можливості їх подальшого використання з метою моніторингу. Виявлені основні переваги і недоліки наземного сканування перед класичними геодезичними методами та доцільність його використання.

## **2. ХАРАКТЕРИСТИКИ НАЗЕМНИХ ЛАЗЕРНИХ СКАНЕРІВ, ОСНОВНІ ПОХИБКИ ПРИ ВИКОНАННІ РОБІТ НАЗЕМНИМ ЛАЗЕРНИМ СКАНЕРОМ**

Перед тим, як залучити новий прилад до розв'язання певних задач, його необхідно протестувати, впевнитись у правильності його роботи та в достовірності результатів, які за допомогою нього можна отримати. Одним з таких приладів у геодезичному забезпеченні робіт є наземний лазерний сканер.

Тому для достовірності отримуваних даних необхідно провести аналіз ряду НЛС, точності їх вимірювань та інших технічних характеристик. Виділити характеристики, на які треба звернути увагу при виборі наземного сканера для розв'язання поставлених задач.

Не менш важливим є виявлення помилок, які впливають на результати дослідження; аналіз та заходи щодо нівелювання їхнього впливу на кінцеві результати. Звідси виникає необхідність оцінки вимірів на основі даних НЛС, що будуть отримані з робіт на реальних інженерних об'єктах.

### **2.1 Наземні лазерні сканери, що використовуються сьогодні**

У теперішній час існують численні різновиди наземних лазерних сканерів різної конструкції, відмінних за точністю, дальністю та швидкістю. Тому автором пропонується розглянути основний принцип дії НЛС та їх різновиди, які застосовуються у геодезії, будівництві, моніторингу та при вирішенні інших інженерних завдань.

#### *Принцип дії наземних лазерних сканерів*

Принцип дії наземних лазерних сканерів полягає в автоматизованому отриманні координат точок на основі відстаней, вимірюваних у безвідбивачевому режимі, і кутів спрямованості приймально-передавального пристрою далекоміра [49]. На відміну від лазерних сканерів повітряного базування, система координат НЛС визначається конструкцією сканера, тобто передбачається, що НЛС в процесі вимірювань нерухомий. Основними структурними елементами НЛС є:



- далекомірний блок. Функція даного блоку полягає у вимірюванні відстаней до перешкод, що знаходяться на шляху приймально-передавального пристрою далекоміра. Як джерело випромінювання використовується напівпровідниковий лазер. Відстань може визначатися за часом проходження (імпульсний метод), за зсувом фази (фазовий метод) відбитого сигналу та методом оптичної тріангуляції [50];

- оптико-механічний блок розгортки лазера (блок розгортки). Функціями блоку розгортки є зміщення приймально-передавального тракту далекоміра і фіксування кутів спрямованості випромінювання за допомогою оптико-механічної системи, що складається з дзеркальних призм і сервоприводів. Вертикальна розгортка здійснюється за допомогою плоскої або багатогранної дзеркальної призми, а горизонтальна розгортка в більшості випадків - шляхом розвороту блоку розгортки навколо осі  $Z'$ ;

- канал передачі даних на керуючий комп'ютер.

*Імпульсний метод вимірювання відстаней.* При вимірюванні відстаней імпульсним методом визначається час, за який випромінювання пройде відстань  $2D$ . Основним фактором, що визначає точність методу, є точність виміру часу (реєстрації імпульсів). Сучасні пристрої вимірювання часу реєструють імпульси з точністю до  $10^{-12}$  с, що дозволяє вимірювати відстані з точністю до 1 мм [51].

Превагами імпульсного методу вимірювання відстаней є висока дальність дії при відносно малій потужності імпульсу, однозначність отриманого результату (довжина лінії пропорційна часу пробігу). До недоліків методу відносяться менша, в порівнянні з фазовим методом, точність, обмеження частоти імпульсів у відстані до об'єкта [52].

*Фазовий метод вимірювання відстаней.* При вимірюванні відстаней фазовим методом відбувається реєстрація фазового зсуву  $\Delta\varphi$  сигналу, що пройшов подвійну відстань до перешкоди. При відомому значенні цілої кількості  $N$  довжин хвиль  $\alpha$  відстань

$$D = N\lambda + \frac{\Delta\varphi}{2\pi} \lambda \quad (2.1)$$

де  $\pi$  – кутова міра радіан.



Таким чином, основним завданням фазового методу є визначення цілого числа довжин хвиль  $N$  в пройденій відстані, що має назву «неоднозначності неоднозначності або багатозначності [49,53]».

Перевагами фазового методу вимірювання відстаней є висока точність вимірювань і більш висока продуктивність (за рахунок зміни закону модулювання несучого коливання в часі з'являється можливість роздільного детектування сигналів, що прийшли на приймач одночасно) [49]. Недоліки становить обмежена дальність дії і необхідність високої потужності випромінювача.

#### *Метод оптичної триангуляції.*

Триангуляційний метод заснований на розрахунку шуканої відстані через співвідношення трикутника з використанням відомих параметрів системи. Він дозволяє вимірювати як відносну зміну відстані від датчика до контрольованого об'єкта, так і абсолютну його величину. Причому контрольована відстань може мати масштаб від декількох мікрометрів до сотень і тисяч метрів [53].

На основі цих методів складена порівняльна характеристика у вигляді таблиці 2.1.

Таблиця 2.1

#### Аналіз НЛС за методом вимірювання відстаней

Метод вимірювання	Максимальна відстань, що вимірюється, м	Точність визначення відстаней, мм	Виробники лазерних сканерів даного типу
Імпульсний метод	50-300 (до 2000)	до 10 (25)	Leica, Callidus, Trimble, Optech, Riegl, Faro
Фазовий метод	до 100	до 10	IQsun, Leica, Vismage, Z+F
Метод оптичної триангуляції	до 5	до 1	Trimble, Minolta

#### *Принцип дії блоку розгортки наземних лазерних сканерів.*

Вони бувають покрокові і безперервні [55].

Покроковий режим роботи блоку розгортки. В НЛС, у яких блок розгортки функціонує в покроковому режимі, реєстрація кутів спрямованості приймально-передавального пристрою здійснюється в момент подачі імпульсу. Особливістю

таких систем є те, що блок розгортки залишається нерухомим до моменту прийняття імпульсу або до закінчення деякого проміжку часу, за який випромінювання пройде максимально можливою для даної моделі сканера відстань (у разі неповернення сигналу).

Особливістю НЛС з покроковою реєстрацією кутів є невисока швидкість роботи, обумовлена обмеженням кожного наступного кроку часу проходження сигналом подвійної відстані до перешкоди [56].

Безперервний режим роботи блоку розгортки. Розгортка приймально-передавального пристрою здійснюється за рахунок безперервного обертання блоку розгортки в горизонтальній і вертикальній площинах [56].

Такі блоки розгортки відрізняються високою швидкістю вимірювань, адже в більшості випадків саме кутомірна частина НЛС обмежує його швидкодію. Однак безперервність обертання блоку розгортки викликає деяку неоднозначність у вимірі відстаней, яку необхідно враховувати. Адже за той час, який необхідно випромінюванню для повернення на приймач, блок розгортки зміщується на деякий кут.

#### *Основні технічні характеристики наземних лазерних сканерів.*

На ринку геодезичного обладнання на сьогоднішній день представлена велика кількість НЛС. Основними технічними характеристиками, що дозволяють оцінити можливості НЛС, є: а) дальність дії; б) точність вимірювання відстаней; в) швидкість виконання вимірювань; г) мінімальний кутовий крок сканування; г) кут поля зору; д) діапазони припустимих робочих температур і зовнішніх умов; е) клас безпеки лазера; є) можливість геодезичного орієнтування НЛС; ж) споживання напруги, що впливає на тривалість роботи НЛС.

Розглянемо більш докладно зазначені технічні характеристики наземних лазерних сканерів.

#### *Дальність дії*

Дальність дії представляє максимальну відстань, на якому НЛС здатний отримати однозначний результат з гарантованими характеристиками. Даний

параметр залежить від застосовуваного методу вимірювань відстаней, потужності лазера і відбивної здатності поверхні [57].

#### *Точність вимірювання відстаней*

Точність вимірювання відстаней визначає похибка одиничного вимірювання і залежить від способу вимірювання відстаней і конструкції далекоміра. Значний вплив на точність надає розбіжність лазерного випромінювання. При вимірюванні відстаней до площин, не перпендикулярних осі променя, об'єктів складної форми, значно рознесених вздовж осі променя, відбитий сигнал буде приходити від декількох елементів поверхні. Як наслідок, виміряна відстань буде належати довільній точці, що знаходиться поза межами об'єкта. Чим більший розмір лазерної плями, тим більше координат виміряних точок будуть відрізнятися від свого істинного значення (рисунок 2.1).



Рис. 2.1 Помилки у вимірюванні відстаней, викликані високою розбіжністю лазерного випромінювання

#### *Швидкість виконання вимірювань.*

Швидкість виконання вимірювань визначає кількість точок, що реєструються НЛС за одиницю часу. Даний показник залежить від способу вимірювання відстаней і конструкції блоку розгортки [49]. Поєднання фазового методу вимірювання відстаней і методу з неперервною реєстрацією кутів дозволяє домогтися максимальної швидкості вимірювань до 500000 точок за секунду (точок/с).

### *Мінімальний кутовий крок сканування.*

Кутовим кроком сканування називається кутова величина зміщення блоку розгортки для кожного вимірювання. Мінімальний кутовий крок сканування визначає максимально можливу для конкретної моделі НЛС щільність зйомки і залежить від конструктивних особливостей блоку розгортки.

### *Кут поля зору.*

Кут поля зору НЛС визначає в градусній мірі (в горизонтальній і вертикальній площинах) максимальну область, яку можна охопити з однієї сканерної станції (без переміщення і розвороту НЛС). На відміну від перших НЛС, кут поля зору яких становив  $40^\circ$  в обох площинах [58,59], більшість сучасних моделей мають кут поля зору близький до панорамного (до  $360^\circ$  в горизонтальній і  $320^\circ$  у вертикальній площинах).

### *Діапазони допустимих робочих температур і зовнішніх умов.*

НЛС, в силу своєї конструкції, не мають підвищеної морозостійкості. Більшість моделей працює тільки при температурі вище  $0^\circ\text{C}$ , що накладає обмеження на роботу поза приміщенням у зимовий період. Останнім часом виробники вдосконалюють НЛС, багато в чому завдяки підвищенню попиту на лазерні сканери. Ступінь пило- та вологозахищеності сучасних НЛС досить високий і дозволяє працювати в умовах сильної запиленості та вологості. Перевагу мають НЛС з рідинним охолодженням, що забезпечує підвищену герметичність і виключає контакт із зовнішнім середовищем. Класи захисту обладнання по індексу IP <число>, відповідно до стандарту ІЕС 60825-1 [60]. Сучасні НЛС дозволяють працювати при температурах до мінус  $40^\circ\text{C}$  і мають клас захисту до IP66.

За ступенем безпеки лазери діляться на декілька класів відповідно до міжнародного стандарту ІЕС 60825-1 [61,62,63,64,65,66]: клас 1; 1M; 2; 2M; 3R; 4 [67].

### *Можливість геодезичного орієнтування НЛС.*

Для приведення результатів вимірів НЛС до заданої системи координат виконується орієнтування по точках з відомими координатами (сканерних

марках). Застосування даного способу орієнтування обумовлено відсутністю у більшості НЛС пристроїв обліку нахилу і розвороту, що дозволяють здійснювати орієнтування іншими способами. Однак останнім часом намічається тенденція до переходу на традиційний спосіб орієнтування, аналогічний вживаному в електронних тахеометрах. Для цього НЛС постачають пристроями, що компенсують кути нахилу приладу в деякому діапазоні або враховують їх. При відомих значеннях кутів нахилу, положення центру сканера і дирекційного кута однією з осей виконується приведення вимірювань у задану систему координат.

#### *Споживана напруга.*

Практично всі моделі топографічних НЛС мають можливість роботи від джерел як змінної, так і постійної напруги. Робота від джерела змінної напруги вигідна при наявності мережі 220 В, що можливо, як правило, у закритих виробничих приміщеннях. При роботі на відкритих об'єктах електроживлення НЛС здійснюється від спеціалізованих або будь-яких інших акумуляторних батарей, що забезпечують постійну напругу від 12 до 24 В. Для деяких моделей НЛС мінімально необхідною є напруга 24 В, що збільшує вагу джерела живлення і знижує мобільність.

#### *Класифікація наземних лазерних сканерів за технічними характеристиками*

На сьогоднішній день у світі виконується значна кількість НЛС. Вони представлені великою різноманітністю моделей, що відрізняються одна від одної технічними характеристиками, принципом дії, розмірами і призначенням. Основними характеристиками НЛС, що визначають їхні можливості, є дальність дії і точність. Більшість із представлених на ринку НЛС обмежені у максимальній дальності дії до декількох метрів. Такі сканери володіють дуже високою точністю визначення координат точок, але призначені для отримання тривимірних моделей дрібних деталей. Основне застосування вони знаходять у машинобудуванні та медицині [66].

Останнім часом з'являються все більш прогресивні моделі наземних лазерних сканерів, які вдосконалюються; впроваджуються нові технології і

класифікувати ці прилади стає все складніше. Тому автором запропонована власна, загальна класифікація НЛС (рисунок 2.2).

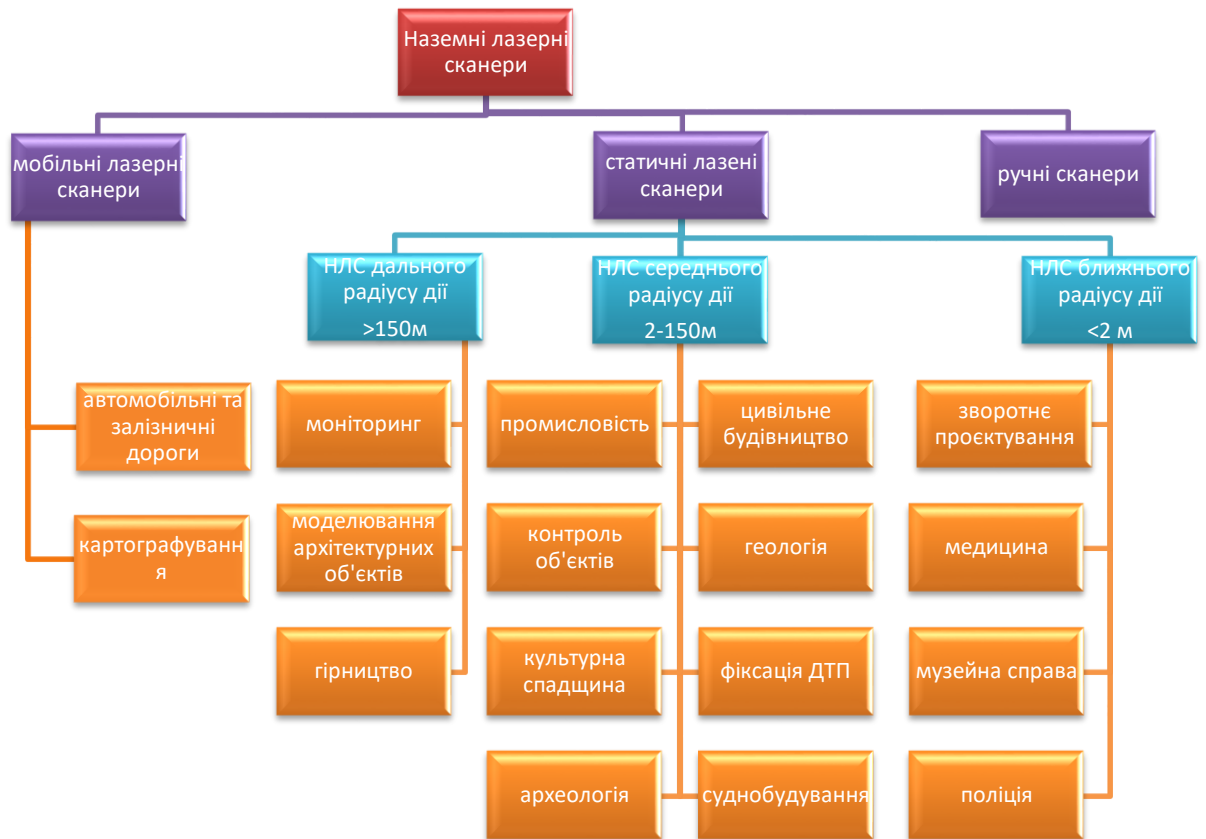


Рис. 2.2 - Класифікація НЛС.

- НЛС ближнього радіусу дії, що володіють високою (до сотих долей міліметра) точністю вимірів, але при цьому мають обмежену дальність дії (до 2 м) та/або кут поля зору (в межах кута поля зору об'єктива цифрової камери). Такі сканери мають досить вузьку специфікацію, багато з них є стаціонарними;

- НЛС середнього радіусу дії, такі сканери здатні виконувати вимірювання з точністю до декількох міліметрів на відстанях до 150 м. НЛС цієї групи мають, як правило, досить великий кут поля зору;

- НЛС дальнього радіусу дії дозволяють виконувати вимірювання на відстані від 150 м. При цьому їх точність коливається від 1 до 50 мм. Такі сканери володіють близьким до панорамного кута поля зору (у горизонтальній площині) і високою швидкістю виконання вимірювань (до 500 000 точок за секунду). Дані сканери отримали назву «топографічні наземні лазерні сканери» [67].

Все частіше лазерні сканери стають головною частиною автоматизованих систем контролю параметрів різних об'єктів. Тому автор вважає за доцільне розглянути деякі з них.

Прикладом може слугувати система, запропонована компанією FARO. Це автоматизована дистанційна система для сканування небезпечних або важкодоступних місць (рисунок 2.3) [68].



Рис. 2.3 Система сканування з дистанційним контролем

Розроблена система лазерного контролю залізничних колій Amberg Technologies (рисунок 2.4) [69].



Рис. 2.4 Система сканування залізничної колії

Одразу дві компанії FARO та Z+F розробили прилад для одночасного сканування та фіксування зображень з подальшою сумісною обробкою результатів (рис. 2.5) [70]

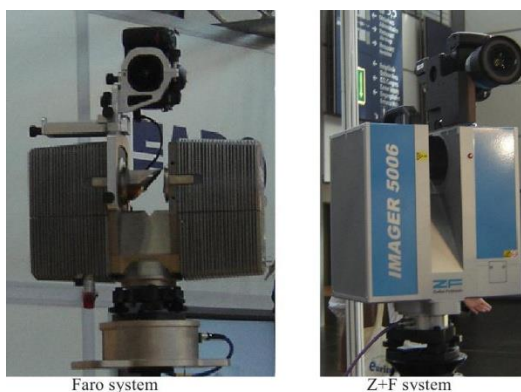


Рис. 2.5 Інтегрована камера з НЛС

За останні роки мобільні наземні скануючі системи значно розвинулись, що призвело до можливості виділити їм окрему класифікацію - автомобільні, залізничні та дистанційні апарати (рис.2.6). Кожна система містить наступні елементи: скануюча система, система глобального навігаційного позиціонування, відеокамера та пристрої для боротьби з вібрацією чи передачею даних тощо[71].



Topcon

RailMapper solution

S+H

Рис. 2.6 Мобільні скануючі системи

Ще одна унікальна розробка НЛС це ручний сканер (рисунок 2.7). Ця модель заснована на принципі сканування методом оптичної тріангуляції та використовується для сканування невеликих об'єктів на коротких відстанях [72].





Рис. 2.7 Ручний сканер Mantis Vision

НЛС стрімко розвиваються, вдосконалюються алгоритми обробки результатів, на їх основі розробляються нові системи, що значно ускладнює присвоєння єдиної класифікації для всіх сканерів у цілому.

## **2.2 Вимірювання сучасними наземними лазерними сканерами, основні етапи робіт**

На даний час у світі багатьма фірмами випускаються наземні лазерні сканери, що мають різні функціональні можливості. При цьому єдиної інструкції, де описані етапи робіт і послідовності дій при виконанні сканером зйомки, немає - існують інструкції до кожного приладу. У зв'язку з цим в дисертації виконано огляд загальних принципів виконання робіт для наземних лазерних сканерів та запропоновано узагальнені етапи робіт і послідовність дій їх проведення.

*Установка наземних лазерних сканерів на станції.*

Перед початком виконання вимірювань на станції сканер необхідно встановити на штатив або інший аналогічний пристрій. При виборі місця розташування станції основною умовою є максимальний кут захоплення видимої ділянки зйомки, що багато в чому визначається кутом поля зору НЛС. У моделях НЛС, що мають обмежений кут поля зору у вертикальній площині, для захоплення областей, близьких до зеніту, крім вертикальної установки,

практикується установка в горизонтальне положення або з довільним кутом нахилу (рис. 2.8).

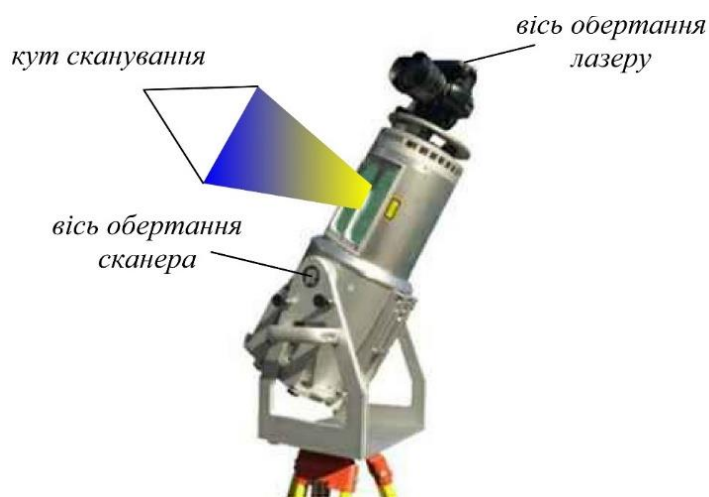


Рис.2.8 - Наземний лазерний сканер з обмеженим кутом поля зору

Дані способи установки актуальні тільки для сканерів з обмеженим вертикальним кутом поля зору, так як панорамні сканери дозволяють виконувати зйомку в близьких до зеніту областях без нахилу(рис. 2.9).



Рис.2.9 Наземний лазерний сканер з панорамним кутом поля зору

#### *Створення планового висотного обґрунтування*

Для виконання вимірювань у заданій системі координат при роботі з наземними лазерними сканерами створюється планово-висотне обґрунтування (ПВО). Створення планово-висотного обґрунтування здійснюється в два етапи: створення основного планово-висотного обґрунтування; створення робочого планово-висотного обґрунтування сканера.

Основне ПВО створюється від пунктів державної геодезичної мережі (ДГМ) або мереж згущення таким чином, щоб забезпечити на ділянці робіт необхідну кількість точок робочого ПВО. При створенні основного ПВО супутниковими

методами пункти доцільно розташовувати на об'єкті у вигляді базисів, від яких відбувається їх подальше згущення прокладанням висячих теодолітних ходів. Прив'язка до пунктів ДГМ необхідна у випадку подальшого порівняння результатів за певний проміжок часу у єдиній системі координат.

Робоче планово-висотне обґрунтування являє собою точки з відомими координатами, які можуть бути однозначно розпізнані на точковій моделі, і за якими в подальшому обчислюються параметри орієнтування НЛС. У якості робочого ПВО використовуються сканерні марки. В основі дешифрування сканерних марок за даними наземного лазерного сканування лежать два принципи - визначення геометричного центру плоскої фігури, що однозначно контрастує з навколишніми поверхнями (плоскі сканерні марки, представлені на рисунку 2.10 а, б, в), або визначення центру геометричної фігури відомої форми і/або розмірів (об'ємні сканерні марки, представлені на рисунку 2.10 г, д, е), наприклад, сфери, півсфери або циліндра. Для зручності установки сканерних марок на різні поверхні, їх нахилу або розвороту можуть використовуватися спеціальні підставки різної конструкції.



Рис. 2.10 Типи сканерних марок

Конфігурація розміщення точок робочого ПВО щодо НЛС повинна бути рівномірною, а збільшення їх кількості додає надлишкові вимірювання, що підвищує точність і надійність визначення параметрів орієнтування сканера. У деяких випадках точки робочого ПВО грають роль основного. Це відбувається тоді, коли мережа розвивається методом прокладання сканерних ходів, тобто

частина точок робочого ПВО (зелені) попередньої сканерної станції є точками робочого ПВО наступної (рисунок 2.11).

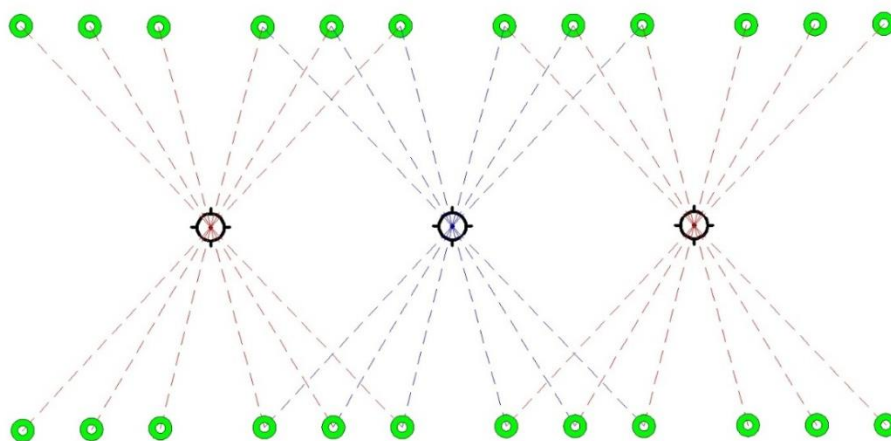


Рис. 2.11 Схема створення ПВО прокладанням ходу за допомогою сканера

Такі ходи можуть бути замкнутими або витягнутими. Враховуючи те, що точність визначення координат марок НЛС найчастіше вище точності одиничного виміру сканера і за рівнем відповідає або навіть перевершує точність більшості електронних тахеометрів, такий спосіб розвитку робочого ПВО досить ефективний і дозволяє досягти високої точності орієнтування НЛС [45]. Прокладання сканерних ходів доцільно в тих випадках, коли навколишня ситуація дозволяє розташувати сканерні марки в необхідній конфігурації.

Орієнтування точкових моделей, отриманих з різних сканерних станцій у зовнішній системі координат, здійснюється за допомогою ПЗ. Воно, використовуючи алгоритм пошуку спільних сканерних марок в обох системах координат (зовнішньої і системи координат сканера), визначає зв'язки між марками, після чого відбувається орієнтування. Для оцінки точності і якості орієнтування використовуються значення помилок визначення лінійних і кутових елементів орієнтування або помилки положення марок у зовнішній системі координат.

#### *Виконання вимірювань наземними лазерними сканерами*

Процес виконання вимірювань на сканерній станції аналогічний для всіх моделей НЛС і включає наступні етапи:

а) встановлення зв'язку НЛС з керуючим ПЗ. Для управління процесами сканування та обміну даними між сканером і керуючим комп'ютером

використовується керуюче ПЗ. В окремих випадках, НЛС може мати вбудований комп'ютер з монітором. Також має місце запис вимірювань не на зовнішній комп'ютер, а на знімні карти пам'яті. Після запуску керуючого ПЗ та встановлення зв'язку з НЛС виконуються вимірювання;

б) завдання області сканування. Керуюче ПЗ для різних моделей наземних сканерів містить ідентичні функції завдання режимів сканування та обміну даними. Завдання області сканування здійснюється за зображенням поля зору сканера. Для формування таких зображень використовуються пряме відео або панорамний знімок, отриманий за допомогою вбудованої відеокамери. Недоліком такого знімка є те, що реальна область сканування буде трохи відрізняться від заданої внаслідок розбіжності положення відеокамери з прийнятно-передавальним пристроєм далекоміра. Інший спосіб формування зображення поля зору НЛС полягає в створенні зображення за даними сканування. У даному випадку перед виконанням основних вимірів виконується сканування в межах поля зору сканера з великим кутовим кроком. Це дозволяє задавати область сканування, яка буде в точності відповідати реальній;

в) завдання кроку сканування. Більшість НЛС мають можливість завдання довільних значень кроку сканування як в кутовий, так і в лінійній мірі. У другому випадку в керуючому ПЗ вказується необхідна відстань між знімальними точками на певній відстані, на підставі чого визначається відповідний кутовий крок;

г) завдання режиму сканування. Багато моделей НЛС мають функції завдання режимів сканування, спрямовані на підвищення точності вимірювань, що досягається кількома способами. Першим є фокусування лазерного променя, що здійснюється вручну на фіксовану відстань, або в автоматичному режимі для кожного вимірювання. Другим способом є збільшення кількості прийомів виконання кожного вимірювання для подальшого їх усереднення.

### **2.3 Класифікація похибок у результатах наземного лазерного сканування**

Для підбору правильної математичної моделі обліку похибок вимірювань будь-яким фотограмметричним або геодезичним приладом необхідно знати

фізичну природу їх виникнення. Останнє, в свою чергу, потребує чіткого розуміння принципу дії вимірювального пристрою.

Похибка, яка має найбільший відсоток впливу на кінцеві результати, - це помилка вимірювання відстані. Відстань, яку необхідно отримати за допомогою далекомірної системи, за змістом є істинною відстанню. Однак отримати її можна тільки за умови, що вимірювання будуть проводитися у вакуумі, тому що швидкість поширення хвиль при цьому буде постійною. Наявність атмосфери на шляху випромінювання призводить до наступного [74]:

- зменшується швидкість поширення електромагнітних хвиль, збільшується час їх проходження;

- викривляється траєкторія електромагнітної хвилі (рефракція);

- відбувається згасання електромагнітних хвиль внаслідок поглинання і розсіювання їх енергії в атмосфері, що знижує дальність дії далекомірних пристроїв;

- за рахунок турбулентності атмосфери виникають випадкові зміни параметрів хвилі (амплітуди, фази, частоти, поляризації, напрямки поширення хвилі і поперечного перерізу пучка), що призводить до погіршення відношення сигнал/шум.

Вплив навколишнього середовища проявляється двома основними факторами, що впливають на точність виміру НЛС: кліматичний вплив - температура, вологість, тиск і т.п.; зовнішній вплив - механічний, електромагнітний, радіаційний, пил, туман і т. п. [75, 76].

Таким чином, атмосфера, особливо в приземних шарах (тропосфера), робить істотний вплив на електронні методи вимірювання відстаней. Стан і властивості тропосфери визначаються головним чином трьома факторами: тиском повітря, його температурою і вологістю. Поле атмосферного тиску можна вважати стабільним в часі, і воно змінюється за барометричним законом.

Розрізняють два поняття швидкості електромагнітних хвиль у середовищі - фазова і групова швидкості. Завдання визначення робочої швидкості цілком зводиться до знаходження показника заломлення повітря.

Залежність показника заломлення повітря ( $n$ ) від довжини хвилі випромінювання ( $\lambda$ ) має назву «дисперсія», вона багаторазово вивчалася в лабораторних умовах при стандартних метеорологічних параметрах, якими прийнято вважати  $T_0=288,16$  К ( $t_0=+15$  °С),  $P_0=760$  мм рт. ст. (1 мм рт. ст. =133Па),  $e_0=0$  (сухе повітря), 0,03 % вмісту вуглекислого газу в повітрі [74].

Груповий показник заломлення обчислюється за формулою:

$$N_0 = (n_0 - 1) \cdot 10^6 = A + \frac{3B}{\lambda^2} + \frac{5C}{\lambda^4} \quad (2.2)$$

де  $N_0$  – індекс заломлення в звичайних умовах;  $\lambda$ -довжина хвилі у вакуумі;  $A, B, C$  - експериментально певні постійні, звані дисперсійними коефіцієнтами.

Найбільш точною дисперсійної формулою вважається формула, коефіцієнти якої отримані Едленом і мають такі значення:  $A=272,613$ ;  $B=1,5294$ ;  $C=0,01367$  [74].

Для визначення залежності показника заломлення від метеоелементів в умовах, що відрізняються від стандартних, використовується формула [74]:

$$N = N_0 \frac{T_0 P}{P_0 T} + \left( 17.045 - \frac{0.5572}{\lambda^2} \right) \frac{e}{T} \quad (2.3)$$

Прийнявши для звичайних умов значення температури, тиску і вологості:  $t=15$ °С,  $P=760$  мм.рт.ст.,  $e=60\%$  - і підставивши дані значення у формулу, обчислимо значення вимірюваних відстаней:

$$S_M = \left( S_{\text{вим}} / \left( \frac{c}{(1+N/10^6)} \right) \right) \cdot c \quad (2.4)$$

де  $S_{\text{вим}}$  – виміряна відстань;  $S_M$  – справжня відстань.

Підставляючи в формулу значення кожного метеоелемента з кроком:  $\Delta t=10$ °С,  $\Delta P =10$ мм рт.ст.,  $\Delta e = 10\%$ , обчислимо зміни вимірюваних відстаней  $\Delta S_{\text{вим}}$  за формулою:

$$\Delta S_{\text{вим}} = S_{\text{вим}_i} - S_{\text{вим}_{i+1}} \quad (2.5)$$

де  $S_{\text{вим}_i}$  - виміряна відстань при  $i$ -му значенні метеоелементів;  $S_{\text{вим}_{i+1}}$  - виміряна відстань при  $(i+1)$  значенні метеоелементів;

При оцінці впливу коефіцієнта заломлення на точність вимірювання відстаней НЛС встановлено, що при довжині лінії 1000 м помилка вимірювання

відстаней при зміні температури на  $10^{\circ}\text{C}$  складе близько 10 мм; при зміні тиску на 10 мм рт. ст. складе близько 4 мм; при зміні відносної вологості на 10% складе близько 1 мм. Таким чином, у процесі обробки результатів сканерних вимірювань такі параметри, як: температура, тиск і вологість - повинні обов'язково враховуватися. Вони, як правило, вводяться в кожному випадку при роботі на станції [77]. Вплив змін основних атмосферних явищ відображено на рисунку 2.11. Розраховано результати відхилень при зміні температури, вологості та тиску повітря, на відстані від 0 до 100 метрів. Саме така відстань найчастіше використовувалась при вимірюваннях на лінійному об'єкті, що розглянуто в дисертаційній роботі.

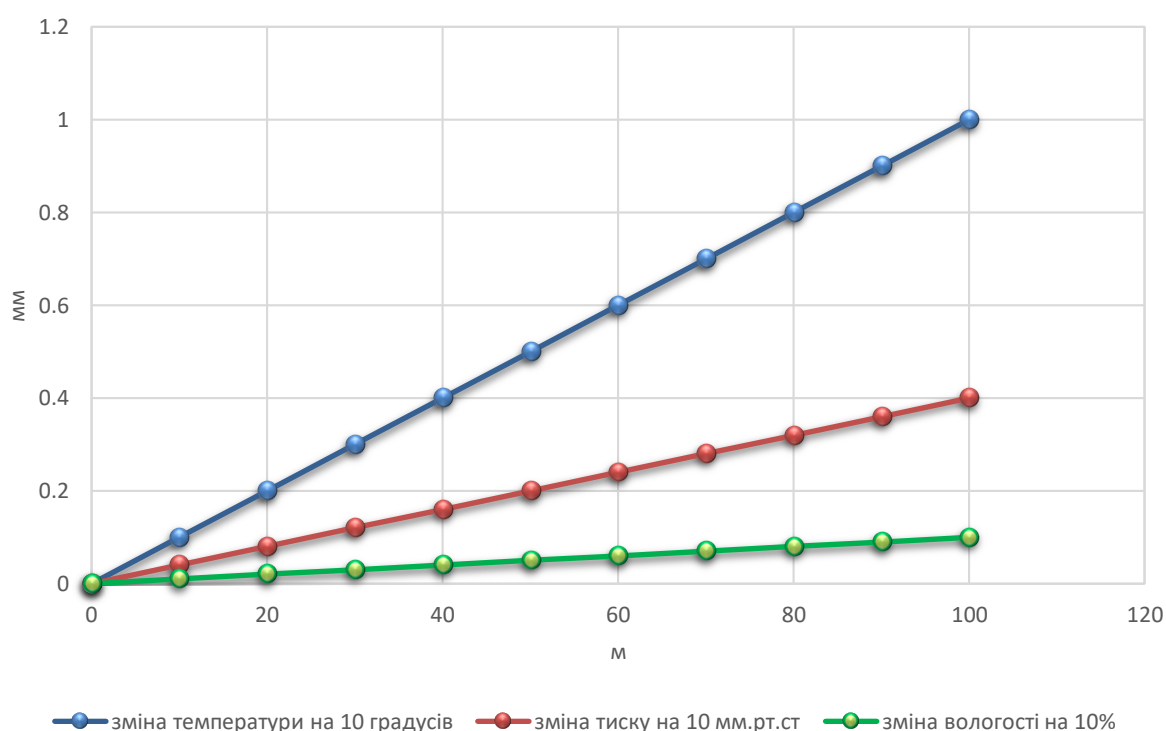


Рис. 2.11 – Залежність результатів вимірювань від метеоумов.

### *Рефракція електромагнітних хвиль*

Внаслідок нерівномірної щільності атмосфери електромагнітні хвилі в ній поширюються не по прямій, а за деякою викривленою траєкторією. Дане явище називається рефракцією [78]. На рисунку 2.12 представлені графічні елементи рефракційного подовження траєкторії.



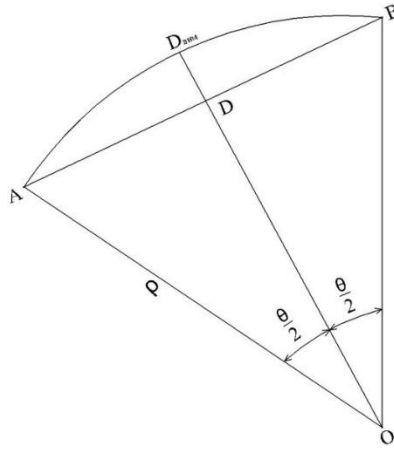


Рис. 2.12 Рефракційне відділення траєкторії

де:  $D_{\text{вим}}$  - хорда;  $AB$  – шукана геометрична відстань  $D$ ;  $AO = OB = \rho$  – радіус кривизни;  $\theta$ -центральний кут, що відповідає дузі  $D_{\text{вим}}$ .

При обчисленні подовження траєкторії ( $AD_r$ ) найбільш просто отримати формулу, вважаючи, що траєкторія хвилі - дуга кола, а при необхідності врахування дійсної форми траєкторії необхідно використовувати як радіус цього кола середній радіус кривизни.

Можна записати [74]:

$$D_{\text{вим}} = \rho\theta; D = 2\sin\frac{\theta}{2} \quad (2.6)$$

Розклавши  $\sin(\theta/2)$  у ряд за формулою

$$\sin x = x - \frac{x^3}{3!} + \dots \quad (2.7)$$

І, обмежившись двома членами розкладання, будемо мати

$$D = \rho\theta - \frac{1}{3}\rho\left(\frac{\theta}{2}\right)^3 \quad (2.8)$$

Звідси отримаємо :

$$D = D_{\text{вим}} - \frac{D_{\text{вим}}^3}{24\rho^2} \quad (2.9)$$

Для світлових хвиль значення  $\rho$  можна прийняти рівним 25000 км [74]. Підставивши це значення в формулу (2.8), отримаємо, що подовження траєкторії хвилі на відстані 1000 м складе  $6,7 \cdot 10^{-5}$  мм, і вплив цього фактора на точність вимірювання відстаней наземними лазерними сканерами є несуттєвим.

Все викладене вище відноситься до випадку так званої нормальної рефракції, що має місце при звичайному стані атмосфери.

### *Згасання електромагнітних хвиль у атмосфері*

Загасання, або ослаблення інтенсивності електромагнітних хвиль в атмосфері, викликане, в основному, поглинанням молекулами атмосферних газів і розсіюванням на флуктуаціях густини і аерозольних частинок. Загасання залежить від прозорості атмосфери, протяжності траси і довжини хвилі випромінювання і описується законом Бугера [79]:

$$I_D = I_0 e^{-\alpha(\lambda)D} \quad (2.10)$$

де  $I_D$  - інтенсивність пучка випромінювання, що пройшов прошарок товщиною  $D$ ;  $I_0$  - інтенсивність вхідного в прошарок пучка;  $\alpha(\lambda)$  - спектральний коефіцієнт ослаблення.

Наступна похибка виникає через вплив форми і матеріалу поверхонь. Конструктивні особливості далекомірного блоку НІС і атмосфера, у якій поширюється лазерне випромінювання, повністю визначають точність виконуваних вимірювань тільки в ідеальному випадку. Таким випадком є вимірювання до плоскої поверхні з нормальним коефіцієнтом відбиття, перпендикулярно орієнтованої в напрямку до вектора поширення лазерного променя. Розмір поверхні повинен бути більшим за лазерну пляму в вимірюваній точці. На практиці ж такі умови зустрічаються не часто. Будь-яка їх зміна призводить до виникнення невизначеності при вимірюванні відстані до конкретної точки і, як наслідок, до виникнення додаткових похибок у кожному вимірі.

Також помітну роль у результатах вимірювань грає форма поверхні відображення. Це викликано тим, що в перерізі лазерний промінь, що потрапляє на об'єкт, має деякі розміри (діаметр), і відображення відбувається по всій площі його перетину. Це відбувається, коли випромінювання відбивається від об'єктів, відмінних від площини, перпендикулярно орієнтованої по відношенню до напрямку променя, або віддалених один від одного на деякій відстані. У такому випадку відбувається розмивання або спотворення форми відбитого сигналу. На рисунку 2.13 представлені приклади зміни форми відбитого сигналу в залежності від орієнтування поверхні відбиття.

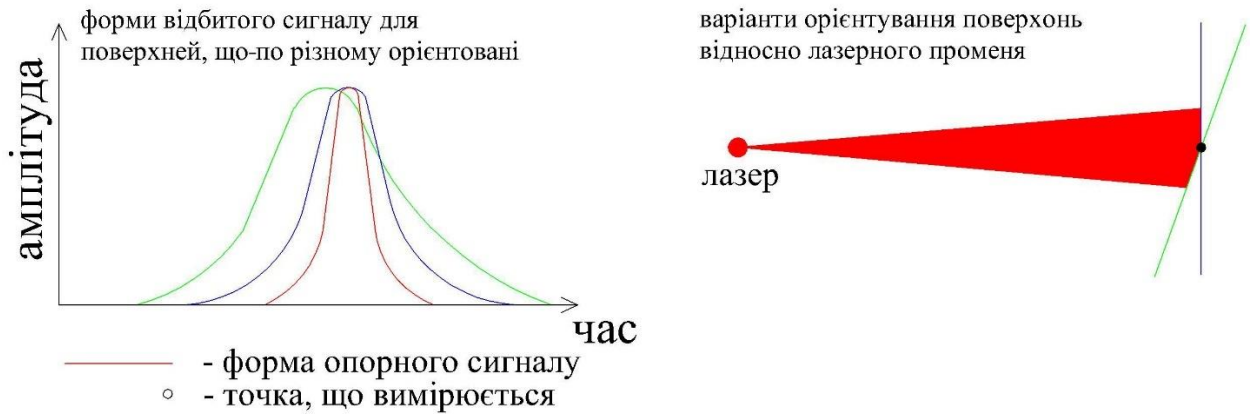


Рис. 2.13 Залежність форми відбитого сигналу від орієнтації поверхні відбиття

Іншим прикладом зміни форми відбитого сигналу є ситуація, коли промінь потрапляє на границю двох об'єктів. Очевидно, що в цьому випадку функція відбитого сигналу буде мати два максимуми. Якщо не враховувати цього фактору, то відстань, що вимірюється, буде відповідати певній точці, яка не належить геометричній моделі об'єкта (рисунк 2.14) [80].

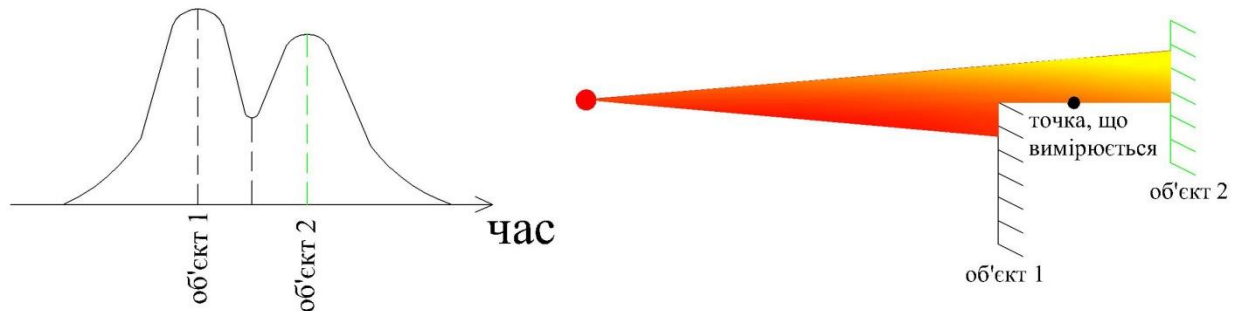


Рис. 2.14 Форма сигналу, що потрапив на межу двох об'єктів

У деяких моделях НЛС є можливість вимірювати відстань до першої точки (першого максимуму функції) або до останньої точки (останнього максимуму) відображення. Однак на практиці ця опція буде працювати тільки в тому випадку, якщо можна чітко відокремити один максимум сигналу від іншого, що, в свою чергу, залежить від ширини лазерного імпульсу і відстані між об'єктами 1 і 2.

На відбитий сигнал, крім відстані, атмосферних умов і кута падіння променя, вплив має також відбивна здатність поверхонь. Білі поверхні дають сильніший відбитий сигнал у порівнянні з більш темними поверхнями, що впливає на дальність вимірювання відстаней. Сила сигналу, відбитого від кольорових поверхонь, залежить від спектральних характеристик лазера в

зеленому, червоному і ближньому інфрачервоному діапазоні [80]. При скануванні об'єктів, що мають дзеркальні, напівпрозорі поверхні або неоднорідну кристалічну структуру, неминуче будуть виникати помилки внаслідок перевідбиття випромінювання, а отже, буде спостерігатися підвищений рівень шумів і виникнення систематичних помилок у відстанях [51]. Для деяких типів матеріалів ці помилки можуть досягати величин, що в кілька разів перевищують середню квадратичну похибку одного виміру дальності.

Певні помилки у вимірах також будуть присутні при різкій зміні відбивної здатності сканованих поверхонь. Вплив переходу між поверхнями з різною відбиваючою поверхнею представлено на рисунку 2.15.

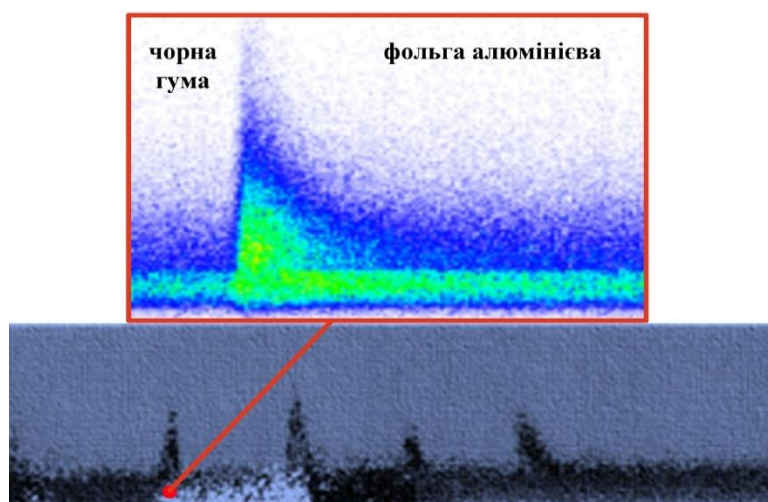


Рис. 2.15 Сплески на точковій моделі, викликані переходом між поверхнями з різним коефіцієнтом відбиття НЛС Riegl LMS-Z360

Для зменшення впливу вищевказаних джерел помилок на точність далекомірних вимірювань необхідно дотримуватися наступних рекомендацій:

- для визначення поправок в вимірюванні відстані необхідно здійснювати врахування температури, тиску і вологості повітря під час вимірювань (якщо далекомірний блок наземного лазерного сканера дозволяє здійснювати обчислення і введення таких поправок);

- при виконанні вимірювань в умовах високої загазованості, турбулентності або градієнтів температур необхідно розробити заходи, що послаблюють дані впливу (наприклад, виконання вимірювань в інший час, при більш сприятливих умовах), або здійснювати їх облік при подальшій обробці вимірювань;

- при виконанні вимірювань до дзеркальних, напівпрозорих або кристалічних поверхонь необхідно покривати їх матовим матеріалом, а при неможливості цього - взяти додаткових заходів з контролю точності даних вимірювань (виконання додаткових вимірювань іншим способом);

- для досягнення мінімальних розмірів лазерної плями на поверхнях необхідно здійснювати фокусування лазерного променя (при наявності даної опції для наземного лазерного сканера);

- при обробці даних сканування необхідно враховувати помилкові вимірювання на гранях об'єктів і поверхнях складної форми.

На основі вищесказаного автором запропонована класифікація похибок, що впливають на виміри НЛС, яка представлена на рисунку 2.16.

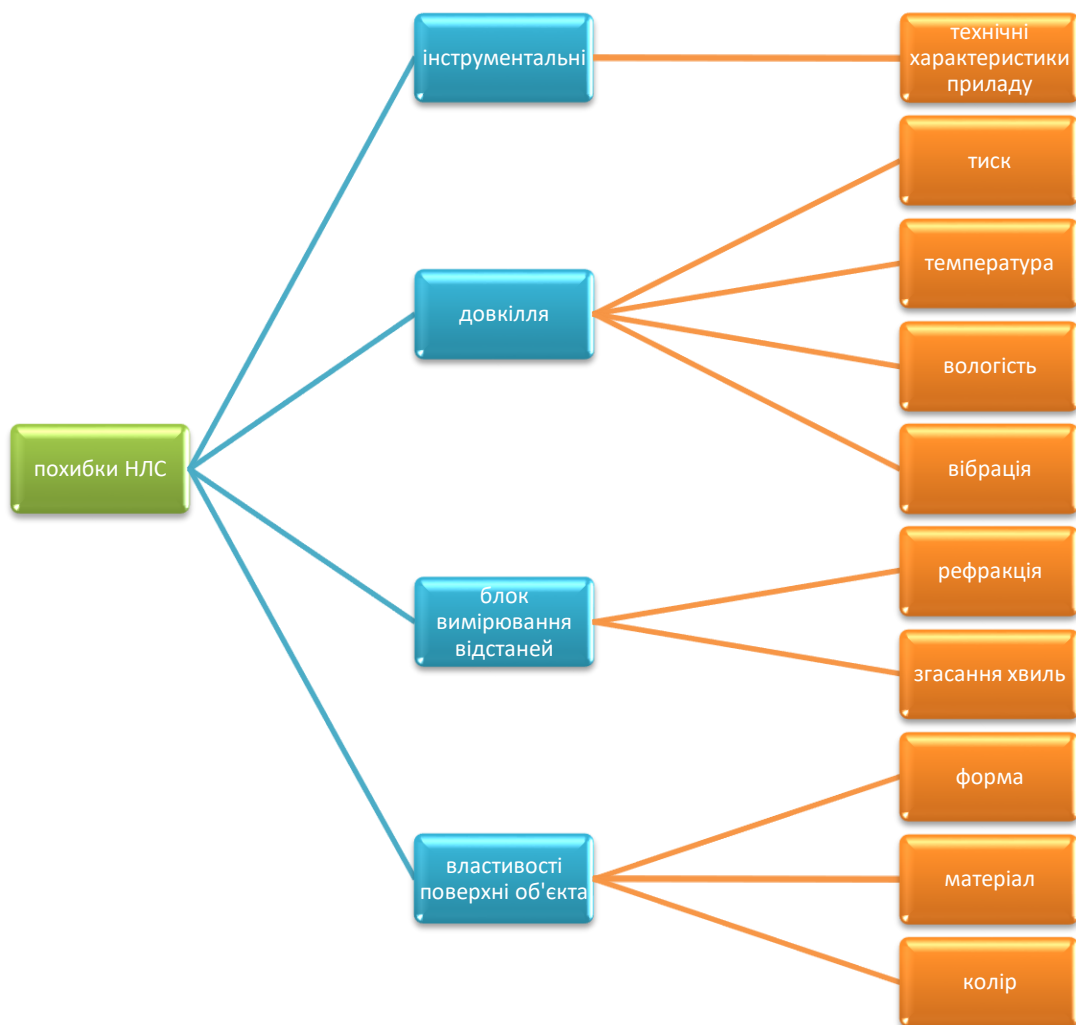


Рис. 2.16 Класифікація похибок НЛС

За достовірності одержуваної інформації досить часто результати наземного лазерного сканування порівнюють з аерофотозйомкою. Питання оцінки точності результатів наземного лазерного сканування актуальне досьогодні і ще мало вивчене.

Слід зазначити, що відстань 150 м до знімальних точок, при зйомці лінійних об'єктів, є граничною, а точність вимірювання відстаней іншими НЛС становить 2-50 мм. Аналіз отриманих значень також дозволяє зробити висновок, що основний внесок у похибку визначення координат точок методом наземного лазерного сканування вносить член, пов'язаний з точністю зовнішнього орієнтування сканів. Тому при виконанні робіт наземним лазерним сканером необхідно особливо ретельно дотримуватися рекомендацій щодо геометрії розташування марок, за якими виконується зовнішнє орієнтування сканів, що підтверджується дослідженнями [73].

Якщо вимірювання виконуються з однієї сканерної станції, то СКП взаємного положення вимірних точок буде становити від 4 до 31 мм і буде в основному залежати від СКП вимірювання відстаней і кутів. Цей висновок необхідно використовувати в тих випадках, коли необхідно отримати підвищену точність при зйомці об'єктів невеликих розмірів. Тому необхідно пам'ятати, що при сканерних вимірах необхідно суворо дотримуватися встановленого порядку роботи, що включає етапи підготовки до вимірювань, створення планово-висотного обґрунтування та виконання вимірювань.

Аналіз похибок сканерних вимірювань у дослідженні показав, що середня квадратична похибка визначення положення знімальних точок головним чином залежить від похибки створення основного і робочого планово-висотного обґрунтування. З урахуванням точності наземних лазерних сканерів і відстаней до об'єктів, помилка взаємного положення знімальних точок може становити від 6 до 100 мм. Середня квадратична похибка визначення взаємного положення знімальних точок, отриманих з однієї станції, може становити від 2 до 50 мм.

## 2.4 Програмне забезпечення для обробки даних, отриманих за допомогою наземних лазерних сканерів

*Класифікація програмних продуктів обробки даних наземного лазерного сканування.*

На сучасному ринку представлено досить багато спеціалізованих програмних продуктів, призначених для роботи з точковими моделями, одержуваними з використанням топографічних НЛС. Основними завданнями такого ПЗ є: а) управління НЛС в процесі роботи; б) отримання метричної інформації з точкової моделі; в) побудова на основі точкової моделі двовимірних примітивів (лінія, точка, текст); г) твердотільне моделювання на основі точкової моделі; ґ) поверхневе моделювання на основі точкової моделі; д) обчислення площ і об'ємів; е) побудова профілів і перетинів; ж) порівняння векторних і точкових моделей (інспектування).

На даний час запропоновано поділ ПЗ на три категорії: управління; для створення точкової моделі; для постобробки [52]. Однак, даний розподіл досить умовний, тому що більшість програмних продуктів містять функції декількох категорій. Для зменшення невизначеності, при визначенні призначення ПЗ, автором запропоновано класифікацію, що припускає поділ ПЗ на два типи (рисунок 2.17):

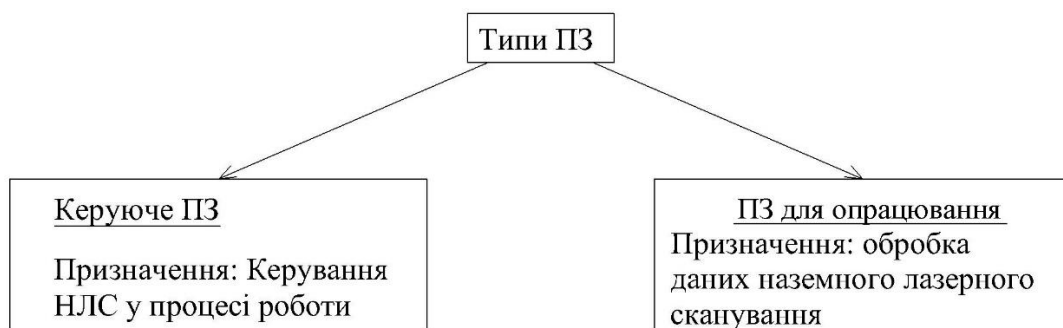


Рис. 2.17 - Типи ПЗ

а) керуюче ПЗ. Основними функціями ПЗ даної групи є: встановлення зв'язку з НЛС, вибір параметрів сканування, запис із вимірювань, управління даними і їх візуалізація. Набір функцій, як правило, стандартний і налаштований для роботи з конкретною моделлю НЛС. Крім вище названих функцій, керуюче

ПЗ може мати ще і додаткові - для орієнтування точкових моделей та їх фільтрації;

б) ПЗ для обробки. ПЗ даної групи призначено для обробки даних наземного лазерного сканування з метою отримання певної продукції. Для цього можуть використовуватися різні інструментальні засоби, закладені в ПЗ його розробниками.

*Основні функції програмних продуктів обробки даних наземного лазерного сканування.*

З метою визначення основних функцій, реалізованих у найбільш поширених комерційних програмних продуктах, що дозволяють працювати з даними, отриманими топографічними НЛС, виконано аналіз офіційних функцій найбільш поширених програмних продуктів (у дужках вказані компанії-виробники): -Dipsos (Trimble); RealWorks Survey (Trimble); Scene Vision 3D (3rdTech); 3D-Extractor (Callidus Precision Systems); CloudWorx (Leica Geosystems); Cyclone (Leica Geosystems); Faro Scene (Faro Technologies Company); VoidWorks (I-Site Pty Ltd.); I-Site Studio (I-Site Pty Ltd.); Focus Inspection (Metris); Focus reverse engineering (Metris); RiSCAN PRO (Riegl Laser Measurement Systems); Z+F LFM Modeller (Zoller+Froehlich GmbH); Reconstructor (Topotek Survey Technologies); PolyWorks / Modeller (InnovMetric Software); PolyWorks / Inspector (InnovMetric Software); RapidForm2006 (INUS Technology); RapidFormXO (INUS Technology); PointCloud Studio (KUBIT GmbH); Studio (RainDrop Geomagic).

На основі дослідження даних програмних продуктів визначені основні функції обробки даних наземного лазерного сканування і розроблено склад функціональних груп, які об'єднують ці функції за типами розв'язуваних задач:

а) експорт/імпорт даних.

Основними функціями цієї групи є:

1) імпорт точкових моделей сторонніх форматів, імпорт вимірювань НЛС, що випускаються не фірмою-розробником ПЗ, крім текстових файлів типу «X, Y, Z, Колір», що є універсальним форматом;



- 2) експорт в CAD-програми;
- 3) імпорт з CAD-програм.
- б) орієнтування точкових моделей.

Ця група включає в себе функції орієнтування точкових моделей у заданій системі координат та/або їх об'єднання в єдину точкову модель. Основними функціями групи є:

- 1) орієнтування точкових моделей за опорними точками. Орієнтування за сканерними марками або іншими довільними точками, координати яких відомі;
- 2) орієнтування точкових моделей за перекриттями. Орієнтування за зонами перекриттів з сусідніми точковими моделями;
- 3) комплексне орієнтування точкових моделей. Орієнтування точкових моделей з використанням спільного зрівнювання по опорних точках і по перекриттях з сусідніми точковими моделями;
- в) робота з точковою моделлю.

Ця група включає в себе функції, які використовуються для візуалізації точкової моделі та основних процесів роботи з нею. Основними функціями групи є:

1) різні колірні схеми візуалізації точкової моделі. Можливість подання точкової моделі в різних колірних схемах: за інтенсивністю відбитого сигналу (в чорно-білих або інших тонах), за віддаленістю точки від сканера, за висотою точки, за реальним кольором точки, за нормаллю точки по відношенню до сканера. Приклади подання точкової моделі в різних колірних схемах представлені на рисунку 2.18;

2) фільтрація точкової моделі. Функції фільтрації точкової моделі, спрямовані на зниження щільності точок, видалення шумів, сегментування та ін.;

3) виконання вимірювань за точковою моделлю. Функції отримання лінійної та координатної інформації з точкової моделі;



за висотою  
точок

за віддаленням  
точок до сканера

за інтенсивністю  
відбиття сигналу

в одному  
кольорі

## 2.18 Подання точкової моделі в різних колірних схемах

4) побудова профілів і перетинів точкової моделі. Функції, що дозволяють отримувати перетин точкової моделі певної товщини як в довільних місцях, так і з певним кроком уздовж заданих осей або ліній. Приклад побудови профілю і перерізів точкової моделі тунелю в ПЗ RealWorks Survey представлений на рисунку 2.19 (матеріали для тренінгу-<https://store.csdsmc.com/departments/software-102/SOF.html>).

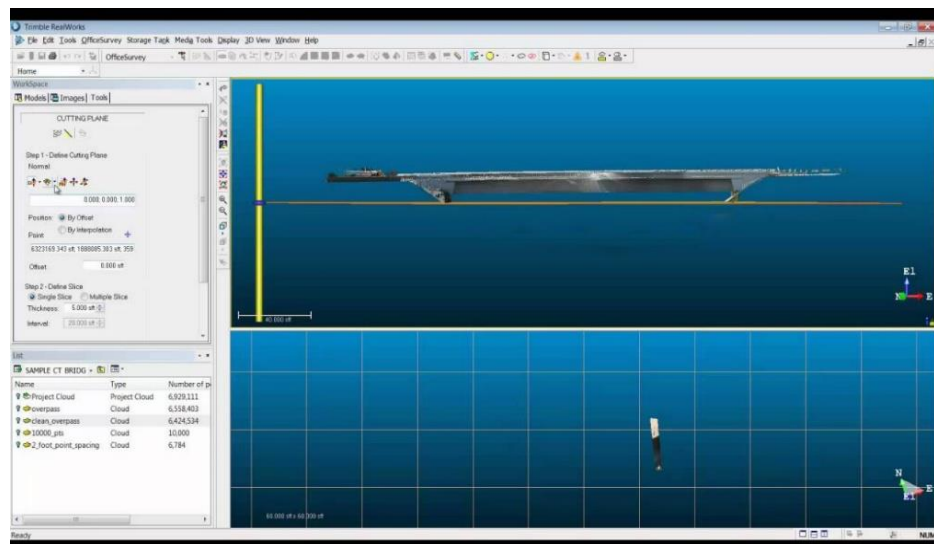


Рис. 2.19 Побудова профілю та перерізу точкової моделі

5) створення ортозображень за моделлю. Функція дає змогу спроектувати фрагмент точкової моделі на задану площину і отримати зображення, кожен піксель якого відповідає вимірній точці;

г) створення двовимірних примітивів.

Ця група включає в себе функції, які використовуються для створення таких об'єктів, як: лінія, полілінія, точка або текст - і їх редагування. Основними функціями групи є:

- 1) створення двовимірних примітивів за точковою моделлю. Функції побудови двовимірних примітивів;
- 2) незалежне створення двовимірних примітивів. Можливість створення двовимірних примітивів без координатної прив'язки до точкової моделі;
- 3) створення текстових об'єктів. Можливість створення текстових об'єктів, як самостійних, так і прив'язаних до інших об'єктів;
- д) створення і редагування плоских триангуляційних мереж.

Ця група включає в себе функції, які використовуються для створення і редагування мереж трикутних полігонів, вершинами котрих є виміряні точки, зв'язки між якими визначені при проектуванні на площину чи інший математично описаний об'єкт. Триангуляційна мережа, створена за даним принципом, буде мати обсяг, але не буде замкнутою.

Основними функціями групи є:

- 1) створення плоских триангуляційних мереж. Функції створення плоских триангуляційних мереж за точковою моделлю (завдання фігури проектування та основних параметрів мережі);
- 2) редагування плоских триангуляційних мереж. Функції згладжування і розрідження плоских триангуляційних мереж;
- 3) текстурування плоских триангуляційних мереж. Функції надання зображень на триангуляційну модель;
- 4) інспектування плоских триангуляційних мереж. Можливість порівняння декількох плоских триангуляційних мереж;
- 5) побудова перерізів триангуляційної мережі. Можливості розсічення триангуляційної мережі за допомогою заданої площини чи площини, результатом якого є полілінії, отримані з перетину січної площини і триангуляційної мережі;

Визначення обсягів і площ плоских триангуляційних мереж. Функції визначення площі поверхні плоских триангуляційних мереж і обчислення їх обсягу, відносної заданої площини.

е) твердотільне моделювання.

Ця група включає в себе функції створення цифрових тривимірних моделей за даними наземного лазерного сканування за допомогою вписування в точкову модель твердих тіл або інших тривимірних об'єктів (площини, лінії, точки). Тверді тіла - тривимірні об'єкти, обмежені зовнішніми поверхнями з певними взаємними зв'язками, які утворюють правильний замкнутий геометричний об'єм [81, 82]. Основними операціями створення твердих тіл є операції об'єднання, віднімання та перетину геометричних об'єктів (сфер, торів, циліндрів, конусів, паралелепіпедів або будь-яких твердих тіл) або видавлювання плоских контурів уздовж заданої траєкторії [83, 84]. Приклад твердотільної моделі представлений на рисунку 2.20.



Рис. 2.20 Твердотільна модель, частина автопокриття

Основними функціями групи є:

1) створення твердотільних об'єктів за точковою моделлю. Функції створення твердотільних та інших тривимірних об'єктів з використанням автоматичного або напівавтоматичного вписування їх в точкову модель;

2) незалежне створення твердотільних об'єктів. Можливість «ручної» побудови в просторі твердотільних та інших тривимірних об'єктів, незалежно від точкової моделі;

3) створення моделей промислових конструкцій. Функції створення лінійних промислових конструкцій різного профілю, які застосовуються при будівництві реальних об'єктів;

4) підтримка бібліотек елементів. Можливість використання бібліотек будівельних елементів, розміри яких відповідають чинним стандартам, або створення власних бібліотек;

5) підтримка роботи з шарами. Можливість поділу елементів моделі за тематичними ознаками;

б) вимірювання за тривимірною моделлю. Функції визначення геометричних параметрів твердотільних або інших тривимірних об'єктів;

ж) робота з об'ємними триангуляційними мережами і NURBS.

Ця група включає в себе функції поверхневого моделювання за точковою моделлю. Поверхневим моделюванням є опис об'єктів складної форми за допомогою об'ємних триангуляційних мереж (зв'язки між вершинами в яких визначені, виходячи з їх взаємного просторового положення) або сплайнових поверхонь - NURBS, які будуються з математичних кривих і не мають граней [85]. NURBS - аббревіатура від англ. Non-Uniform Rational B-Spline (Non-Uniform - неоднорідний, тобто вплив контрольної точки, яка керує поверхнею, може бути різним, так як кожна контрольна точка має власну вагу і вектор спрямованості [86]; Rational - раціональний; B-Spline (Basis Spline) - базовий сплайн, тобто спосіб математичного опису кривої інтерполяцією між трьома і більше точками) [87].

Основними функціями групи є:

1) створення об'ємних триангуляційних мереж. Функції створення об'ємних триангуляційних мереж за точковою моделлю;

2) редагування об'ємних триангуляційних мереж. Функції редагування об'ємних триангуляційних мереж згладжування, закриття дір у мережах, об'єднання мереж і т. д.;

3) текстурування об'ємних триангуляційних мереж. Можливість накладення зображень на об'ємну триангуляційну мережу;

- 4) робота з NURBS. Функції створення і редагування NURBS;
- 5) інспектування поверхонь. Можливість порівняння геометричних параметрів відсканованих тривимірних об'єктів, описаних об'ємними мережами триангуляції або NURBS з раніше створеними моделями (вимірними або проєктними);
- 6) видача звітів з інспектування моделей. Функції передачі даних, отриманих при інспектуванні тривимірних моделей, в зовнішні електронні формати (текстові, графічні, табличні);
- 7) визначення обсягів і площ тривимірних об'єктів. Функції, що дозволяють визначати площі та обсяг об'ємних триангуляційних мереж або NURBS;
- з) керування НЛС.

Ця група включає в себе функції управління однією або декількома моделями НЛС. Основними функціями групи є:

- 1) керування однією моделлю НЛС. Функції, що дозволяють керувати однією моделлю НЛС, або декількома моделями НЛС однієї марки;
- 2) керування різними моделями НЛС. Функції, що дозволяють керувати моделями НЛС декількох марок.

Показником ефективності ПЗ є можливість вирішення з його допомогою певних завдань. Основним критерієм, що визначає дані можливості, на погляд автора, необхідно вважати функціональний зміст ПЗ (функціональність) - певний набір функцій роботи з даними наземного лазерного сканування.

На основі аналізу сучасного ПЗ і його функціональних можливостей, а також ґрунтуючись на особистому досвіді, кожній функції заданий коефіцієнт значущості  $K_z$  в групі (сума коефіцієнтів усіх функцій в групі дорівнює «1», використовуючи які, за формулою [88]:

$$K_{ГР} = \sum K_z \quad (2.11)$$

визначені чисельні значення групових коефіцієнтів функціональності  $K_{ГР}$ , представлені в таблиці 2.2.

З використанням отриманих значень  $K_{ГР}$ , пропонується виконувати аналіз можливостей застосування програмних продуктів для вирішення прикладних

задач у наступному порядку: визначаються функціональні групи, необхідні для реалізації поставленого завдання; для кожної групи в процентному відношенні задається коефіцієнт у вирішенні поставленого завдання (сума коефіцієнтів дорівнює «1»), розраховується коефіцієнт функціональності програмного забезпечення  $F$  за формулою:

$$F = \sum_{i=1}^n K_{ГРi} \cdot P_i \quad (2.12)$$

де  $n$  - кількість функціональних груп, необхідних для реалізації

Таблиця 2.2

## Групові коефіцієнти функціональності

ПЗ	Експорт/ Імпорт, $K_{сп}$	Орієнтування, $K_{сп}$	Робота з точковою моделлю, $K_{сп}$	Побудова двохвимірних примітивів, $K_{сп}$	Плоскі триангуляційні мережі, $K_{гр}$	Твердотільне моделювання, $K_{гр}$	Об'ємні триангуляційні мережі та NURBS, $K_{гр}$	Сканування, $K_{гр}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Trimble 3Dipos 3.0	1,00	1,00	1,00	0,50	0,90	0,10	0,60	0,00
Trimble Real Works Survey	0,67	0,67	1,00	0,50	1,00	0,00	0,10	0,00
3rd Tech SceneVision-3D	0,33	0,67	0,10	0,50	0,00	0,00	0,00	0,00
Callidus 3D-Extractor	0,33	0,67	0,10	0,20	0,50	0,20	0,00	0,00
Cyclone CloudWorx	0,67	0,00	0,80	1,00	0,00	0,90	0,00	0,00
Cyclone	1,00	1,00	0,80	1,00	0,90	1,00	0,00	1,00
FARO Scene	0,67	0,67	0,60	0,50	0,40	0,30	0,00	0,00
I-Site Studio	1,00	0,67	0,80	1,00	0,80	0,00	0,50	1,00
Metris Focus Inspection	1,00	0,00	0,70	0,20	0,90	0,00	0,75	0,00
Focus Reverse Engineering	1,00	0,00	0,70	0,20	0,80	0,00	0,65	0,00
Riegl RiSCAN PRO	0,00	0,33	0,50	0,30	0,50	0,00	0,00	0,70
Z+F LFM Modeller	0,67	0,33	0,50	0,30	0,40	0,40	0,00	0,00
PolyWorks/Inspector	1,00	1,00	0,50	0,80	0,10	0,10	0,25	0,00
PolyWorks/Modeller	1,00	1,00	0,80	1,00	0,80	1,00	0,65	0,00
Inus RapidForm2006	1,00	1,00	0,80	0,50	1,00	0,40	1,00	1,00
Inus RapidFoimXO	1,00	1,00	0,50	0,20	0,90	0,40	0,75	0,00
Kubit PointCloud	0,67	0,00	0,80	1,00	0,00	0,90	0,00	0,00
Geomagic Studio	0,33	1,00	0,70	0,20	1,00	0,10	1,00	0,00

На основі запропонованого алгоритму були отримані коефіцієнти функціональності досліджуваних програмних продуктів з метою створення

цифрових топографічних планів  $F_P$  і цифрових тривимірних моделей  $F_{3D}$  лінійних споруд на основі даних наземного лазерного сканування.

Тому ПЗ, використовуване для створення ЦТП на основі даних наземного лазерного сканування, повинно мати розвинуті функції роботи з точковою моделлю і створення двовимірних примітивів. У таблиці 2.3 наведені значення  $p_i$  даних функціональних груп, задані на основі особистого досвіду.

Коефіцієнти функціональності програмних продуктів для створення ЦТП  $F_P$  об'єктів лінійних споруд на основі даних наземного лазерного сканування, отримані на основі запропонованого алгоритму, представлені на рисунку 2.21.

Таблиця 2.3

Функціональні групи ПЗ, що використовуються при створенні ЦТП лінійних споруд

Функціональна група	$p_i$
Створення двовимірних примітивів	0,60
Робота з точковою моделлю	0,30
Експорт/імпорт даних	0,10

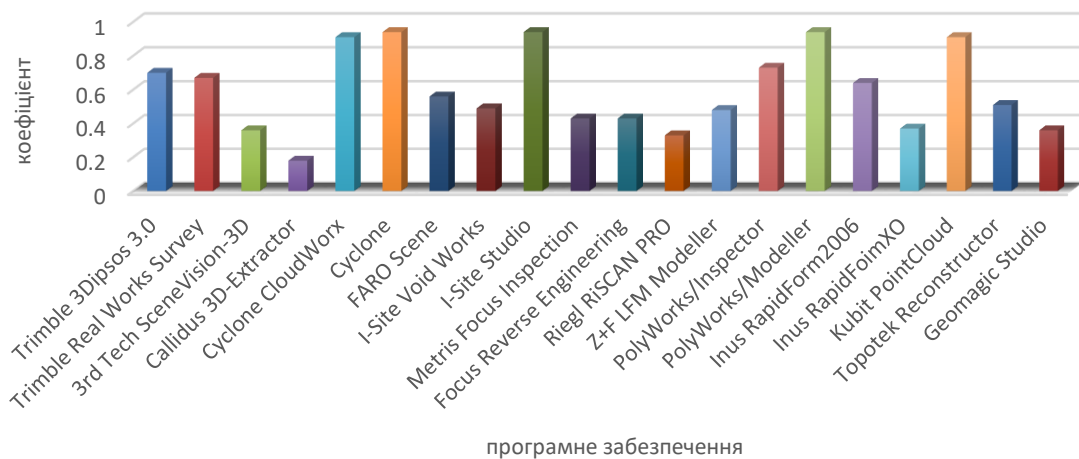


Рис. 2.21 Коефіцієнти функціональності ПЗ  $F_P$  для створення ЦТП лінійних споруд

Для створення цифрових тривимірних моделей (ЦТМ) лінійних споруд основна увага повинна приділятися функції твердотільного моделювання, роботі з точковою моделлю, побудові двовимірних примітивів і триангуляційних мереж.



Коефіцієнти функціональності програмних продуктів для створення ЦТМ  $F_{3D}$  лінійних споруд на основі даних наземного лазерного сканування, отримані на основі запропонованого алгоритму, представлені на рисунку 2.22. У таблиці 2.4 наведені значення  $p_i$  даних функціональних груп.

Таблиця 2.4

Функціональні групи ПЗ, що використовуються при створенні ЦТМ лінійних споруд

Функціональна група	$p_i, \%$
Твердотільне моделювання	50
Робота з точковою моделлю	20
Створення двовимірних примітивів	10
Робота з плоскими триангуляційними мережами	10
Експорт/імпорт даних	10

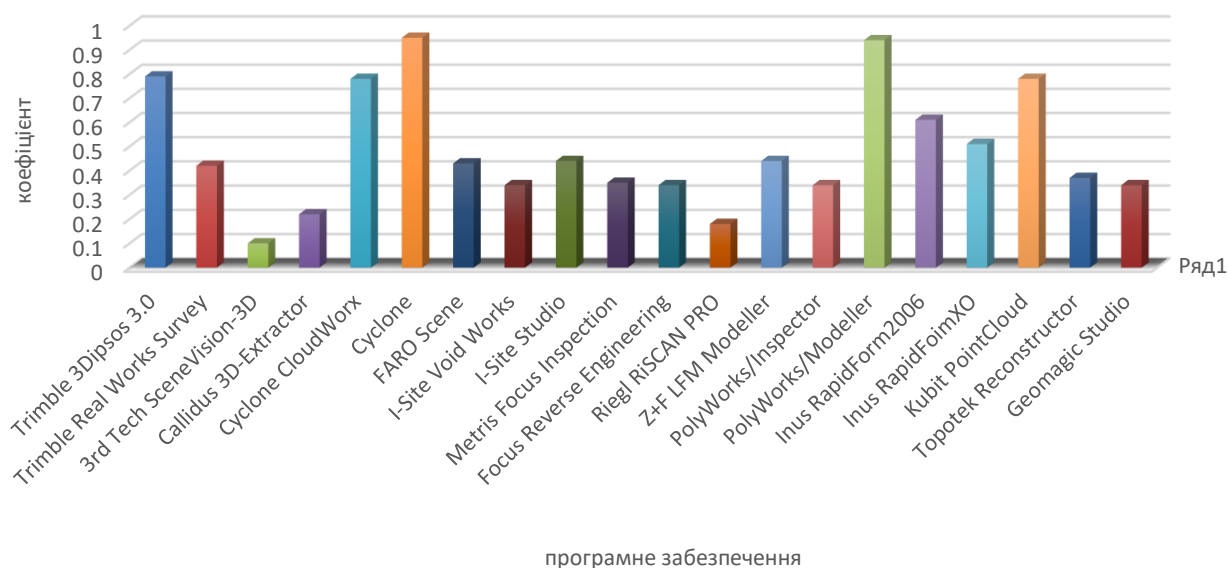


Рис. 2.22 Коефіцієнти функціональності ПЗ  $F_{3D}$  для створення ЦТМ лінійних споруд

Для порогового значення  $F_P$  і  $F_{3D} > 0,75$  визначені програмні продукти, що дозволяють створювати цифрові топографічні плани та тривимірні моделі лінійних споруд. До них відносяться: Cyclone фірми Leica, PolyWorks/Modeller фірми InnovMetric, Cyclone CloudWorx фірми Leica і PointCloud фірми Kubit.

При скануванні та роботі з отриманими просторовими даними автором використовувалось ПЗ Leica Cyclone, що виходячи з практики, достатньо добре зарекомендувало себе з обробки та порівняння даних.

### **Висновки до розділу 2**

1. Запропоновано загальні принципи виконання робіт наземними лазерними сканерами для використання результатів з метою моніторингу лінійних споруд, представлені узагальнені етапи робіт і послідовність дій при їх веденні.
2. Розрахований вплив атмосферних явищ, таких як: тиск, температура, вологість повітря - на вимірювання відстаней. Тому при веденні робіт НЛС з об'єктами, що потребують більшої точності, необхідно суворо контролювати ці параметри як при вимірах, так і при обробці даних. З розрахунків видно, що помилка вимірювання відстаней наземними лазерними сканерами, котра виникає за рахунок атмосферних явищ на відстані до 100 м, не перевищує  $\pm 1,4$  мм. Розглянуто вплив коефіцієнта заломлення на точність вимірювання відстаней НЛС. Розрахунки показали, що на таких коротких відстанях ним можна знехтувати.
3. Виявлений вплив матеріалу та форми поверхонь на відбитий сигнал і, як наслідок, на точність вимірювань. Здійснено аналіз сучасних наземних лазерних сканерів та запропоновано їх класифікацію. На основі аналізу запропоновані вимоги до технічних характеристик НЛС з метою моніторингу лінійних об'єктів.
4. Проведено детальний аналіз функціональних можливостей програмного забезпечення, як для сканування, так і для обробки даних. Встановлено ряд недоліків та переваг, що дозволяє здійснювати вибір програм в залежності від вирішення необхідних завдань

### **3. РОЗРОБКА МЕТОДИКИ ВИЗНАЧЕННЯ ДЕФОРМАЦІЙ ЛІНІЙНИХ СПОРУД ЗАСОБАМИ НАЗЕМНОГО ЛАЗЕРНОГО СКАНУВАННЯ**

Одним із завдань геодезичних досліджень деформаційних процесів є відображення зміни положення об'єкта або його області, використовуючи просторово-часовий проміжок. Досягнення цієї мети призведе до розуміння поведінки і отримання характеристик об'єктів у галузі інженерної геодезії, що пов'язана з проблемою деформаційного аналізу. Тому необхідно визначити, чи є переваги наземного лазерного сканування над звичайними класичними методиками з визначення деформаційних процесів. Для цього потрібно виконати зйомку одного і того ж інженерного об'єкта у той самий час у рівних умовах різними приладами, а отримані результати використати для порівняльного аналізу.

Для вирішення завдань з геодезичного моніторингу лінійних об'єктів за допомогою НЛС необхідно розробити єдину методику, що дозволить оптимізувати роботу та подальшу обробку даних, отриманих під час сканування. Необхідно забезпечити високу якість, можливі зміни положення точкових хмар під час сканування та обробки.

#### **3.1 Сучасні інструменти і технології отримання тривимірних координат для моніторингу лінійних споруд**

На даний час поширені кілька технологій створення цифрових моделей об'єктів (ЦМО):

- теодолітна або тахеометрична зйомка. Останнім етапом є отримання просторових координат і згодом створення ЦММ за отриманими результатами[89]. Недоліками даного способу збору даних для побудови ЦММ є наступні: великий обсяг польових робіт; значні трудовитрати при наборі необхідної кількості точок для адекватного опису горбистої, поритої, гірської місцевості; набір окремих точок на порівняно великих відстанях одна від одної; виконання контрольних вимірів. Точність теодолітної і тахеометричної зйомок, в

основному, залежить від моделі використовуваного приладу і точності визначення координат точки стояння приладу і центрування на ній [90];

- зйомки з використанням глобальних навігаційних супутникових систем. Роботи зі зйомки ситуації і рельєфу із застосуванням супутникової технології проєктують для тих випадків топографо-геодезичної практики, коли проведення таких робіт з використанням даної технології вигідно і техніко-економічно обґрунтовано [91]. Зазвичай вона використовується для досить відкритих територій у широкому спектрі характеру рельєфу або за наявності невисоких будівель. Недоліком даної технології є обов'язкова наявність прямої видимості на супутники, залежність від їх просторового положення і великий обсяг польових робіт [92];

- аерофототопографічна зйомка. Сутність аерофотозйомки полягає в тому, що інформацію для створення цифрової моделі місцевості отримують за знімками. Зйомка проводиться за допомогою аерофотоапарата та цифрової камери з будь-якого повітряного судна. У даній технології знижені трудовитрати на проведення польових робіт. Тривимірні координати отримують за кількома знітками в стереорежимі [93];

- повітряне лазерне сканування. Робота будь-якого лазерного сканера повітряного базування заснована на вимірі похилої віддалі від джерела випромінювання (лазера) до наземного об'єкта, що є перешкодою на шляху поширення лазерного променя [94]. Одночасно визначають координати просторового положення носія (повітряного судна) за рахунок використання бортового приймача GPS, ГЛОНАСС, а також кути орієнтації зондуючого променя. Знання цих шести параметрів зовнішнього орієнтування дозволяє математично перейти до координат точки, що викликала відображення. Головними відмінними рисами лазерно-локаційних даних є їх «природна» тривимірність, тобто кожна точка в процесі зйомки відразу забезпечується трьома просторовими координатами. У цьому принципова відмінність і головна технологічна перевага лазерно-локаційного методу в порівнянні з традиційними методами картографування [95];

- наземне лазерне сканування . Принцип роботи наземних лазерних сканерів, основні характеристики та методики виконання знімальних робіт докладно представлені у пункті дисертаційної роботи 2.1 та 2.2

### **3.2 . Методика зйомки лінійних споруд методом наземного лазерного сканування для подальшого моніторингу**

Запропонована методика проведення робіт з наземного лазерного сканування дорожнього одягу з метою визначення його дійсного просторового положення реальної геометричної форми дозволяє виконати необхідний комплекс робіт із найменшими трудовими та часовими витратами, а також отримати дані для ведення подальшого моніторингу. Методика передбачає побудову тривимірної моделі одягу для оцінки її через певний часовий проміжок з аналогічною.

*Проектування робіт.* На етапі проектування виконується постановка завдання і визначаються вимоги, що ставляться до кінцевого продукту: метод представлення продукту, вимоги до точності, обсяги робіт [96]. Далі визначається коло завдань, які необхідно вирішити в процесі робіт, таких як: вибір методики робіт, підбір обладнання, яке за своїми характеристиками відповідало б поставленим завданням. Також ведеться збір інформації про пункти вихідної геодезичної мережі. Після отримання цієї інформації виконується проектування мережі основного ПВО, створюваного за допомогою супутникового обладнання або електронних тахеометрів відповідно до вимог точності, регламентованими інструкцією. На етапі обстеження об'єкта виконується рекогноситування, в ході якого проєктують приблизну кількість і положення пунктів ПВО, необхідних для виконання знімальних робіт. Вимоги до кількості пунктів ПВО, необхідних для зйомки лінійних об'єктів із застосуванням наземного лазерного сканування, є аналогічними до вимог для виконання топографічної зйомки з використанням електронних тахеометрів.

*Створення планово-висотного обґрунтування на об'єкті.* Під створенням основного ПВО із застосуванням супутникових приймачів і електронних тахеометрів мається на увазі створення мережі базових станцій на території

лінійної споруди, створення опорних базових точок безпосередньо на об'єктах робіт і подальше згущення знімальної мережі для формування робочого ПВО. Типова схема розвитку основного ПВО, яка може бути використана при зйомці, представлена на рисунку 3.1.

Базові станції служать для виносу знімального об'ґрунтування безпосередньо на об'єкти і закріплюються. Кількість базових станцій залежить від площі території, на якій знаходяться об'єкти, що підлягають зйомці. Прив'язка мережі базових станцій виконується від пунктів державної геодезичної мережі (ДГМ) і геодезичних мереж згущення (ГМЗ) із застосуванням супутникової апаратури. Далі виконується винос опорних базових точок, які закріплюються на об'єктах, з умовою дотримання взаємної видимості (між двома або більше точками). Це необхідно для подальшого згущення знімальної основи.

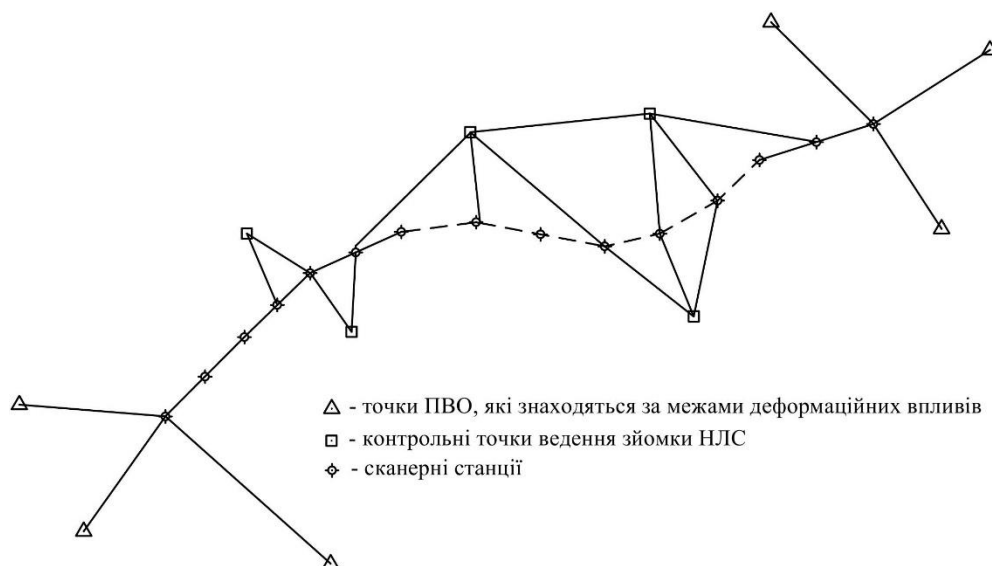


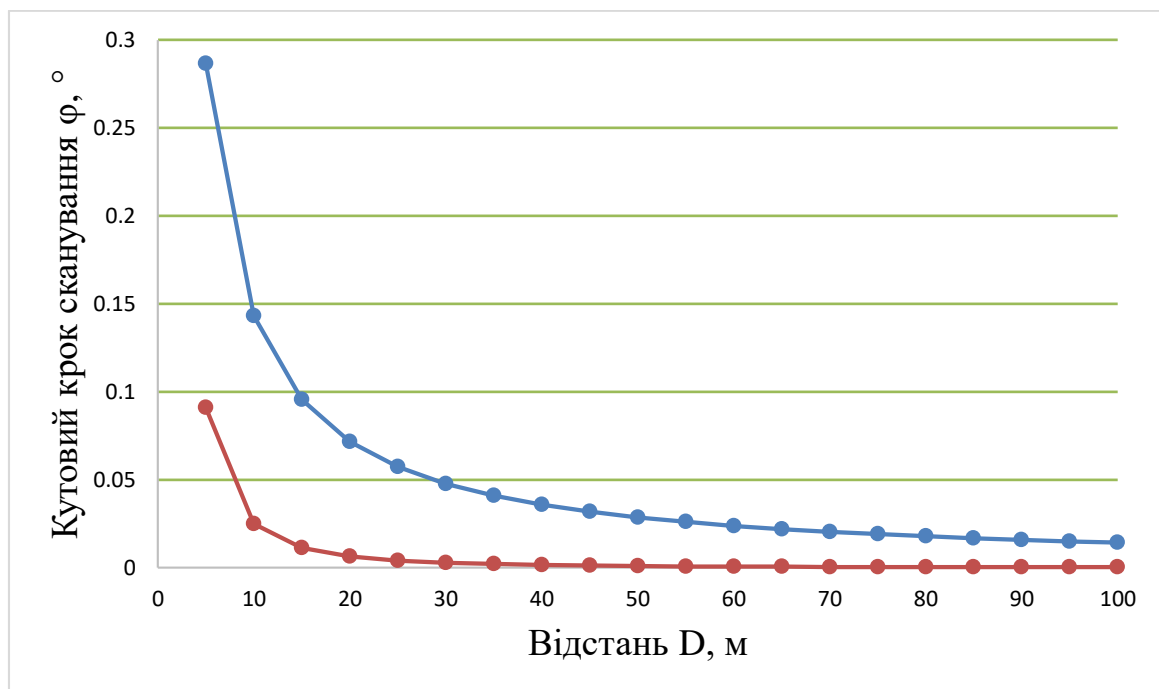
Рис. 3.1 Типова схема розвитку ПВО при зйомці лінійних інженерних споруд

*Вибір місць розташування сканерних станцій.* Вирішення таких питань, як розміщення НЛС на об'єкті під час зйомки і вибір необхідних параметрів сканування, відіграє вирішальну роль для оптимізації знімальних робіт. Тому користуючись досвідом, взаємним розташуванням частин об'єкту, аналізом збору необхідної інформації по об'єкту, обираються місця з максимальною видимістю об'єкта та сприятливих умов для отримання даних.

*Вибір кутового кроку сканування.* Інформативність даних, отримуваних з використанням наземних лазерних сканерів, збільшується разом зі щільністю

зйомки. Збільшення щільності сканування призведе до значних трудовитрат і зниження ефективності знімальних робіт, а в подальшому - і тривалості обробки. Тому під час сканування необхідно вибирати оптимальне значення кутового кроку, яке, з одного боку, дозволить отримати точкову модель з необхідною інформативністю, з іншого боку, не викличе зайвих витрат часу.

У роботі пропонується визначати кутовий крок сканування, виходячи з вимог до детальності отримуваної точкової моделі. При створенні цифрових топографічних планів детальність відображення ситуації залежить від їх масштабу. Наприклад, для планів масштабу 1:500 мінімальний розмір відображуваних об'єктів можна прийняти 0,3 мм в масштабі плану або 15 см на місцевості[90]. Крок дискретизації (лінійний крок сканування  $l$ ) в даному випадку складе  $1/2$  від мінімального розміру об'єкта, тобто близько 7 см. Таким чином, під час сканування необхідно підбирати кутовий крок, що забезпечує відстань між вимірюваними точками порядку 7 см. Очевидно, що в даному випадку кутовий крок сканування  $\varphi$  залежатиме від відстані до об'єкта, що знімається  $D$ . На рисунку 3.2 представлений графік зміни кутового кроку сканування від відстані до об'єкта  $D$  при лінійному кроці сканування  $l = 1$  см



— - площина перпендикулярна променю сканера  
 — - з урахуванням кута нахилу променю

Рис. 3.2 Зміна кутового кроку сканування від відстані до об'єкта

Виходячи з вищесказаного, прийнявши відстань до об'єкту  $D=40$  м, лінійний крок сканування  $l=7$  см, обчислимо  $\varphi$  за формулою:

$$\varphi = \left( l/D \right) \cdot 57,3^\circ = 0,1^\circ \quad (3.1)$$

При великих відстанях необхідно зменшувати кутовий крок сканування  $\varphi$ , що призведе до значного збільшення часу роботи на станції (наприклад, при зменшенні кутового кроку на 25% збільшення тривалості сканування складе приблизно 80%) і обсягу надлишкових, непотрібних вимірювань, які створять додаткові складнощі при обробці даних [97]. Крім того, для отримання вимірювань наземними лазерними сканерами, потрібна пряма видимість на об'єкт за умови високої контурності. При зменшенні відстані до об'єктів виникне необхідність у більшій кількості станцій сканування, що збільшить трудовитрати. В даному випадку, також будуть виникати значні тіньові зони за рахунок збільшення кутових розмірів об'єктів -перешкод.

При виконанні сканерної зйомки для створення цифрових тривимірних моделей лінійних споруд  $\varphi$  необхідно розраховувати, виходячи з підвищених вимог до детальності зйомки. Прийнявши мінімальний розмір об'єктів, що скануються, рівним 5см, аналогічно отримаємо, що лінійний крок сканування  $l$  складе 2,5см. Для забезпечення необхідної детальності зйомки дорожнього одягу не бажано перевищувати відстань  $D$  у 60 м. Підставивши в формулу значення  $l$  і  $D$ , отримаємо, що в даному випадку кутовий крок сканування  $\varphi$  буде приблизно рівним  $0,024^\circ$ .

Слід мати на увазі, що лазерний промінь розходитьсся і потрапляє на об'єкт плямою певного діаметру (0,2-4 см) [98]. А це означає, що об'єкт, який знімається в даному діаметрі, у будь-якому випадку буде виявлений, що і підтверджується отриманими результатами. До того ж, кожен об'єкт буде знятий з кількох станцій, що додає надійності висновкам.

Однак, формула буде справедлива тільки для площини, перпендикулярного напрямку до променю, тобто в більшості випадків вертикально орієнтованою. Поверхня автодороги близька до перпендикулярного положення відносно



вертикальної осі сканера (рисунок 3.3), величина лінійного кроку сканування  $l$  складе[98]:

$$l = D - \left( h_i \cdot \operatorname{tg} \left( 90 - \operatorname{arctg} \left( \frac{h_i}{D} \right) - \varphi \right) \right) \quad (3.2)$$

де  $D$  – відстань до об'єкта;  $h_i$  – висота сканеру відносно об'єкту, що знімається;  $\varphi$  – кутовий крок сканування.

Для розрахунку кута сканування необхідно вивести універсальну формулу для всіх випадків сканування, яка б враховувала кут падіння променя  $\alpha$  (рис.3.3), тоді формула матиме наступний вигляд:

$$\varphi = \frac{l \cdot h_{\text{пр}}}{S_{\text{ск}}^2 + h_{\text{пр}}^2} \quad (3.3)$$

де  $h_{\text{пр}}$  – висота установки приладу;  $S_{\text{ск}}$  – максимальна відстань сканування;  $S_{\text{вим}}$ ,  $S'_{\text{вим}}$  – похила відстань, що вимірюється сканером;  $l$  – лінійний крок сканування.

Тоді, підставляючи такі самі параметри зйомки ( $l=2,5$  см;  $D_{\text{ск}}=60$  м) у формулу, беручи висоту сканера 1,8 м, отримаємо крок сканування  $\varphi$  рівним 2.6" або 0,0072°. Порівняння результатів математичного обчислення з урахуванням кута нахилу і без наведені на рисунку 3.2.

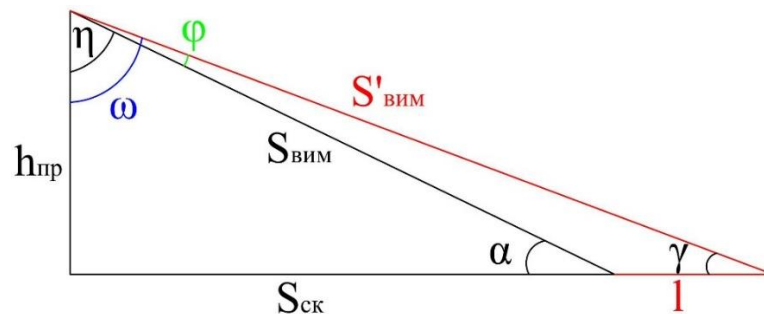


Рис. 3.3 Схема падіння променя на похилий об'єкт

При зйомці лінійних споруд з високою детальністю слід керуватися одним з наступних правил: виконувати зйомку таких об'єктів з додаткової станції сканера, розташованої на близькій відстані; зменшувати кутовий крок сканування (виконати зйомку в більш щільному режимі); збільшувати висоту установки сканера щодо об'єкта.

Досвід експериментальних робіт показав, що краща інформативність точкової моделі досягається не зменшенням кутового кроку сканування, а збільшенням кількості сканерних станцій при звичайній щільності зйомки.

*Вибір місцеположення сканерних станцій.* При виконанні зйомки із застосуванням наземних лазерних сканерів важливе місце відводиться вибору місць їх розташування. Для виключення тінювих зон, місця розташування сканерних станцій на об'єкті необхідно планувати з урахуванням максимально повного захоплення елементів об'єкта, тобто їх максимальної відкритості. При цьому важливо забезпечувати перекриття точкових моделей, отриманих з сусідніх станцій, у зонах з достатньою щільністю зйомки (тобто максимального радіуса, для якого розраховувався кутовий крок. Рисунок 3.4).

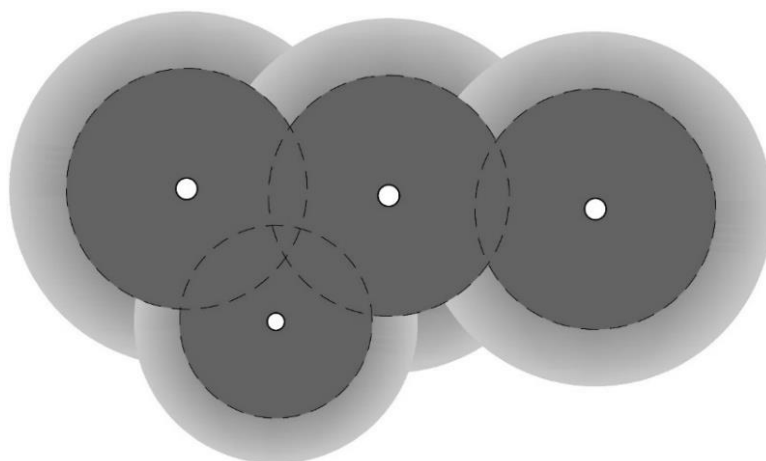


Рис 3.4 Перекриття точкових моделей, отриманих з різних сканерних станцій.

Виконання даної умови, на думку автора, дозволяє отримувати детальні точкові моделі і виконувати візуальний контроль їх суміщення, що, безумовно, підвищує надійність вимірювань.

Важливою умовою вибору місць розташування сканерних станцій також є висота НЛС щодо об'єкта, який знімається. За формулою (3.1) зроблені розрахунки лінійного кроку сканування  $l$ , за результатами яких побудований графік зміни  $l$  на площині, перпендикулярній вертикальній осі сканера, залежно від його висоти над об'єктом, для  $\varphi=0,1^\circ$  і  $S=50\text{м}$  (рисунок 3.5), з якого видно, що установка наземного лазерного сканера в максимально високі точки збільшує

оглядовість і щільність вимірюваних точок, що значно підвищує інформативність точкової моделі.

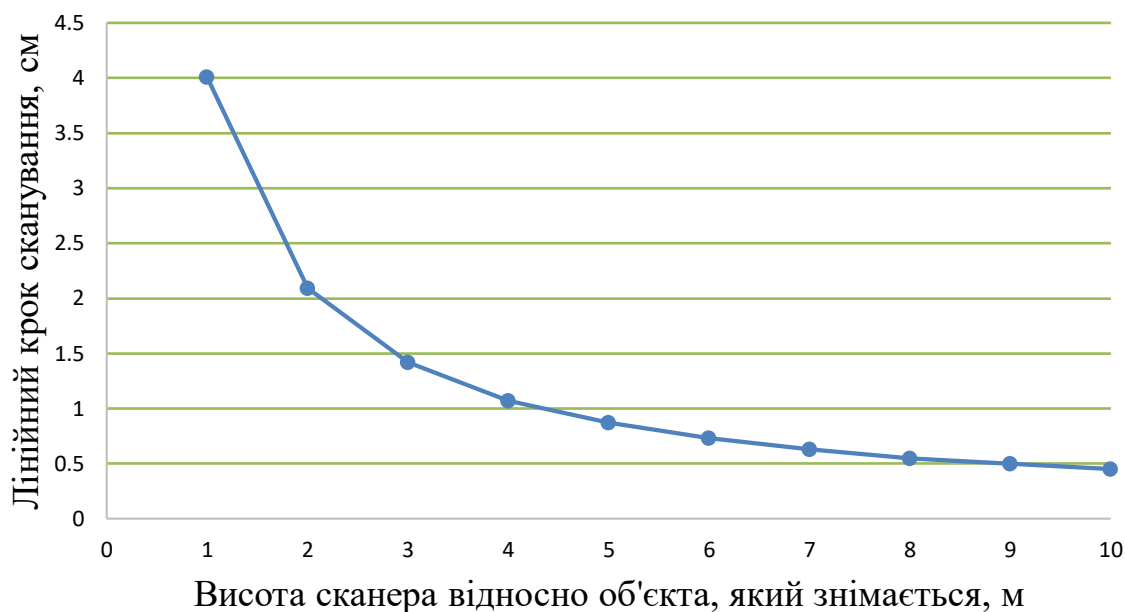


Рис. 3.5 Зміна кроку сканування в залежності від висоти сканера, відносно об'єкту

Отримані висновки підтверджені в ході виконання польових робіт за участю автора.

*Виконання сканерної зйомки.* У ході виконання сканерної зйомки на кожній станції пропонується дотримуватися наступного алгоритму дій:

- а) установка НЛС, підготовка його до роботи;
- б) встановлення та орієнтування тахеометра;
- в) розстановка сканерних марок (робочого ПВО) ;
- г) координування робочого ПВО електронним тахеометром - входить у дію пункту в;
- г) виконання сканером зйомки;
- д) координування робочого ПВО сканером ;
- е) тахеометрична зйомка недоступних контурів - входить до дії пунктів д та е;
- є) перехід на наступну сканерну станцію.

Наведений алгоритм є оптимальним для знімальної бригади, що складається з трьох чоловік. Такий склад бригади дозволяє економити час за рахунок

розділення процесів праці і виконання кількох дій одночасно. Процеси, що виконуються кожним членом знімальної бригади, наведені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1

Дії, що виконуються членами бригади під час виконання зйомки сканером

Член зйомочної бригади, №	Дії, що виконується
1	Робота з електронним тахеометром (установка тахеометра, прив'язка робочого ПВО, тахеометрична зйомка недоступних контурів, винос пунктів ПВО)
2	Робота з НЛС (установка НЛС, підготовка його до роботи, розстановка опорних марок, управління режимами сканування)
3	Робота з відбивачем-призмою (орієнтування тахеометра, зйомка недоступних контурів, винос пунктів ПВО)

*Створення робочого планово-висотного обґрунтування (на прикладі наземного лазерного сканера Leica Scan Station2).* Для приведення результатів вимірів наземних лазерних сканерів до заданої системі координат, виконується орієнтування точкової моделі за робочим ПВО (сканерні марки) [99].

Для орієнтування точкової моделі, виробники вказують, що достатньо трьох сканерних марок [100, 101], що розташовуються по колу, але для контролю їх кількість бажано збільшити до шести. Однак практика виконання робіт показала, що в силу ряду причин (недостатня видимість, перешкоди) кілька марок можуть бути виміряні неправильно. Тому бажано збільшувати число марок для більш достовірного і точного орієнтування при виявленні деформаційних процесів. У роботі запропонована схема робочого ПВО, що складається з восьми сканерних марок, розташованих парами на відстані від 10 до 50 м.

Отримання координат сканерних марок у системі координат сканера проводиться шляхом їх сканування з максимальною роздільною здатністю. Після сканування програма обробки, використовуючи алгоритм, орієнтування на певний розмір марок, автоматично знаходить координати їх центрів. Точність визначення координат плоских марок для НЛС Leica становить близько 1 мм [59]

*Формування єдиної точкової моделі, використовуючи дані наземного лазерного сканування.* Для отримання єдиної точкової моделі за результатами

наземного лазерного сканування необхідно звести результати вимірювань в єдину систему координат. Для цього використовуються координати сканерних марок у зовнішній системі координат і системі координат сканера.

У програмі обробки в автоматичному або ручному режимі визначаються зв'язки між марками, координати яких визначені в обох системах координат. Наприклад, в ПО Leica Cyclone реалізований підхід, при якому зв'язки між марками визначаються в автоматичному режимі, з геометрії сузір'я. Результатом є таблиця, у якій представлені пари ідентичних марок і розбіжності між координатами марок в обох системах координат.

Оцінка точності положення марок, виміряних з використанням НЛС щодо зовнішньої системи координат, здійснюється за значеннями розбіжності координат марок в обох системах або помилок визначення лінійних і кутових елементів орієнтування.

### **3.3 Створення цифрових планів лінійних споруд на основі наземного лазерного сканування з метою подальшого моніторингу.**

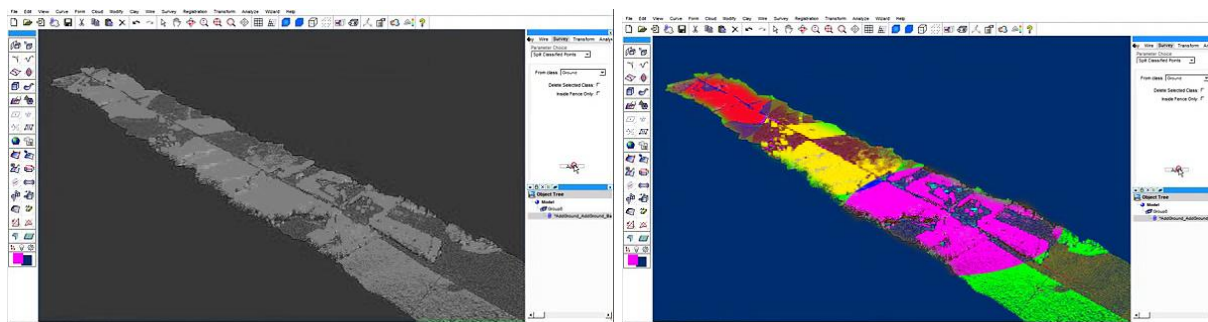
*Основні етапи.* Пропонована методика створення ЦП на основі даних наземного лазерного сканування включає наступні етапи:

- а) підготовка даних наземного лазерного сканування для створення ЦП;
- б) формування планової частини ЦП (векторизація точкової моделі);
- в) визначення висотних характеристик об'єктів і рельєфу;
- г) експорт векторної моделі в формат користувача;
- д) створення баз даних;
- е) оформлення ЦМ відповідно до вимог;
- ж) контроль точності ЦМ.

*Підготовка даних НЛС для створення цифрових планів лінійної споруди.* Програмні продукти, що використовуються при обробці даних наземного лазерного сканування, у випадках, коли виробниками обладнання та програмного забезпечення є різні фірми, як правило, не працюють напряму з вимірами,

отриманими «сторонніми» НЛС. Для роботи з ними необхідно виконати процедуру імпорту даних з «рідного» формату у внутрішній формат ПЗ. Всі програмні продукти сприймають файли текстового формату. Для реалізації даного способу необхідно перетворити вихідні сканерні дані в текстовий формат. Недоліками цього способу є значні витрати часу на перетворення форматів та імпорту даних, обмеження за розміром того чи іншого плану і неможливість використання при обробці деяких функцій програмного забезпечення (внаслідок довільної, неорганізованої структури даних). Результатом імпорту є об'єднаний план об'єкта, рисунок 3.5.

Однчасна робота з великою кількістю сканерних вимірів може бути ускладнена або унеможливлена у зв'язку з браком ресурсів комп'ютера або обмеженнями програмного забезпечення. Щоб уникнути таких складнощів, пропонується розбивати велику точкову модель на окремі тематичні блоки і виконувати векторизацію окремих блоків, після чого об'єднувати їх.



єдина кольорова схема

кожна станція пофарбована

Рис. 3.5 Об'єднана точкова модель

*Векторизація моделі.* Першим кроком створення ЦП за даними наземного лазерного сканування є задання площини, на яку будуть проєктуватися геометричні об'єкти - площині проєкції. Для планів такою площиною є площина ХУ системи координат, а позначки і висоти визначаються уздовж осі Z. При цьому площину проєкції необхідно розташовувати між точковою моделлю і точкою огляду.

Векторизація точкової моделі виконується за допомогою інструментів малювання на площині. У програмному забезпеченні Leica Cyclone у якості площини проєкції використовується відносна площина «Reference Plane», що

розташовується паралельно площини XY системи координат, а побудова лінійних майданчиків і точкових об'єктів здійснюється за допомогою інструментів малювання на площині «2D Drawing Tools». В інших програмних продуктах площину проєкції може визначатися завданням нової системи координат (наприклад, в AutoCAD).

Для виключення спотворень, викликаних перспективою, векторизація точкової моделі повинна здійснюватися в ортогональній проєкції. Ця функція реалізована у всіх програмних продуктах, призначених для тривимірного моделювання, у тому числі і в програмах обробки даних наземного лазерного сканування. Точка огляду, або напрям погляду оператора, що здійснює обробку, повинні бути перпендикулярні площині проєціювання. Оскільки площина проєкції для ЦП паралельна площині XY встановленої системи координат, векторизація моделі повинна здійснюватися при встановленому виді зверху [73, 102].

Важливою умовою векторизації точкової моделі є можливість незалежного створення двовимірних примітивів, тобто без прив'язки до точкової моделі [103]. Внаслідок випадкових помилок у вимірних відстанях, основною причиною яких є властивості поверхонь, що відображаються, вимірювання містять шумову складову. Візуально, на поверхні об'єктів це виражається в «пухкості» даних (тобто відсканована площина буде мати деяку товщину, залежну від ступеня шумової складової), а на кутах і гранях - у вигляді точок, які «висять у повітрі» (рисунок 3.6) [102].

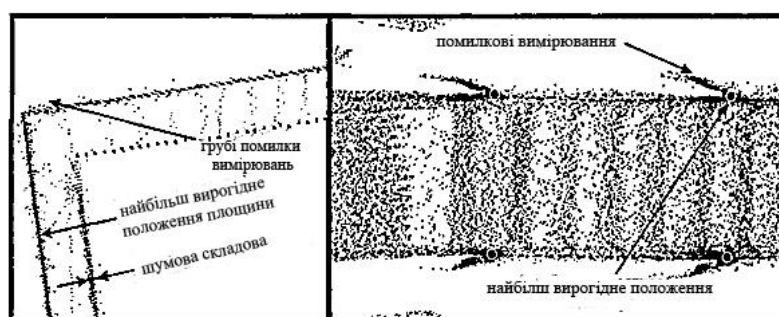


Рис 3.6 Шуми у вимірах, які викликані властивостями поверхонь

Для зменшення впливу шумів на точність ЦП векторизацію точкової моделі необхідно виконувати з умовою максимально рівномірного вписування об'єктів [58, 95].

Об'єкти ЦП за характером локалізації можна розділити на 3 типи: площинні, лінійні і точкові. Основними площинними об'єктами на лінійних спорудах є будівлі, споруди та різні майданчики. Основними лінійними об'єктами є трубопроводи, кабельні та електричні мережі, огорожі, елементи рельєфу, дороги, рослинність. Основними точковими об'єктами є обладнання на трубопроводах, освітлювальні щити, опори ліній електропередач (ЛЕП) і кабельних естакад, колодязі, свердловини, поодинокі дерева і чагарники [102].

Створення контурів об'єктів з лінійним і площинним характером локалізації виконується за допомогою полігонів (або замкнутих поліліній), ліній і поліліній. Приклади створення контурів деяких об'єктів за даними лазерного сканування представлені на рисунку 3.7.

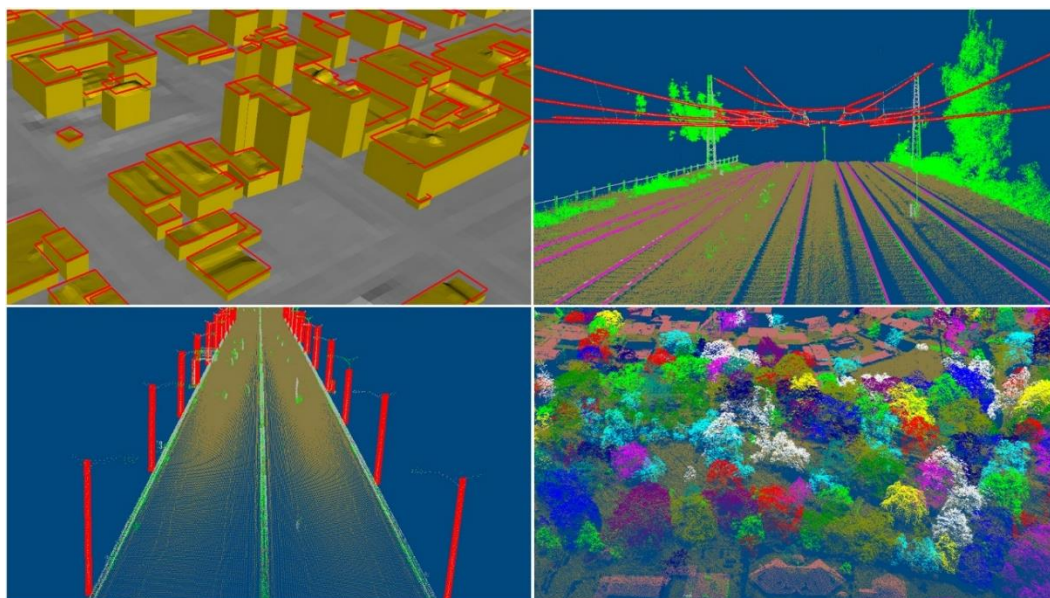


Рис. 3.7 Приклади складання різних об'єктів за даними лазерного сканування.

*Висотні характеристики лінійного об'єкту з даних сканування.* Висотна складова є невід'ємною частиною ЦП. Отримана в результаті векторизації плоска векторна модель не несе інформації про висотні характеристики об'єктів і рельєфу. Відмітки точок за даними лазерного сканування найбільш доцільно визначати шляхом побудови вертикального зрізу точкової моделі, що проходить



через шукану точку. Результатом даної операції буде профіль точкової моделі. Товщину зрізу необхідно підбирати таким чином, щоб отримуваний профіль дозволяв однозначно визначати позначку шуканої точки. Результатом даного етапу є набір точок з координатами Z.

*Експорт цифрової моделі у зручний формат для подальшого моніторингу об'єкту.* Після формування планової і висотної частин ЦП у форматі ПЗ, що використовується для векторизації точкової моделі, необхідно здійснити експорт отриманої моделі у формат програмного забезпечення, в якому буде представлений остаточний варіант ЦП, для подальшого редагування та приведення у відповідність вимогам та подальшим завданням. Для цього потрібна сумісність форматів експорту/імпорту обох використовуваних програм. Висотна частина плану, у вигляді точок з координатами X, Y, Z, експортується в текстовому форматі, в результаті чого, в програмі остаточного уявлення ЦП ці дані перетворюються на точкові об'єкти.

#### *Створення єдиної бази даних.*

Важливою складовою цифрових моделей є бази даних, які містять семантичну інформацію про об'єкти: призначення, матеріал, геометричні та інші характеристики. Основна семантична інформація збирається в ході складання абрисів, для чого додатково використовуються технологічні схеми та проектна документація [104]. Метричні дані необхідно отримувати за точковою моделлю. Наповнення баз даних семантичною інформацією може здійснюватися кількома способами, в залежності від використовуваного програмного забезпечення: безпосередньо в ході векторизації точкової моделі, виконується присвоєння об'єктам характеристики в текстовому вигляді, прив'язані до елементів плану, які потім експортуються до ГІС разом з векторними об'єктами; заповнення баз даних виконується після експорту векторної частини в ГІС з використанням абрисів, технологічних схем та інших матеріалів, зібраних в ході польових робіт.

Програмне забезпечення Leica Cyclone містить функції створення атрибутів векторних об'єктів («Annotations» - анотації) безпосередньо в процесі

векторизації. Кожному об'єкту присвоюється необмежена кількість атрибутів, які можуть редагуватися.

*Точність цифрових планів, що створені на основі наземного лазерного сканування.* Для контролю точності цифрових планів у дисертації визначено наступний порядок: у ході векторизації точкової моделі виконавцем виконується поточний контроль дотримання умови рівномірного вписування контурів і визначення відміток; після векторизації точкової моделі виконується вибірковий контроль іншим виконавцем; для остаточного контролю точності створення цифрового плану порівнюються результати контрольних вимірів на об'єкті та у ЦП.

### **3.4. Методика створення просторових тривимірних моделей лінійних інженерних споруд**

Етапи створення цифрових тривимірних моделей. Найбільш актуальною формою представлення тривимірних моделей є цифрові моделі, представлені у вигляді твердотільних об'єктів. Пропонована методика створення цифрових тривимірних моделей (ЦТМ) лінійних споруд включає наступні етапи: підготовка даних лазерного сканування для побудови ЦТМ; створення основних елементів ЦТМ (векторизація точкової моделі); експорт ЦТМ в користувальницький формат; контроль точності ЦТМ.

*Векторизація моделі.* Основний принцип створення ЦТМ лінійних споруд полягає у формуванні загальної моделі з окремих елементів. При цьому необхідно дотримуватися умови максимальної відповідності цифрової тривимірної копії реальному об'єкту і точкової моделі.

Більшість програмних продуктів, що мають функції тривимірного моделювання на основі даних наземного лазерного сканування, володіють стандартним набором функцій моделювання:

- моделювання за допомогою стандартних твердотільних примітивів. Для цього в ПЗ закладені моделі основних геометричних примітивів, таких як: циліндр, паралелепіпед, конус (усічений конус), тор, сфера, відвід, геометричні

параметри яких змінюються користувачем в залежності від геометричних параметрів модельованих деталей;

- моделювання за допомогою тривимірних об'єктів, що не мають внутрішнього об'єму (що не є твердими тілами). Такими об'єктами можуть бути лінія, полілінія, коло, сплайн, полігон та точка;

- моделювання за допомогою твердотільних об'єктів складної форми, закладених в ПЗ або створених самостійно. Одним із способів створення подібних об'єктів є видавлювання. У цьому випадку, спочатку формується ескіз профілю, створюваний на довільній площині за допомогою замкнутої полілінії, з якої формується полігон.

Твердотільні об'єкти складної форми також можуть формуватися з декількох твердих тіл шляхом об'єднання, віднімання або перетину. Чим більше в ПЗ закладено можливостей щодо формування твердотільних об'єктів довільної форми, тим більше існує можливостей для моделювання реальних об'єктів;

- створення триангуляційних мереж для опису поверхонь складної форми.

ЦМР створюється у вигляді пласкої триангуляційної мережі. Основним завданням, що вирішується в ході створення ЦМР, є відбракування точок, що не належать поверхні землі. Дана процедура може виконуватися вручну, на що витрачається значна кількість часу. Деякі програмні продукти містять вбудовані функції фільтрації точок. У ПЗ Real - Works Survey, розробленому фірмою Trimble, існує спеціальна функція топографічної фільтрації. Суть функції полягає в розбитті точкової моделі на квадрати заданого розміру, в кожному з яких залишаються точки з найменшими позначками.

Застосування автоматизованих способів пошуку точок, які належать поверхні землі, значно скорочує час, що витрачається на створення ЦМР. Аналіз методів створення ЦМР, виконаний у роботі [105], показав, що точність цифрових моделей рельєфу, побудованих за даними наземного лазерного сканування, становить порядку 2 мм.

Отримана в ході обробки даних наземного лазерного сканування ЦТМ буде представлена у форматі ПЗ, у якому вона створювалася. Всі програмні продукти

обробки даних наземного лазерного сканування дозволяють здійснювати експорт в універсальні формати САД, такі, наприклад, як dxf. ПО Leica Cyclone, наприклад, підтримує прямий експорт тривимірної моделі в формат таких поширених САД, як AutoCAD і MicroStation. У ході подальшої роботи з тривимірними моделями в окремих випадках необхідно виконати її редагування. Це пов'язано з тим, що ПЗ обробки даних наземного лазерного сканування не є спеціалізованим програмним продуктом для подальшої роботи з тривимірними моделями. Лінійна споруда, побудована в такому ПЗ, складатиметься з безлічі окремих елементів, тоді як у спеціалізованих програмах він є цілісним об'єктом. Також не підтримуються формати бібліотек складних технологічних елементів. Якщо необхідно створити базу даних зі специфікаціями окремих елементів тривимірної моделі, то це також робиться тільки у визначеному для користувача форматі.

### **3.5 Додаткові фактори, що впливають на точність результатів вимірювань наземного лазерного сканера**

Виходячи із загального аналізу вимірювальних блоків НЛС, можна сказати, що на точність визначення координат точок лазерних відображень впливають такі основні чинники [106]:

- характеристики інструмента;
- характеристики об'єкта вимірювання;
- навколишнє середовище, у якому проводяться вимірювання.

Для обліку зазначених факторів і їх кількісної оцінки існує два основні підходи. Сутність першого полягає в роздільному оцінюванні впливу кожного фактора. Другий підхід заснований на комплексному обліку впливу всіх факторів [107].

За допомогою першого підходу можна усунути основну (більшу) частину випадкових і систематичних помилок з результатів вимірювання НЛС. Даний спосіб вирізняється найбільшою простотою в розрахунках і реалізації, однак

вимагає розробки або адаптації існуючих методик виконання тестових вимірювань стосовно до НЛС.

У комплексному підході використовують різні поліноміальні моделі розрахунку, які дозволяють усунути всі типи помилок. Даний підхід є найбільш універсальним, однак виділяється складністю процесу розрахунку, що вимагає високої кваліфікації виконавця робіт не тільки в області геодезичних дисциплін, а й таких, як фізика, оптика, математика і статистика.

Сукупність факторів, що впливають на НЛС, описано і класифіковано в розділі 2.3.

Зважаючи на конструктивні і фізичні можливості, будь-який лазерний випромінювач вимагає певної стабільної робочої температури дії, тому виробники НЛС постачають лазери системою кліматичного контролю, що дозволяє підтримувати робочу температуру всередині приладу [108]. Очевидно, що з моменту першого включення лазерного сканера необхідно почекати деякий час, в процесі якого відбудеться прогрів блоку лазерного далекоміра до робочої температури. Дана процедура особливо важлива при виконанні робіт, пов'язаних з досягненням найвищої точності вимірювань НЛС. Однак жодних рекомендацій від виробників даних приладів не надходить, звідси виникає актуальність визначення залежності стабільності роботи приладу від температури блоку лазерного далекоміра [108, 109].

Для детальнішого дослідження та визначення похибок, які найбільш впливають на вимірювання блоку лазерного світлодалекоміра, необхідно провести аналіз процесу поширення випромінювання в просторі, а також дати поняття відбивної здатності (альbedo) її властивостей для різних поверхонь [110].

Альbedo (лат. *Albus* - білий) - характеристика відбивної здатності поверхні [110]. Від величини альbedo залежить яскравість, насиченість, світлотіньове відношення та інші колористичні властивості матеріалів [111,112]. Умовно можна виділити три види відображень (розсіювання) (рисунок 3.8) [113]:

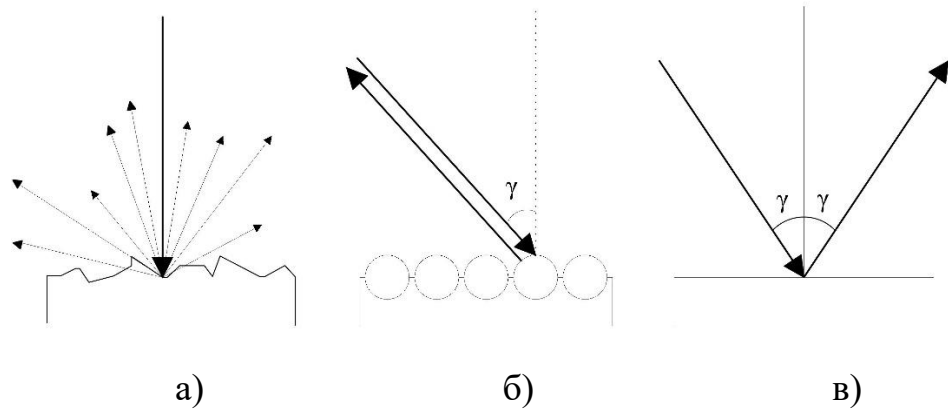


Рис. 3.8 Види відбиття від різних поверхонь: а) дифузне відбиття; б) дзеркальне відбиття; в) повне відбиття.

Очевидно, що для НЛС основним типом відображень є дифузне розсіювання (відображення), закон Ламберта. У дзеркальному відображенні, зокрема для коротких відстаней, сигнал дуже високої інтенсивності повертається на приймач, і це може призвести до грубих погрешностей виміру відстаней до об'єкта [112].

Найбільш близькі до дифузного відбиття мають матові шорсткі поверхні гіпсу, окису магнію, сірчаноокислого барію і ін.; з мутних середовищ - деякі типи хмар і молочного скла; серед самосвітних випромінювачів - абсолютно чорне тіло, порошкоподібні люмінофори. Сильне відхилення від закону Ламберта спостерігається для полірованих поверхонь, так як для них випромінювання при куті  $\phi$  буде більшим, ніж в напрямку, нормальному до поверхні.

Наприклад, згідно з законом Ламберта, інтенсивність відбитого сигналу зменшиться при куті падіння  $45^\circ$  на 70% і відповідно з цим зменшиться дальність дії НЛС:

$$l_{45^\circ} = l_0 \cos^2 45^\circ = 0,71 \quad (3.4)$$

Аналіз відбивної здатності для монохроматичного випромінювання і таких природних для інженерних об'єктів матеріалів, як: бетон, метал, дерево - показав, що, в залежності від довжини хвилі лазерного променя і кольору об'єкта, формується ставлення спектрального коефіцієнта відбиття між прийнятим і відправленим сигналом лазерного променя. Шорсткість поверхні і кут падіння при цьому не розглядаються; важливо, яким чином певний колір (альbedo) об'єкта поглинає світло. Поглинальна здатність значною мірою залежить від стану

поверхні. Нерівності поверхні приводили до збільшення поглинання. А поліровка зменшувала поглинання випромінювання і збільшувала відбивну здатність матеріалу [108]. У даному випадку поглинальна здатність досліджуваних матеріалів розташована в наступному порядку: бетон, дерево, метал - і зменшується в цьому ряді. Звідси випливає висновок, що з досліджуваних матеріалів метал має найвищий коефіцієнт відбиття - і, як наслідок, знижується похибка вимірювання відстаней до подібних об'єктів [115, 116].

Поширення лазерного імпульсу блоку світлодалекоміра НЛС в просторі є дуже складним процесом, залежним від безлічі факторів. У загальному вигляді функція вхідного сигналу може бути описана відомою формулою [110]:

$$f_{\text{вих}}(t) = \int_{-\Delta\varphi}^{\Delta\varphi} \int_{-\Delta\nu}^{\Delta\nu} \left[ f_{\text{вих}} \left( t - \frac{2D(\varphi,\nu)}{c} \right) K_{\text{отр}}(\varphi,\nu) \psi(\varphi,\nu) \right] d\varphi \cdot d\nu + \eta(t) \quad (3.5)$$

де  $f_{\text{вих}}(t)$  – функція вихідного сигналу;  $D(\varphi,\nu)$  – функція, що описує зміну відстані від НЛС до ТЛВ (точки лазерних відображень);  $K_{\text{отр}}(\varphi,\nu)$  – функція, що характеризує коефіцієнт відбиття сигналу лазера від різних ТЛВ;  $\Psi(\varphi,\nu)$  – функція, що описує розподіл сигналу у просторі, в тому числі величину розбіжності лазерного променя(t) – функція, яка характеризує інтерференцію (шуми).

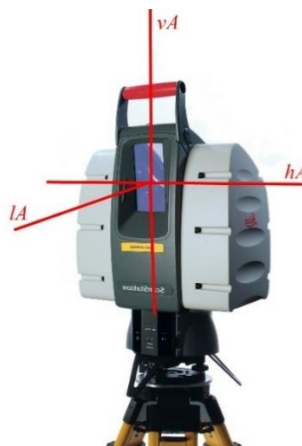
Використовуючи формулу (3.5), можливо виконати наближене моделювання загального процесу поширення лазерного променя НЛС і вивчити вплив деяких характерних факторів. Однак у реальних умовах зробити однозначні висновки про точність вимірювань НЛС того чи іншого об'єкта не видається можливим через складнощі врахування всіх факторів, що мають вплив [117].

Не менш важливим фактором для досягнення більш достовірних даних НЛС буде його калібрування. Зазвичай користувач НЛС та іншим геодезичним обладнанням посилається на документи метрологічних лабораторій, тобто точність приладу та його допустима погрішність написана в свідоцтві про перевірку. Але ці цифри близькі до максимально допустимих характеристик; і, виконавши просту калібровку приладу, можна значно підвищити точність при

виконанні робіт. Тому автором запропоновано методику зі знаходження та використання поправки до результатів вимірювань.

Загалом в НЛС використовується полярна система вимірювання та має схожість з тахеометром. НЛС також має три осі: вертикальна, горизонтальна та оптична вісь (лазер). Вертикальна вісь забезпечує поворот у горизонті інструменту для вимірювань горизонтальних кутів. Але через механічні з'єднання приладу все одно виникають похибки осей. Крім того, існують так звані розгойдування вертикальної осі і коливання горизонтальної осі, викликані варіаціями осей під час поворотів. Виявлення та усунення помилок осей має важливе значення для вимірювань, впливають на кутові вимірювання. Також велику роль відіграють компенсатори, що послаблюють вплив не ідеального горизонтування приладу. При ідеальних умовах виготовлення НЛС виробником горизонтальна вісь повинна бути перпендикулярна вертикальній ( $hA \perp vA$ ), вісь лазера перпендикулярна до горизонтальної осі ( $lA \perp vA$ ), осі зображені на рисунку 3.9. Недотримання цих значень призведе до появи наступних помилок (рис. 3.10):

- помилка осі нахилу ( $i$ ). Це кут між віссю рухомого дзеркала та нормаллю, що проходить через вісь обертання сканера;
- колімаційна помилка ( $c$ ). Це кут між оптичною і геометричною віссю;
- помилка ексцентриситету ( $e$ ). Це лінійна величина, яка є радіусом кола точки  $M$ , що відповідає центру перетину осей сканера. Ця похибка виникає за рахунок обертання верхньої частина сканера [118].



- Рис. 3.9 Осі наземного лазерного сканера.



Поправка  $f_a$  за вплив помилок (с) і (і), як функції кута нахилу  $\zeta$ , може бути описана формулою 3.6.

$$f_a = \arctan \left( \frac{\cos i \cdot \tan c}{\sin \zeta} + \frac{\sin i}{\tan \zeta} \right) \quad (3.6)$$

Поправка  $f_b$  за вплив помилку (е) напрямку ексцентриситету осі дорівнює:

$$f_b = \frac{e}{s} \quad (3.7)$$

де:  $s$  – виміряна відстань до об'єкта [119].

Сума цих величин і буде загальною похибкою за вплив осей НЛС.

$$f = f_a + f_b = \arctan \left( \frac{\cos i \cdot \tan c}{\sin \zeta} + \frac{\sin i}{\tan \zeta} \right) + \frac{e}{s} \quad (3.8)$$

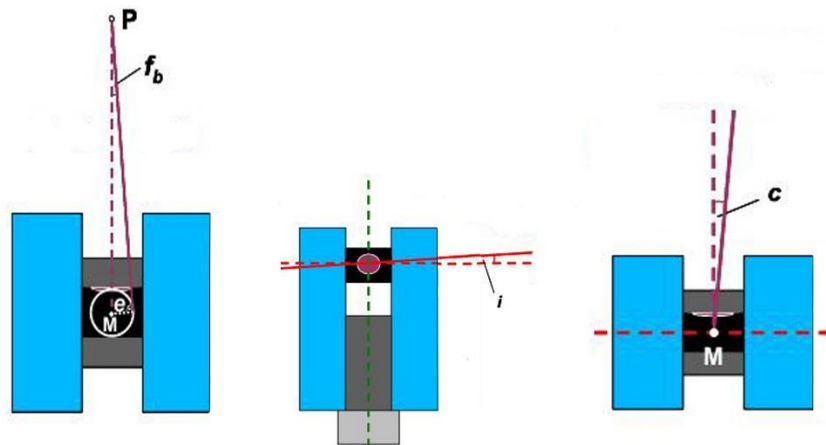


Рис. 3.10 Похибки осей НЛС

Оскільки значення  $f$  та  $\zeta$  можна визначити за допомогою рівнянь, наведених у [118], вищезазначене рівняння містить три невідомі параметри, а саме: (с), (і) та (е). Таким чином, вирішення цього рівняння математично обґрунтує похибки осей лазера. Для теоретичного підтвердження цих формул необхідно вибрати об'єкт більш ніж з трьома марками для сканування, щоб створити достатньо надійну конфігурацію для визначення похибок осей використовуючи метод найменших квадратів. Так, в ході теоретичного експерименту, де використовувався сканер Z+F Imager 5003, були встановлені наступні помилки осей НЛС: помилка осі нахилу (і)=-0,1" (стандартне відхилення  $\sigma=0,02$ ""); колімаційна помилка (с)=0,12" (стандартне відхилення  $\sigma=0,01$ ""); помилка ексцентриситету (е)=1,17 мм (стандартне відхилення  $\sigma=0,26$  мм) [120]. Згідно з характеристиками та дослідженням точності цього сканера, він здатен вимірювати відстань з точністю

$\pm 3,1\text{мм}/10\text{м}$ , роздільна здатність сканування по вертикалі  $1'05''$ , по горизонталі  $36''$ , точність вимірювання кутів  $25''$  [121].

У порівнянні з помилками осей тахеометра, помилки осей НЛС в декілька разів більша. Ці помилки викликані в основному за рахунок обмежень при механічному виготовленні. Вісі не виготовляються в якості високоточних осей, і це пов'язано, в першу чергу, з економічними причинами. Проте виявлення помилок осей дозволяє вводити поправки в процесі пост-обробки даних лазерного сканування. Крім того, вплив помилок осей при вимірах зведено до мінімуму. Таким чином, при врахуванні помилок осей сканера можна не на багато, але підвищити точність отримуваної моделі, і отримати якісніші дані для вирішення різнобічних завдань.

Що стосується вимірювання кутів наземним лазерним сканером, то точність показників впливає на точність вимірювання всієї системи лазерного сканування в цілому. Систему вимірювання кута можна поділити наступним чином: горизонтальні кутові вимірювання та вертикальні кутові вимірювання.

На відміну від тахеометра, наземний лазерний сканер не може безпосередньо вимірювати кути і відстані до заздалегідь визначеної цілі. Для більшості наземних лазерних сканерів, лазерний промінь не може бути скоригований на ціль. Таким чином, кутові вимірювання повинні бути отримані з цільових показників, які використовуються в сканерній декартовій системі координат. Загалом, для проведення цього експерименту з досліджень кутових вимірювань були використані марки-мішені відомої форми. Центральні точки марок були скориговані та розраховані. Нарешті, полярні координати були отримані з декартових координат, що відповідали центру марки. Проте слід зазначити, що якість визначення центру марки залежить від багатьох факторів. Тому дослідження системи вимірювання кута наземного лазерного сканера, з точки зору точності, повинні розглядатися як наближені. Набір вимірювань проводився сканером Leica ScanStation 2.

Оскільки НЛС не можливо точно сфокусувати на одну й ту саму точку, було прийнято рішення використовувати цілі (рис. 3.11а), з яких можна отримати

контрольні точки. Кулі були встановлено в якості еталонних цілей і сканувались за допомогою Leica Scan Station 2. Відстань між сканером і опорною ціллю дорівнювала близько 15 м. Після цього центральна точка сфери (контрольна точка) визначалась, як центр вписаного шару відомої форми у хмарину точок в автоматичному режимі ПЗ (рис. 3.11б).

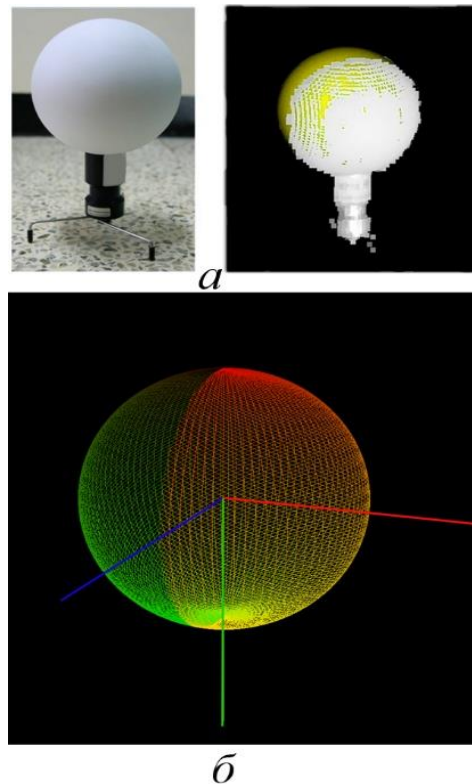


Рис. 3.11 Сфера, що сканувалась

Для дослідження точності вимірювання кута проведений польовий експеримент, де марки-відбивачі встановлено по колу від центру стояння сканера під різними кутами (рис. 3.12). Марки представляли собою опорні цілі, їх положення задалегідь визначено тахеометром South NTS-352R, що має точність вимірювання кутів 2". Відстань від марок до сканера склала близько 8,5 м. Координати контрольних цільових показників були виміряні за допомогою тахеометра. Після такого виміру, точність «еталонного» центру марки становила менше 1 мм для горизонтального положення і висоти. Координати опорних цілей були використані в якості номінальних значень для подальшого розрахунку. Після чого було проведено 10 сканувань, з максимальним кроком сканування роздільної здатності по горизонталі та вертикалі. Отримана в результаті сканувань хмара 3D-

точок була використана для подальших обчислень. Полярні координати, такі як кути і відстані були виведені з декартових координат центру точок марок.

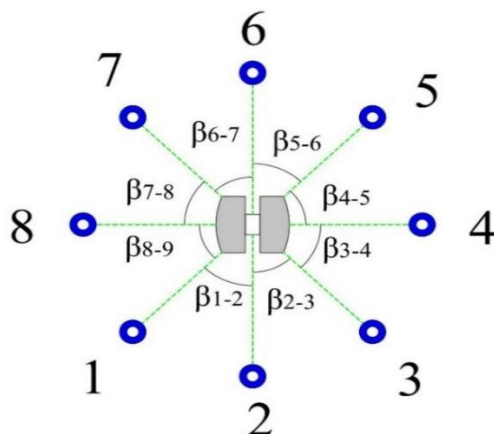


Рис. 3.12 Схема сканування контрольних марок.

Для розрахунку точності горизонтальних кутових вимірювань кути  $\beta_{i,n}$  були виведені з 3D-хмари точок відповідно до формули 3.9.

$$\beta_{i,n} = \arctan\left(\frac{\Delta x_i}{\Delta y_i}\right) - \arctan\left(\frac{\Delta x_n}{\Delta y_n}\right) \quad (3.9)$$

де  $i,n$  – номери марок

Горизонтальна точність вимірювання кута визначається як різниця між вимірюваними кутами  $\beta_{i,n}$  і номінальними значеннями на основі еталонних координат, що були виміряні тахеометром. Рисунок 3.13 являє собою вид збоку сканера під час установки. І, нарешті, вертикальний кут  $\gamma_i$  розраховувався за умови якісного горизонтування сканера за формулою 3.10.

$$\gamma_i = \arcsin\left(\frac{\Delta z_i}{\sqrt{\Delta x_i^2 + \Delta y_i^2 + \Delta z_i^2}}\right) \quad (3.10)$$

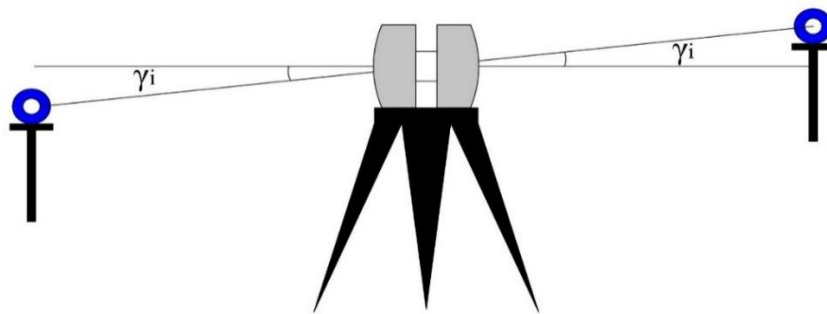


Рис. 3.13 Схема вимірювань вертикального кута

Після вимірювань, виконано розрахунки, які представлені в таблиці 3.2, результати визначення точності вимірювання кута для Leica Scanstation 2. Стандартні відхилення горизонтального кута  $\sigma_{\Gamma}$  і вертикального  $\sigma_{\text{В}}$ , які відповідають точності вимірювання кута. Дані відповідають одному скануванню восьми опорних цілей. Кутіві похибки позначені як  $m_{\Gamma}$  і  $m_{\text{В}}$  і відповідають середнім значенням абсолютних значень кутівих зсувів для кожної опорної цілі.

Таблиця 3.2

## Кутіві похибки сканера

№ сканування	$\sigma_{\text{В}}, "$	$\sigma_{\Gamma}, "$	$m_{\text{В}}, "$	$m_{\Gamma}, "$
1	5,8	3,2	$\pm 5,5$	$\pm 4,0$
2	7,3	5,9	$\pm 7,4$	$\pm 5,9$
3	6,2	6,8	$\pm 5,1$	$\pm 6,0$
4	2,8	5,3	$\pm 4,6$	$\pm 4,5$
5	5,9	5,9	$\pm 6,1$	$\pm 5,6$
6	6,3	6,3	$\pm 6,8$	$\pm 6,4$
7	5,4	5,1	$\pm 7,3$	$\pm 5,7$
8	5,9	4,3	$\pm 6,2$	$\pm 6,6$
9	6,5	4,5	$\pm 7,5$	$\pm 4,9$
10	6,6	5,1	$\pm 6,9$	$\pm 5,8$
середнє	5,9	5,2	6,3	5,5

Для НЛС можуть використовуватися марки різноманітної форми для орієнтування і зшивки сканів. Також можуть використовуватися як цілі сферичної форми, так і плоскої. Як правило, кожен виробник для своїх наземних лазерних сканерів рекомендує свої власні марки.

З точки зору сканування, сферичні марки є кращими в якості еталонних цілей замість плоских. Регулювання центральної точки для плоских цілей, як правило, визначається на підставі значення інтенсивності відбитого лазерного променя [122]. Крім того, сфера-ціль виглядає ідентично з різних точок сканування. Крім того, центральна її точка є похідною від геометричної інформації 3D-хмари точок. Проте кут падіння лазерного променя суттєво зменшується у напрямку до межі сфери. Низька здатність вимагає більшого розміру еталонних марок-цілей. Таким чином, число точок є вирішальним фактором для моделювання еталонних цілей, і їх кількість повинна розглядатися в якості додаткового параметра для вибору розміру цілей [123].

Число точок, які представляють собою сферу-ціль після сканування за допомогою наземного лазерного сканера сильно корелюють з відстанню від сканера до цілі [124]. Логічно припустити, що залежність кількості точок від відстані буде прямолінійною. Для простоти розрахунків візьмемо марку правильної геометричної форми з однаковими сторонами і розташовану як перпендикулярна площина відносно осі лазеру. Тоді математично це буде мати такий вигляд:

$$n = \left( \frac{a}{\sin\alpha \cdot S} + 1 \right)^2 \quad (3.11)$$

де:  $n$  – кількість точок, що потрапить на поверхню марки;  $a$  – розмір марки;  $\alpha$  – кутовий крок сканування;  $S$  – відстань до об'єкта.

Для підтвердження цієї залежності був виконаний польовий експеримент, де одна й та сама марка-мішень сканувалась на різних відстанях з однаковою розподільчою здатністю. Отриманий результат, представлений на рисунку 3.14, являє собою залежність між числом точок і відстанню до сканера. Сфера-мішень була відсканована НЛС Leica ScanStation 2 з роздільною здатністю 45". Стандартні відхилення, що були розраховані за відомим діаметром з 3D-хмари точок, відображені на рисунку 3.15. Марка пересувалася з 5 до 140 метрів і кожні 5 метрів сканувалася.

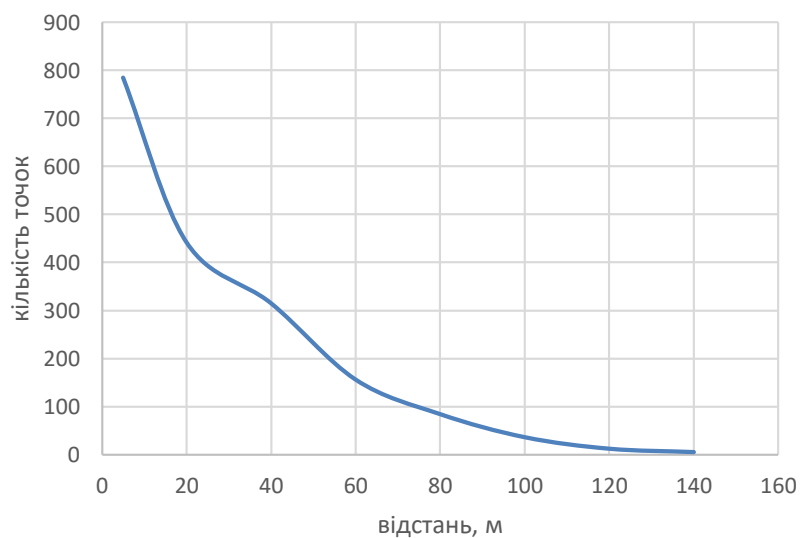


Рис. 3.14 Залежність кількості точок від відстані

При скануванні використано марку діаметром 15 см. Проте слід зазначити, що стандартне відхилення ( $1\sigma$ ) збільшується до 18 мм.

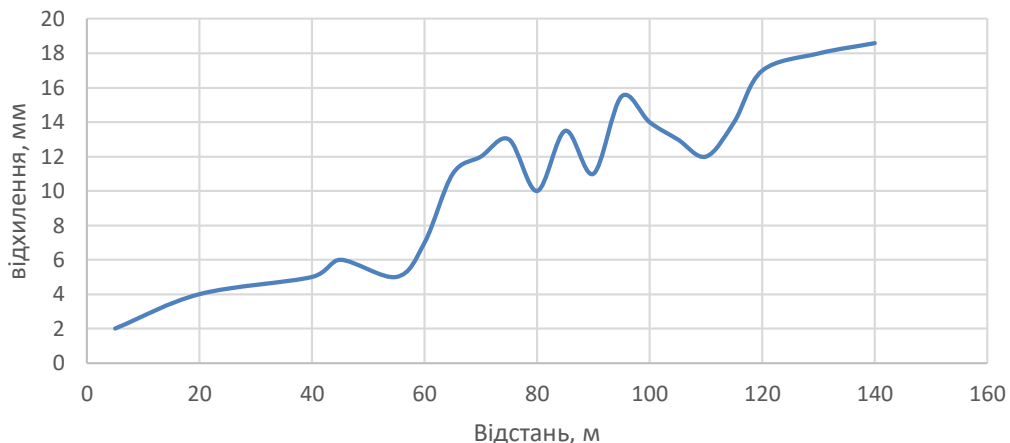


Рис. 3.15 Стандартне відхилення

З рисунку 3.19 видно, що відхилення значно зростає після 60 метрів і стрімко росте після 110 метрів. Виходячи з цього рекомендується при точних спостереженнях, як-от визначення деформацій на лінійних спорудах, вести сканування на відстанях до 60 метрів.

Можна зробити висновок, що сферична ціль якісніша при виявленні помилок під час побудов, зшиття сканів. Але для досягнення якісних результатів рекомендовано використовувати відстань сканування 50-60 метрів.

Залежність отриманих даних від тривалості прогріву сканера була доведена в ході експерименту. Для його виконання було розбито по колу чотири базиси, які розташовано через 90 градусів відносно двох сусідніх. Схема полігону показана на рисунку 3.16.

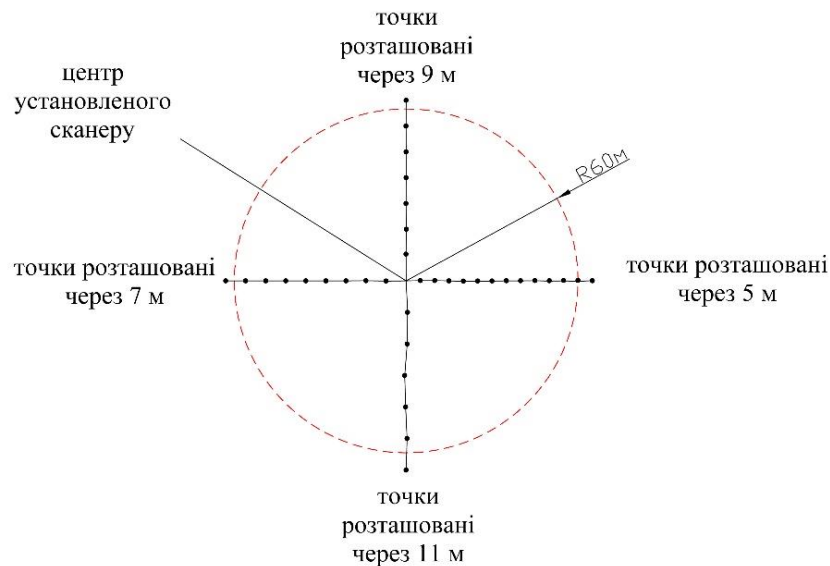


Рис. 3.16 Схема полігону для дослідження

Так як вертикальне поле зору сканера, на якому проводились дослідження, - 270 градусів, було доведено, що в залежності від висоти встановлення, яка у більшості випадків склала від 1,5 до 2,0 метрів, діаметр «мертвої» зони від центра сканера становить 3-4 метра. Керуючись цим, було обрано відстань, на якій закріплений перший репер – 5 метрів. Полігон для досліджень має чотири профільні лінії; на першій реperi закріплені через 5 метрів, на другій через 7, на третій через 9 і на четвертій через 11 метрів. У попередніх розділах роботи встановлено, що оптимальною відстанню для знімання об'єкту при визначенні його просторового положення доцільно вважати довжину променю 50-70 метрів. Саме тому реperi на профільній лінії закріплені на максимальній відстані, приблизно рівній 60-ти метрів.

Планові координати кожного репера встановлені двічі - за допомогою тахеометра South NTS-352R та за допомогою сканера Leica ScanStation 2. Висотні відмітки визначались також двічі за допомогою вищезгаданого сканера та нівеліра Topcon AT-G2. Результати отриманих досліджень представлені нижче у вигляді порівняльних таблиць та графіків.

Так як представлення всіх даних на аркуші являє собою доволі громіздку форму, було вирішено репрезентувати дані за двома лініями, на котрих реperi закладені на мінімальній і максимальних відстанях один від одного, відповідно



через 5 та 11 метрів. Отримані координати демонструються в таблицях 3.3 та 3.4. Графіки представлені у додатку А.

Проаналізувавши складені графіки, констатуємо, що після прогріву сканера 15-20, хвилин лінійна крива за цими показниками стає близькою до горизонтального положення, що свідчить про менший діапазон розходження результатів. Так лінійні крива, яка характеризує показники отриманих даних після прогріву наземного лазерного сканеру в 20 хвилин, виділена потовщеною лінією для швидшого її знаходження та більш зручного читання графіку.

Таблиця 3.3

## Координати реперів профільної лінії, закладеної через 11 метрів

№ репера	П клас нів-ння	тахеометр		сканер без прогріву			5 хвилин		
		X	Y	H	X	Y	H	X	Y
1	100.959	548.014	946.582	100.959	548.010	946.580	100.959	548.010	946.580
2	101.023	526.017	947.071	101.013	526.008	947.061	947.062	947.062	947.064
3	101.156	526.003	946.936	101.164	526.012	946.944	946.944	946.943	946.930
4	101.236	515.018	946.084	101.242	515.025	946.079	946.091	946.090	946.089
5	101.695	504.013	946.390	101.686	504.007	946.397	946.382	946.383	946.396
6	101.743	493.012	946.891	101.748	493.017	946.888	946.886	946.882	946.884
7	101.888	482.014	946.582	101.881	482.017	946.580	946.575	946.590	946.578

Продовження таблиці 3.3

№ репера	10 хвилин			15 хвилин			20 хвилин		
	H	X	Y	H	X	Y	H	X	Y
1	100.959	548.010	946.580	100.959	548.010	946.580	100.959	548.010	946.580
2	947.064	947.066	947.065	947.076	947.067	947.067	947.076	947.067	947.073
3	946.942	946.933	946.943	946.932	946.940	946.940	946.932	946.938	946.932
4	946.088	946.088	946.089	946.088	946.079	946.089	946.085	946.088	946.081
5	946.385	946.395	946.385	946.395	946.384	946.392	946.386	946.387	946.393
6	946.896	946.885	946.895	946.889	946.894	946.887	946.893	946.887	946.893
7	946.578	946.587	946.578	946.579	946.58	946.579	946.580	946.584	946.579

Таблиця 3.4

## Координати реперів профільної лінії, закладеної через 5 метрів

№ репера	II клас нів-ння	тахеометр		сканер без прогріву			5 хвилин			10 хвилин			15 хвилин			20 хвилин		
		X	Y	H	X	Y	H	X	Y	H	X	Y	H	X	Y	H	X	Y
1	100.959	548.014	946.582	100.959	548.014	946.582	100.959	548.014	946.582	100.959	548.014	946.582	100.959	548.014	946.582	100.959	548.014	946.582
2	101.345	548.102	951.582	101.356	548.096	951.574	101.355	548.111	951.574	101.351	548.094	951.576	101.350	548.095	951.586	101.349	548.100	951.585
3	101.325	548.083	956.582	101.316	548.090	956.589	101.317	548.076	956.578	101.331	548.077	956.574	101.320	548.079	956.576	101.319	548.078	956.577
4	101.456	548.014	961.582	101.462	548.023	961.586	101.450	548.022	961.573	101.463	548.018	961.574	101.462	548.021	961.577	101.46	548.017	961.579
5	101.763	547.906	966.582	101.754	547.900	966.574	101.756	547.911	966.588	101.769	547.910	966.577	101.759	547.911	966.574	101.758	547.911	966.578
6	101.365	547.977	971.611	101.358	547.970	971.605	101.373	547.984	971.621	101.357	547.983	971.615	101.359	547.983	971.617	101.367	547.982	971.616
7	101.588	547.971	976.582	101.580	547.98	976.577	101.581	547.977	976.577	101.582	547.975	976.577	101.581	547.976	976.575	101.583	547.975	976.580
8	101.366	548.022	981.582	101.373	548.014	981.589	101.373	548.016	981.572	101.360	548.017	981.574	101.370	548.016	981.578	101.373	548.017	981.578
9	101.954	548.005	986.582	101.961	547.998	986.576	101.960	547.996	986.573	101.958	548.000	986.573	101.959	547.998	986.577	101.956	547.998	986.577
10	101.327	548.039	991.582	101.319	548.030	991.574	101.321	548.033	991.574	101.321	548.033	991.577	101.322	548.034	991.576	101.323	548.034	991.579
11	101.472	547.968	996.582	101.465	547.963	996.574	101.477	547.974	996.587	101.480	547.963	996.589	101.475	547.964	996.587	101.476	547.965	996.588
12	101.354	548.014	1001.582	101.364	548.006	1001.589	101.362	548.021	1001.588	101.358	548.018	1001.586	101.350	548.019	1001.589	101.361	548.019	1001.587
13	101.675	547.901	1006.582	101.666	547.912	1006.573	101.681	547.894	1006.576	101.671	547.894	1006.574	101.671	547.898	1006.578	101.671	547.898	1006.58
14	101.547	548.072	1011.629	101.539	548.062	1011.620	101.537	548.066	1011.621	101.541	548.066	1011.624	101.541	548.076	1011.624	101.542	548.068	1011.624

Виходячи з аналізу факторів, що впливають на точність вимірів НЛС і їх процесів виникнення, а також враховуючи складність процесу математичного моделювання лазерного сканування конкретних інженерних об'єктів, пропонується для досягнення цілей і завдань даної роботи виконати теоретичну розробку методики експериментальної оцінки точності НЛС для кожного фактору, а також виконати на основі даної методики практичні дослідження з метою виявлення закономірностей впливу того чи іншого фактору на точність отримуваних вимірів НЛС.

### **Висновки до розділу 3**

У розділі узагальнені відомості про методики визначання деформацій на лінійних інженерних об'єктах і наводяться основні вимоги до їх точності. Про виконану роботу у розділі можна зробити наступні висновки:

1. На основі виконаних експериментальних і виробничих досліджень запропонована методика зйомки лінійних інженерних об'єктів з використанням наземних лазерних сканерів, що включає створення планово-висотного обґрунтування, вибір кроку сканування і місць положення сканера на станції. Розроблено алгоритм дій на кожній сканерній станції, що дозволяє оптимізувати роботу кожного члена бригади.
2. Виконано аналіз факторів, які мають вплив на кінцеві результати даних, що отримані з наземного лазерного сканування, та запропоновані дії зі зменшення їх впливу. Розраховані орієнтовні кутові помилки НЛС, стандартні відхилення зроблених вимірів, що дозволило виявити оптимальне плече сканування для моніторингу деформаційних процесів лінійних споруд, яке склало 40-60 м.
3. Встановлені наступні залежності: зміна кутового кроку сканування від відстані до об'єкту; кількості точок від відстані до об'єкту; висоти сканера від лінійного кроку сканування.

4. Запропоновано використання цифрових планів для подальшого застосування їх з метою моніторингу зміни положення твердого покриття автомобільної дороги у часі та просторі.
5. Розроблена послідовність дій на кожній сканерній станції, що дозволяє оптимізувати час роботи та зменшити трудовитрати під час виконання зйомки в цілому на 15-20%. При використанні даної послідовності дій час на знімання дорожнього одягу довжиною 1200 м скоротилася з 20 годин до 15 годин.
6. Експериментально встановлено залежність прогріву сканера на точність вимірювань. Дано рекомендації з необхідності прогріву сканера перед початком сканування об'єкта протягом 15-20 хвилин.

## **4. ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ ЛАЗЕРНОГО СКАНЕРА ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ДЕФОРМАЦІЙ ЛІНІЙНИХ ІНЖЕНЕРНИХ СПОРУД ТА ЇХ ПОДАЛЬШОГО МОНІТОРИНГУ**

Використання НЛС може дозволити уникнути деяких недоліків класичних методів визначення деформацій об'єктів. Одним з головних з них є недостатня кількість інформації про положення окремих частин об'єкта, у даному випадку лінійних інженерних споруд.

Перевагою НЛС є зменшення інтенсивності праці та посилення ефективності роботи. Наземним сканером можна провести деформаційний моніторинг значної площі порівняно з класичними методами, що демонструє зручність і перевагу.

### **4.1 Використання наземного лазерного сканера для моніторингу лінійної споруди**

Роботи з моніторингу лінійної споруди виконані в рамках договору №2081 від 06.05.2011 р. Знімальні роботи були проведені із застосуванням наземного лазерного сканера Leica scan station 2. Бригада, яка здійснювала наземне лазерне сканування, була забезпечена наступним обладнанням: НЛС - 1 шт; штатив - 2 шт; ноутбук - 1 шт; електронний тахеометр Leica TCR405 - 1 шт; комплект супутникових приймачів Leica GPS 1200; комплект акумуляторів - 3 шт; світлоповертаючі марки - 8 шт.

За об'єкт зйомки із застосуванням наземного лазерного сканування було обрано автодорогу місцевого призначення «Техбаза-кладовище «Західне». Обробка матеріалів польових вимірювань виконувалася за допомогою програмного забезпечення Leica Cyclone. Готові ЦТП були представлені у форматі AutoCAD. Для оцінки ефективності використання наземних лазерних сканерів для зйомки лінійних споруд автором були визначені нормативи часу на окремі етапи створення цифрового топографічного плану масштабу 1:500. Етапи виконаних робіт відповідали запропонованій методиці створення цифрових топографічних планів лінійних споруд.

*Виконання основних і додаткових зйомочних робіт.* Склад дій, які виконуються членами бригади в ході зйомки на кожній станції сканування, і функції членів бригади відповідали наведеним в 3 пункті роботи. У результаті хронометражних спостережень на 12 сканерних станціях, визначений норматив часу на роботу на 1 сканерній станції  $T_{(сканування)}$ .

$T_{(сканування)}$  для наземних лазерних сканерів:

$$T_{(сканування)} = T_{вим} / n_{станцій} = 18 \text{ год} / 12 = 1 \text{ год } 30 \text{ хв.} \quad (4.1)$$

де  $T_{вим}$  - загальний час роботи на сканерних станціях;  $n_{станцій}$  - кількість станцій.

Час виконання окремих операцій на сканерних станціях представлено в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1

Час виконання окремих операцій на сканерних станціях

№ дії	Дії, що виконуються	Час, хв
1.	Встановлення НЛС, підготовка його до роботи	5-7
2.	Установка і орієнтування тахеометра	включене у 1 дію
3.	Встановлення сканерних марок (робочого ПВО)	5
4.	Координування робочого ПВО тахеометром	3
5.	Виконання сканерної зйомки	від 10 до 25
6.	Координування робочого ПВО сканером	від 2 до 5
7.	Тахеометрична зйомка недоступних контурів	включене у дії 5-6
8.	Перехід на наступну станцію	від 5 до 10

У процесі створення ЦТП та ЦМ неминуче виникає необхідність уточнення характеристик або дознімання пропущених об'єктів чи важкодоступних ділянок. Для вирішення цих питань часто доводиться здійснювати додатковий виїзд на об'єкт після закінчення основних знімальних робіт. Іноді на дознімання та уточнення цифрових топографічних планів лінійних споруд потрібно більше на 50% від часу основних знімальних робіт.

*Формування єдиної моделі за даними наземного лазерного сканування.* Формування єдиних точкових моделей об'єктів здійснювалося з використанням

ПЗ Leica Cyclone. Значення середньої квадратичної похибки (СКП) положення сканерних марок у зовнішній системі координат, згідно ПЗ, представлені в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2

## СКП положення сканерних марок

НЛС	СКП			Кіль-ть станцій
	Мінімум, мм	Максимум, мм	Середнє, мм	
Leica Scan Station2	1,3	3,9	2,1	14

У результаті хронометричних спостережень визначено норматив часу на формування єдиної точкової моделі за даними наземного лазерного сканування, представлений в таблиці 4.3.

Таблиця 4.3

## Норматив часу на створення єдиної точкової моделі за даними наземного лазерного сканування

Одиниця процесу	Час на окремі операції, хв			Норматив часу, чол.-г
	Передача даних з робочих носіїв	Орієнтування окремих точкових моделей	Експорт даних для обробки	
1 станція	2	4	3	0,15

*Камеральні роботи зі створення цифрових планів лінійних споруд.*

Камеральні роботи зі створення ЦМ лінійних споруд виконувалися відповідно до пункту 3 роботи. Камеральні роботи зі створення ЦМ склалися з наступних етапів: векторизація точкової моделі (створення планової частини ЦМ) - побудова лінійних, площинних і точкових об'єктів відповідно до абрисів і даних зйомки; формування висотної частини ЦМ - набір пікетів з відмітками за даними наземного лазерного сканування; редагування ЦМ відповідно до вимог - експорт даних у формат представлення ЦМ, оформлення планів відповідно до вимог.

У результаті хронометражних спостережень визначено час виконання окремих операцій при створенні цифрових топографічних планів лінійних споруд за даними наземного лазерного сканування, представлено в таблиці 4.4.



## Норматив часу для створення ЦМ

Операції	Час виконання операцій на об'єкті, чол./год (у відсотках від загального часу)
Векторизація точкової моделі	33 (44)
Формування висотної частини	5 (7)
Приведення цифрової моделі, у відповідності з подальшим використанням	37 (49)

Дані наведені при створенні ЦТП, модель місцевості потребує більшого часу, що залежить від бажаного вихідного представлення моделі.

*Точність складання цифрових моделей лінійних споруд.* Для визначення достовірності і надійності цифрових топографічних планів, отриманих із застосуванням розробленої методики, були виконані польові контрольні вимірювання ліній за наданими планами і на місцевості. Контрольні вимірювання виконувалися метрологічно атестованим тахеометром з точністю 2мм+2мм/км. Довжина ліній контрольних вимірів склала від 5 до 40 м. Середня квадратична похибка визначення відстаней між точками в плані склала 3,8 мм.

Був здійснений контроль цифрових топографічних планів аналогічних об'єктів, створених на основі даних тахеометричної зйомки (виміряні 42 лінійних параметри). Максимальна розбіжність склала 3 см, а середня квадратична похибка визначення відстаней між точками в плані - 0,5 см. Як видно, точність топографічних планів, що створюються на основі даних наземного лазерного сканування, вища, ніж топографічна зйомка.

*Планово-висотне обґрунтування в районі робіт.* Створення ПВО на автодорозі «Техбаза-кладовище «Західне» здійснювалося методом прокладання замкнутих теодолітних ходів і ходів геометричного нівелювання із застосуванням електронного тахеометра Leica TCR405 та нівеліра Topcon AT-G2. Основою для розвитку ПВО були репера, закладені в ході проведення вишукувальних робіт. На об'єкті були прокладені ходи (рис.4.1) за ґрунтовими реперами, координати яких визначалися декількома способами. Окрім цього, положення кожної сканерної

станції визначалось навігаційною системою leica GPS 1200 для контролю та отримання більш достовірних даних.

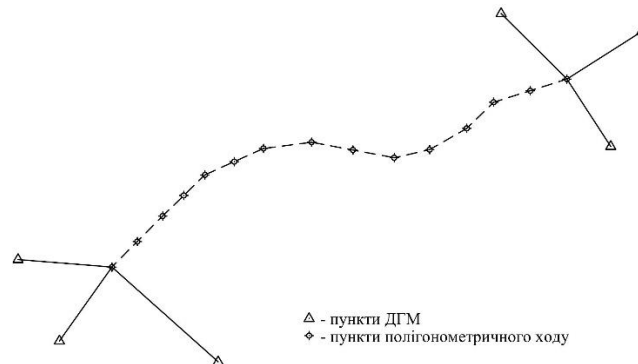


Рис. 4.1 Схема теодолітного ходу

Довжина ходу склала 1359,6 м, нев'язка в плані - 0,013 м (відносна похибка 1:33105, що відповідає полігонометричному ходу 4 класу бо  $1:25000 \leq 1:33105$  згідно [125]), висотна нев'язка - 0,009 м, що в межах допустимої похибки нівелювання III класу [126]. Оскільки  $10\sqrt{1,36} = 11,7\text{мм} > 9\text{мм}$

*Складання абрисів.* У ході виконання сканерної зйомки склалися абриси, на яких позначалося взаємне положення об'єктів, їх призначення та характеристики. Так як зйомка підземних комунікацій не передбачалася, визначення їх положення не виконувалося. Для полегшення дешифрування точкової моделі виконувалася детальна фото- і відеозйомка з використанням цифрового фотоапарата.

*Ведення зйомочних робіт.* Виконання сканерної зйомки здійснювалося з урахуванням максимальної детальності отримуваної точкової моделі. Такий режим сканування збільшував тривалість робіт, але дозволяв досягти більш якісних результатів за рахунок зменшення шумової складової у вимірах. Для орієнтування НІС використовувалися світлоповертаючі марки, розташовувані в зоні поля зору сканера за одиночною схемою, що також збільшувало тривалість робіт. Для прив'язки кожної сканерної станції використовувалося від 6 до 8 марок.

Час, витрачений на виконання польових робіт, наведено в таблиці 4.5

## Тривалість польових робіт

Етапи польових робіт	Дні
Складання ПВО, днів	3
Виконання сканерної зйомки, днів (годин)	2(18)
Кількість сканерних станцій	14

*Розрахунок кількості часу на створення цифрової моделі лінійної споруди із застосуванням наземного лазерного сканування. Визначення комплексних норм часу на створення цифрових топографічних планів і тривимірних моделей лінійних споруд було виконано аналітично-дослідним методом [127]. На основі хронометражних спостережень встановлено час оперативної роботи  $T_{оп}$  (норматив часу) для окремих процесів, і за такою формулою визначені норми часу на окремі процеси  $H_{ч}$  [128]:*

$$H_{ч} = T_{оп} \cdot \left( 1 + \frac{T_{пз}\% + T_{пт}\% + T_{дод}\%}{100\%} \right), \quad (4.2)$$

де  $H_{ч}$  – норма часу на окремий процес;  $T_{оп}$  – час оперативної роботи;  $T_{пз}$  – підготовчо-заклучний час;  $T_{пт}$  – технологічні перерви;  $T_{дод}$  – час на перерву та особисті потреби.

## 4.2 Геологічна будова району робіт - дорога «Техбаза – кладовище «Західне»

### *Позиція ділянки у структурі району*

У геологічному відношенні ділянка дороги «Техбаза – кладовище «Західне» є частиною великої структурної одиниці, так званого східного крила Криворізького синклінорію, що представляє собою синклінально-антиклінальний перегин – Саксаганської синкліналі та антикліналі. Загальне крило цих структур повністю знищене Саксаганським насувом, завдяки чому синкліналь має лише східне крило, а антикліналь – західне.

Саксаганська синкліналь складає східну частину ділянки і є основною структурою, якій належать основні промислові запаси залізних руд шахт «Родіна» та «Кірова».

### *Тектоніка*

Тектонічні будова Криворізького залізорудного басейну висвітлена в багатьох наукових працях. Незважаючи на значні обсяги буріння глибоких свердловин, аналіз їх результатів не отримав даних, що підтверджують синклінорну будову басейну. Геолого-геофізичними роботами (1981-82 рр.) при обґрунтуванні буріння Криворізької надглибокої свердловини питання синклінальної або моноклінальної структури не було остаточно вирішено, а отримані геологічні результати з буріння свердловин Центрально-Скелюватського профілю свідчать на користь моноклінальної будови Криворізького залізорудного басейна.

У структурному відношенні район ділянки дороги представлений складно побудованою Криворізькою монокліналлю, яка ускладнена Саксаганським і Східним насувами.

Утворення Саксаганського і Східного насувів пов'язане з різнонаправленим рухом великих блоків гранітоїдної рами (із заходу на схід), який привів до стискання Криворізької моноклінали. Надалі відбувався зрив і рух по латералі верствуватих товщ криворізької серії. Розвиток Саксаганського насуву також проходив разом з гравітаційним сповзанням гірничих мас або окремих верств гірських порід вниз за схилом. Амплітуда переміщення в субмеридіальному напрямку порід, що насувалися, становила близько 20 км.

По Східному насуву більших зміщень блоків порід не спостерігалось. У площині Східного насуву відбулося розгалуження насуву з утворенням паралельних більш дрібних насувів.

#### **Саксаганський насув**

Саксаганський насув є найбільшою структурою Саксаганського району Кривого Рогу. У межах ділянки дороги Саксаганський насув розкритий гірничими виробками шахт «Родіна» та «Кірова». Простягання насуву північне, північно-східне азимут 25-280° з коливаннями від 17 до 300°. Падіння поверхні Саксаганського насуву західне під кутом від 40 до 75°. Занурення площини зміщувача північне під кутом 10-250°. Низкою глибоких свердловин на глибині

нижче 1200 м встановлене більш круте падіння зони Саксаганського насуву (80-85°). У зоні Саксаганського насуву спостерігається розвиток паралельних більш дрібних насувів, які утворюють лінзобразні блоки порід.

Насування порід супроводжувалося утворенням складок волочіння. У районі ділянки дороги подібні складки чітко фіксуються у гірничих виробках та характерні для сланцевих горизонтів на глибині 1000-1800 м від поверхні в центральній частині родовищ шахти «Родіна». У сланцях спостерігається мілонітизація з утворенням численних дзеркал ковзання. У залізистих кварцитах спостерігається підвищена тріщинуватість, розвиток кварцових і кварц-карбонатних жил і прожилків. Великих брекчійованих зон і брекчій не спостерігається, тому що насув мав місце на більших глибинах, при високому літостатичному тиску, що забезпечувало ковку реакцію порід, яка перешкоджала утворенню брекчій.

### **Східний насув**

Східний насув проявлений у східному борті Криворізької монокліналі. Це поздовжнє порушення проходить на контакті порід Саксаганської і Склеюватської світи.

Східний насув вивчений за результатами проходження гірничих виробок шахти "Родіна", а також за результатами буріння свердловин. Простягання Східного насуву північно-північно-східне азимут 20-300°. Кути падіння площини насуву коливаються від 34-40° до 45-50° на захід.

У зоні Східного насуву спостерігається зменшення потужності або повне зрізання порід талькового горизонту скелюватської світи і часткове зрізання першого сланцевого горизонту Саксаганської світи. Східний насув зіграв велику роль в утворенні рудоконтролюючої структури. По площині цього насуву зірваний блок порід Склеюватської світи був перенесений у зону Саксаганського насуву. У процесі переміщення блок порід Склеюватської світи захопив породи першого, другого сланцевих і частково першого залізистого горизонтів Саксаганської світи, які разом з іншими факторами створили структуру екранування. Все це сприяло розвитку покладів багатих залізних руд.

Крім основних тектонічних структур Саксаганського і Східного насувів у будові району робіт беруть участь тектонічні порушення типу зсувів. До таких порушень відносяться Північний діагональний, Центральний і Південний діагональні зсуви. Всі вони утворилися під час закладення Саксаганського і Східного насувів та їх опіряють. Простягання цих порушень з південного сходу на північний захід азимут від 280 до 345°.

У горизонтальній площині за цими порушеннями встановлюються переміщення південних блоків на захід. Амплітуда переміщення коливається від 10 до 30 м. У вертикальному розрізі за цим тектонічним порушенням спостерігається підйом південно-західних блоків відповідно північно-східного. Амплітуда переміщення місцями досягає 30 м. Переміщення вздовж діагональних зсувів супроводжувалося обертанням верств порід із збільшенням їх потужності.

Описані вище розривні структури викликали розвиток інтенсивної тріщинуватості в породах і рудах родовища.

### *Геоморфологія*

Саксаганський район, до складу якого входить ділянка дороги «Техбаза – «Західне кладовище», розташований на північно-східному схилі Інгулецько-Саксаганського вододілу річки Дніпро та представляє собою рівнину з поступовим зниженням до долини річки Саксагань.

Ділянка простягається на схилі правого берега річки Саксагань. Поверхня її слабо хвиляста, що має загальний схил на схід, який збільшується до долини річки. На заході територія переходить в пласку вододільну височину, складову частини степової Дніпровської рівнини.

Найвищою відміткою в межах є могила Плоска (+107,5 м), яка розташована в північно-західній частині території гірничого відводу шахти „Родіна”. Найнижча відмітка (+41,0 м) знаходиться в річці Саксагань, поблизу селища Покровка. Загалом у рівнинному рельєфі виділяються зони обвалення, відпрацьовані кар'єри, великі піднесення відвалів гірських порід, що утворилися внаслідок роботи кар'єрів рудника ім. К.Лібкнехта та Центрального ГЗКу.

Поверхня гірничого відводу пересічена трьома балками - Кам'яниста, Безіменна та Сулова. Більшу частину року балки сухі, і тільки в період танення снігу і літніх злив по них відбувається стік талих та дощових вод. Річка Саксагань маловодна з перекатами і плесами.

Клімат району помірно-континентальний. Середньорічна температура  $+8,3$  °С. Середня температура січня  $-4,9$  °С. Максимальна температура в липні досягає  $+38$  °С, рідко  $+40$  °С. Глибина промерзання ґрунту 0,8-1 м. Середня річна кількість опадів становить 400-450 мм. Переважають вітри східного, північно-східного і північного напрямків, що дують зі швидкістю 5 м/с, іноді вони переходять в урагани зі швидкістю до 20 м/с. На рисунках 4.2 та 4.3 показано схему розташування та геологічний розріз профільної лінії.

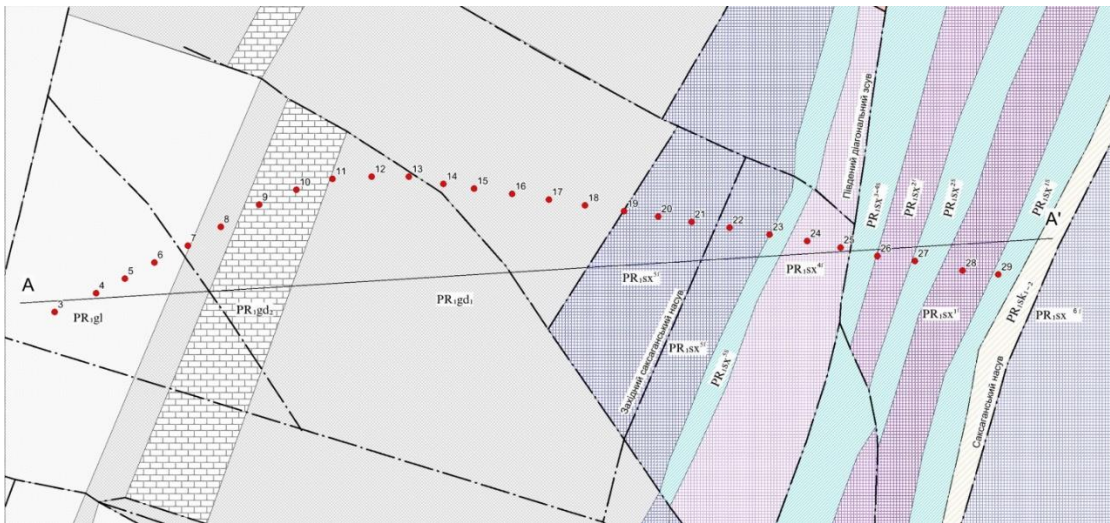


Рис. 4.2 Схема розташування реперів профільної лінії на геологічному плані

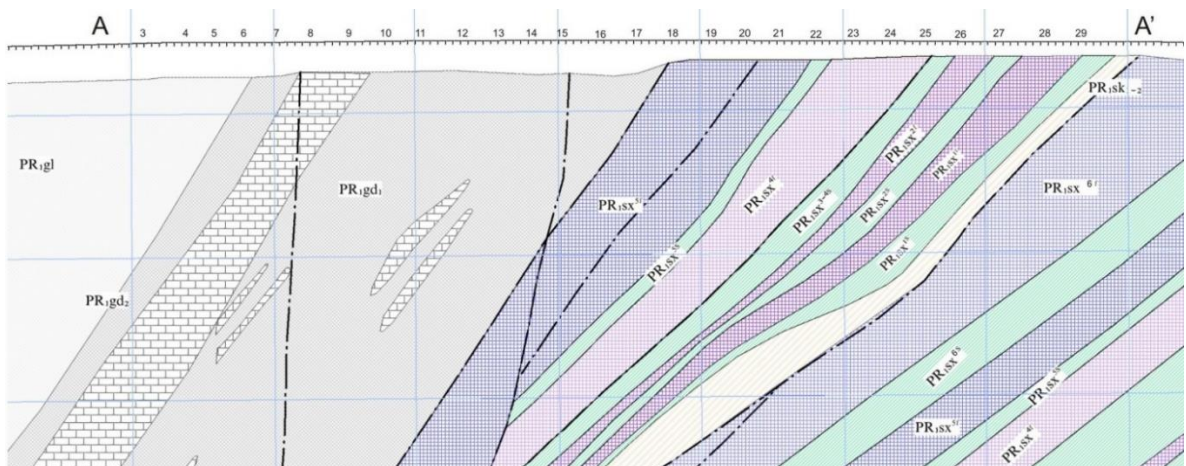
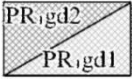
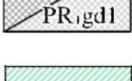
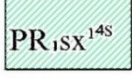






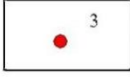
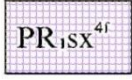
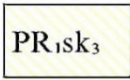


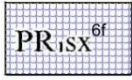
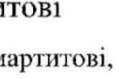


Рис.4.3 Геологічний розріз по лінії AA'



## УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ

	Гданцівська світа Сланці		
	Саксаганська світа Сланці амфібол-гранат-біотитові с прошарками безрудних кварцитів		
	Кварцити мартитовіта силікат-магнетитові		
	Кварцити мартитовіта силікат-магнетитові		
	Кварцити мартитові, силікат-магнетитові		
	Кварцити силікат-магнетитові, гематит-магнетитові, магнетитові		
	Кварцити залізолуцко-мартитові, магнетитові		
	Кварцити мартитові, гематит-дисперсно-гематит- мартитові, силікат-магнетитові		

### 4.3 Ведення польових робіт з геодезичного контролю інженерних лінійних споруд із застосуванням наземного лазерного сканера

Дослідження автора в цілому полягає в отриманні хмари точок з шумоподавленням і підході калібрування точок, який використовує велику кількість вимірних точок у просторі і часі (4D). Мета полягає у виявленні будь-якого переміщення з використанням даних наземного лазерного сканування з можливістю отримання суб-сантиметрової точності або невеликих локальних об'єктів із суб-мм точністю. Така методика може бути використана для дослідження незначних природних або техногенних змін форми або просторового положення, тобто деформацій у гірських схилах або бортів кар'єрів, незначних переміщень земної поверхні або автодорожнього одягу в будь-якому-напрямку. Програмний алгоритм обчислює горизонтальні відстані та, завдяки надмірним вимірам, використовує набір для калібрування хмари точок, щоб видалити систематичні помилки. Потім використовується медіана отриманих точок у просторі, що дозволяє фільтрувати значення в просторі і часі та дає змогу



зменшити грубі помилки. Якість застосування цього алгоритму підтверджується на теоретичних і експериментальних прикладах. Оптимальні комбінації отримання просторових і часових даних у практичних задачах може привести до поліпшення результатів вимірів на декілька порядків, що дозволить значно поліпшити виявлення невеликих змін у багатьох деформаційних процесах, таких як деформація верхнього шару земної поверхні, деформація в інженерних, цивільних спорудах та різних геоморфологічних змін.

При отриманні даних під час вимірів завжди існує випадкова «зашумленість», зазвичай через шорсткість об'єкту або якісь природні перешкоди. В основному вони програмно фільтруються методом усереднення. Важливо відзначити, що існує два методи усереднення результатів хмари точок. Перший - це безпосередньо усереднення позиції хмарини точок за побудованою сіткою, що утворена згладжуванням (сітка згладжування[129]), та усереднення, використовуючи середню різницю між сусідніми точками у хмарині [130].

Поєднання просторових даних та часової складової має велику перевагу перед двома цими складовими поодиноці. У тому числі було встановлено, що при наявності просторових зв'язків підвищується точність даних окремих точок. Тобто при збільшенні кількості сусідніх зв'язків навколо однієї точки у різний час усереднення результатів визначення положення цієї точки стає ближчим до істинного значення. Наприклад, у середньому, 10 точок будуть мати 100 сусідніх просторових зв'язків, тоді це призведе до зниження стандартної похибки відхилення у 32 рази. Але ці дані можна застосувати тільки за наявності нормального розподілу Гаусса, що майже не можливо при скануванні місцевості [130]. Це пов'язано із різною структурою поверхні, її нерівностями, наявністю рослинності та інших перешкод.

Щоб вирішити завдання геодезичного контролю інженерного об'єкту – автодороги «Техбаза-кладовище «Західне», пропонується методика застосування НЛС, що дозволяє скоротити кількість геодезичних приладів та дасть змогу визначити різні параметри об'єкта, які можна класифікувати наступним чином: геометричні параметри об'єкта (довжина, ширина, висота, площа, об'єм);

локальні деформації об'єкта (кручення, розкриття тріщини, відмінна поверхні від основної); взаємне розташування об'єктів на території зйомки (різність осадок реперів, зміна розташування об'єктів, що знаходяться поруч, реєстрація тріщин, якщо вони є); просторове положення інженерних конструкцій (відхилення від вертикалі стовпів, зміна положення огорож, мостів); визначення напрямку зміщення та швидкості деформацій (визначення швидкості зміни положення окремих ділянок або об'єктів).

При розробці методики за основу взято інструкцію зі спостереження за зсувами гірничих порід [131]. Згідно з інструкцією інструментальні спостереження на станції складаються з: планової і висотної прив'язок опорних реперів до вихідних пунктів і періодичного контролю за їх нерухомістю в період проведення спостережень; початкових спостережень для визначення вихідного положення реперів спостережної станції в горизонтальній і вертикальній площинах; повторних спостережень за положенням реперів спостережної станції; періодичних зйомок тріщин, провалів і зони обвалення земної поверхні.

Методика геодезичного контролю автодороги із застосуванням НЛС: рекогностування об'єкта, на якому ведуться роботи; проектування робіт та визначення завдань, які потрібно вирішити; вибір об'єктів, які необхідно контролювати, їх параметрів і процесу контролю; розробка схеми сканерних робіт, визначення етапів виконання робіт; аналітичне або інструментальне визначення декількох статичних геометричних елементів, розташованих на об'єкті контролю або тих, які знаходяться в безпосередній близькості від місця установки НЛС, що відповідають вимогам відсутності динаміки зміни його геометрії і не схильних до впливу деформацій протягом тривалого часу 1-2 сезону; розрахунки теоретичної точності вимірювань, оцінка впливів, що погіршують точність вимірювань НЛС, описаних раніше, визначення очікуваної похибки; підбір способу обробки виконаних вимірювань і форми звітної документації за роботами виконаних на об'єкті; проведення польових робіт геодезичного контролю: а) підготовка НЛС, пристосувань і спеціального устаткування; б) проведення заходів з техніки безпеки; обробка та аналіз

результатів вимірювань: а) виконання попередньої обробки отриманих результатів вимірювань наземним лазерним сканером; б) визначення геометричних характеристик об'єкта сканування та його форми в цілому для подальшого створення моделі; в) аналіз отриманих даних.

Якщо є можливість зняти об'єкт з однієї точки стояння, тобто отримання одного скану, тоді сутність методики полягає у наступному. Виконується зйомка наземним лазерним сканером з однієї станції установки в умовній системі координат сканера. Потім необхідна детальна зйомка характерних елементів об'єкта сканування, близьких за своєю формою до правильних геометричних фігур для отримання контрольних віртуальних точок.

Для обрання оптимальної позиції сканування необхідно враховувати характеристику об'єкта. Спочатку визначають точки з прямою видимістю, на яких можна поставити марки для орієнтування і зшиття сканів, а потім виконують сканування об'єкта. Ділянки складної геометричної форми знімають більш детально, так само, як і віддалені частини.

Вибір оптимальних характеристик сканування дозволить усунути певну кількість похибок та поліпшити кінцеві результати. Для цього пропонується використовувати наступні рекомендації, які отримано в ході експериментальних досліджень:

- виконати прогрів сканера протягом 15 хвилин, якщо температура повітря менша ніж  $+25^{\circ}\text{C}$ ;

- ділянки, які потребують контролю, у більшості випадків повинні бути розташовані у межах вимірюваної відстані, що складає 8-60 метрів. За сприятливих умов для вимірювань ці межі можна розширити до 5-80 метрів. Це пов'язано з тим, що саме на цих відстанях витримуються оптимальні кути посилення-прийому сигналу приладом, на яких похибки даних мають стабільну величину. Висновки за такими діапазонами вибору дистанції були обрані після проведення польового експерименту. На місцевості був розбитий базис із реперами на відстані від сканера 5м, 10м і далі через 10 метрів до 120 метрів; таким чином було отримано 13 реперів. Планові координати і висотні відмітки,

отримані за допомогою тахеометра і нівеліра в умовній системі координат. Висота установки сканера склала 1,80м (рис. 4.4).

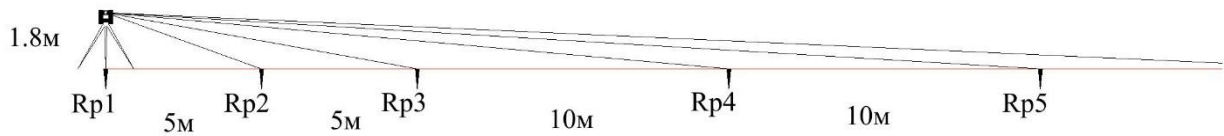


Рис. 4.4 Схема розташування сканера відносно реперів.

Отримані відхилення координат, що були розраховані після вимірювань наведені на рисунку 4.5.

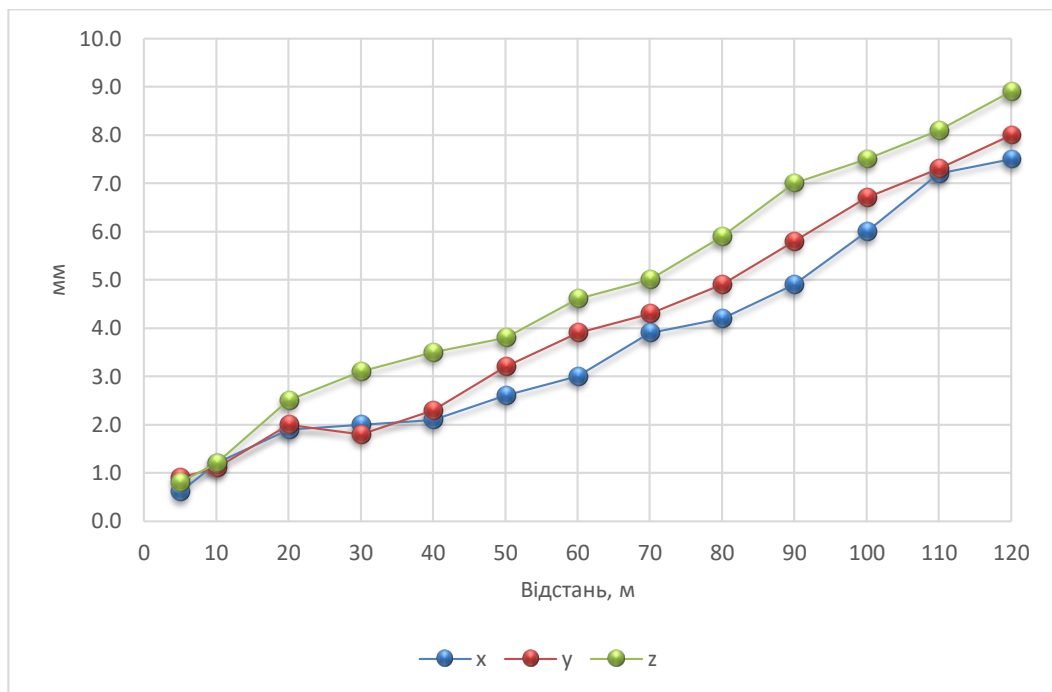


Рис. 4.5 Відхилення отриманих координат

Проаналізувавши графік, можна зробити висновок, що різка зміна відхилень координат точок має місце на проміжку 50-60 метрів, і далі зі подовженням відстані зростає з більшою швидкістю. Також значна швидкість зростання помилок спостерігається на проміжку 5-20 метрів. Саме беручи ці дослідження до уваги, запропонована оптимальна відстань вимірювань;

- для більш точного позиціонування репера при скануванні, запропоновано використовувати репери-марки конструкції, що представлена на рисунку 4.6. Або орієнтуватись на жорстко закріплені об'єкти в полі зору сканера, що мають видиму площу сканування більше  $6 \text{ см}^2$ , та по можливості обирати такі, форма яких наближена до правильних геометричних фігур.

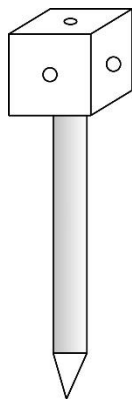


Рис. 4.6 Репер-марка

Такий репер має на своєму кінці марку у вигляді куба, розміри якого можуть бути різними, але обов'язково відомими, що дає змогу чітко порівняти розміри, отримані під час вимірювань. Глибина установки репера та його довжина можуть бути довільними в залежності від поставлених завдань, та району ведення робіт. Для більш чіткого моделювання під час обробки даних, у репері по центру з 5 сторін зроблений отвір, що дасть змогу ще раз проконтролювати визначення центру репера з будь-якої сторони сканування. Такі отвори дають можливість підвищити ефективність знаходження координат центру репера для подальшого його аналізу під час визначення деформаційних процесів;

- контрольні марки мають бути правильної і відомої форми та розмірів. У ході експериментів встановлено, що найбільш точні результати визначення марки зі сканування становлять об'єкти, площа яких більше  $9 \text{ см}^2$ . На рисунку 4.7 показано, які похибки виникають під час обробки відсканованих об'єктів;

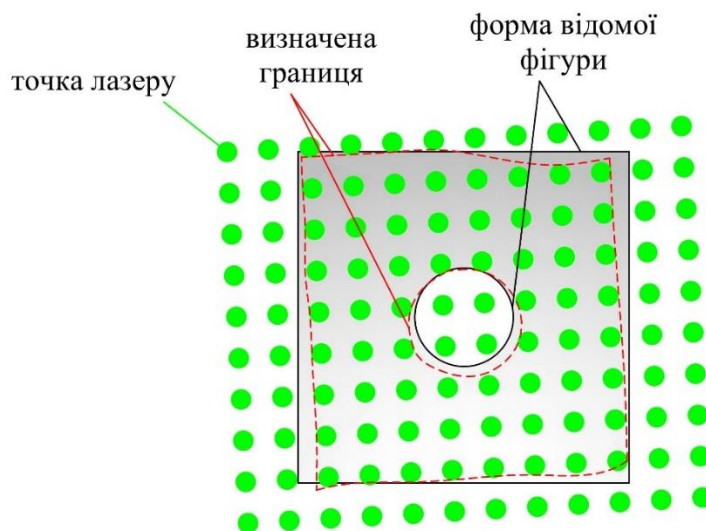


Рис. 4.7 Визначення границь відсканованої марки

- слідкувати за тим щоб кут падіння на ділянки, які потребують контролю, не перевищував  $50^\circ$ , так як при більших кутах значно слабшає сигнал, що повертається, а це призводить до виникнення неконтрольованих помилок при отриманні даних;

- максимально виключити вібрацію штатива використовуючи гумові прокладки під нього, що у випадку з автодорогою доволі актуально;

- виконувати не менше трьох повторів вимірювань на об'єкти, які контролюються, з розподільчою здатністю сканування не менше 10 точок на  $1 \text{ см}^2$  поверхні;

- репери або ділянки для контролю бажано обирати (пофарбувати) у світлих тонах для уникнення високого відсотку поглинання променів;

- дотримуватись інструкції експлуатації сканера у нашому випадку Leica Scan Station 2 [132].

Безпосередньо перед початком сканування на об'єкті дослідження було створено ПВО (рис 4.8). Після чого виконувалось сканування з закріплених і закоординованих точок на місцевості.

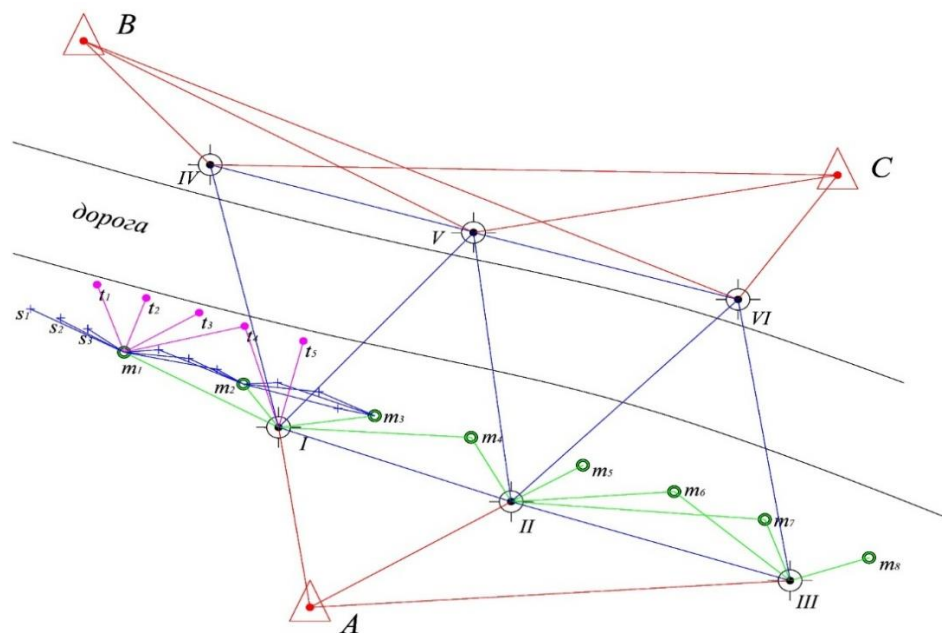


Рис. 4.8 Схема створення ПВО.

де A,B,C – пункти державної геодезичної мережі (ДГМ); I, II,÷VI- основне ПВО, S<sub>1,2,3</sub>- сканерні станції; m<sub>1</sub>, m<sub>2</sub> – робоче ПВО сканерних станцій, t<sub>1</sub>÷t<sub>5</sub> – точки, що виміряні.

Розглянемо послідовність етапів сканування, яке виконувалося на автодорозі «Техбаза-Кладовище «Західне»: панорамна зйомка камерою НЛС та сканування з великим кроком 10-20 см по горизонталі і вертикалі на відстань близькою до 100 м; виконання обміру відстані до НЛС до елементів контролю, використовуючи функцію «Дистанція», ці дії автоматично фіксуються у меню, що дозволяє регулювати налаштування сканування і більш точно визначати крок сканування; 10-ти кратне сканування контрольних марок, реперів або областей контролю за допомогою функції «вікно-скан», яка дозволить задати область сканування, використовуючи раніше отримане зображення за допомогою камери НЛС; сканування марок-реперів, марок, які використовуються для зшивки окремих сканів, контрольних областей з максимальною розподільчою здатністю сканера; для контролю за динамічними процесами на сканерній станції, через одну годину необхідно провести ще одне спостереження марок-реперів з максимальною розподільчою здатністю сканера та об'єктів, які не підлягають деформації; після завершення сканування знаходити можливі пропуски, які виникли під час руху автомобілів або інших перешкод, доскановуються ці ділянки; вимкнути сканер.

Координати точок, над якими встановлювався сканер і велись спостереження, необхідно проконтролювати іншими геодезичними приладами (тахеометром, нівеліром, GPS-приймачами та т.п.). При виконанні сканування необхідно постійно відстежувати і фіксувати атмосферні явища, які впливають на роботу геодезичних далекомірів [51, 133]. Однак стандартний вплив на точність вимірювань відстаней при використанні лазерного далекоміра становить  $\sim 5$  мм на  $1 \text{ км} \pm 0,1 \text{ мм}$  [75], тому ця величина не є суттєвою при використанні НЛС на максимальній відстані до 100 м від об'єкту сканування [119].

Об'єкт сканування знаходиться в м. Кривий Ріг Дніпропетровської області. Спостереженню підлягав відрізок дорожнього одягу з твердим покриттям (асфальт) довжиною близько 1200 м – «Техбаза - кладовище «Західне». Ця ділянка автодороги пролягає над пустотами, утвореними підземною розробкою рудоносних порід і межує із зонами обвалів. Для виявлення можливих

(прогнозованих) вертикальних і планових деформацій автодороги в досліджуваній зоні вибраний новітній метод - наземне лазерне 3D-сканування.

Рекогностування району робіт було проведено в червні 2011 року групою фахівців ТзОВ науково-виробнича фірма «Дока» в присутності представників з наукової роботи Криворізького технічного університету. В обстеженій частині автодорога пролягає із заходу на схід по середньопересіченій місцевості в парковій зоні з широколистими деревами, висота яких складає понад 8 м. Висота насипу одягу автодороги над природним рівнем ґрунтів, в зоні спостереження складає від 0,5 м до 1,5 м і до 3 м біля залізобетонного мосту: довжиною 12 м, який потрапляє в ділянку сканування. Ширина дороги (з узбіччям) коливається від 10 до 12 м, ширина твердого покриття (асфальту) - від 6 до 7,5 м. Узбіччя частково поросле травою, що ускладнює відтворення всього одягу дороги за результатами сканування і призводить до зниження точності побудови TIN-моделі дороги на задернованих ділянках. Тверде покриття дороги частково пошкоджене і потребує поточного ремонту. Для установки сканера і плоских марок-рефлекторів на I етапі робіт намічено на узбіччі дороги і закріплено сталевими прутами діаметром 16 мм і довжиною 0,5-0,7м 20 точок тимчасової знімальної мережі: 7 станцій сканування, 13 точок установки марок (по 3-4 на кожену станцію, з кожного боку дороги) для «зшивання» окремих сканів (хмар координованих точок). Схема точок тимчасової знімальної мережі, що використовувалась під час 5 етапу сканування, показана на рисунку 4.9.



Рис. 4.9 Схема закладки точок тимчасової знімальної мережі



Після проведення I етапу сканування, в ході обробки результатів був зроблений висновок: існує необхідність збільшення кількості точок тимчасової знімальної мережі, на які встановлюються марки-рефлектори для підвищення точності зшиття хмар точок. Для надійності визначення координат пунктів полігонометрії, які визначаються декількома геодезичними методами, на ці пункти вирішено встановлювати по дві марки-рефлектори на металевій штанзі в вертикальному положенні.

Після цих рішень, за допомогою навігаційного обладнання в режимі статички, визначені координати додаткових точок тимчасової знімальної мережі, які були включенні в загальну хмарину координованих точок наземним лазерним сканером. Окрім підвищення контролю точності, додаткові точки знімальної мережі дозволили збільшити кількість видимих точок полігонометрії для їх порівняльного аналізу.

Схема прив'язки точок та точність отриманих результатів наведена в таблиці 4.6 та на рисунку 4.10.

Таблиця 4.6

Оцінка точності координат тимчасової знімальної мережі виконані в ПЗ

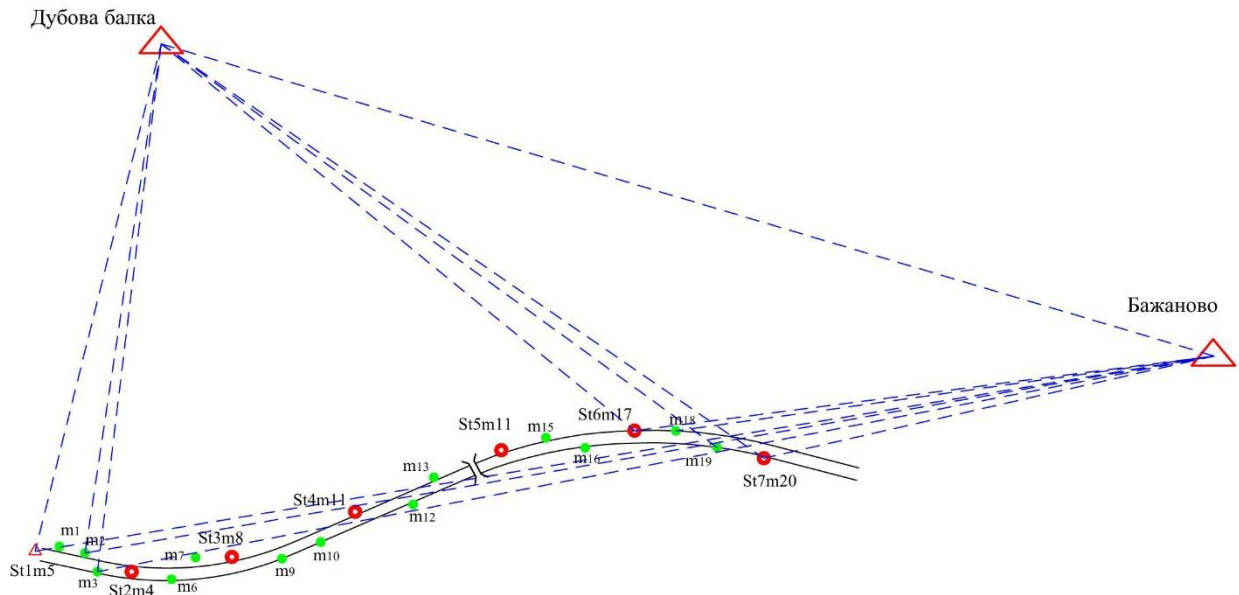
"LeicaGeoOffice"

I сканування						
Назва і номер	статус	дата і час	У, м	Х, м	Н, м	$\Delta_{RTK}$ , м
Baganovo3kl	Control	05/26/2011 11:26:58	4371147.189	5306639.8360	102.435	0.000
Dubovabalka 1kl	Measured	05/26/2011 17:10:24	4365662.909	5310036.776	121.982	0.001
пп17st6	Measured	05/26/2011 16:20:08	4365604.068	5304900.098	96.743	0.001
пп19	Measured	05/26/2011 15:41:09	4365721.399	5304876.996	95.633	0.001
пп18	Measured	05/26/2011 16:00:37	4365665.688	5304896.042	96.549	0.003
пп20	Measured	05/26/2011 15:10:36	4365790.005	5304864.504	94.496	0.003
пп5st1	Measured	05/26/2011 13:57:54	4364767.498	5304676.447	98.887	0.016
пп3	Measured	05/26/2011 14:11:14	4364887.230	5304666.177	99.308	0.018
пп1	Measured	05/26/2011 13:59:28	4364798.187	5304691.357	99.286	0.020
пп19kont	Measured	05/26/2011 12:22:50	4365721.381	5304877.034	95.653	0.024
Dubovabalka 1kl control	Control	05/26/2011 17:10:24	4365662.817	5310036.872	121.107	0.000

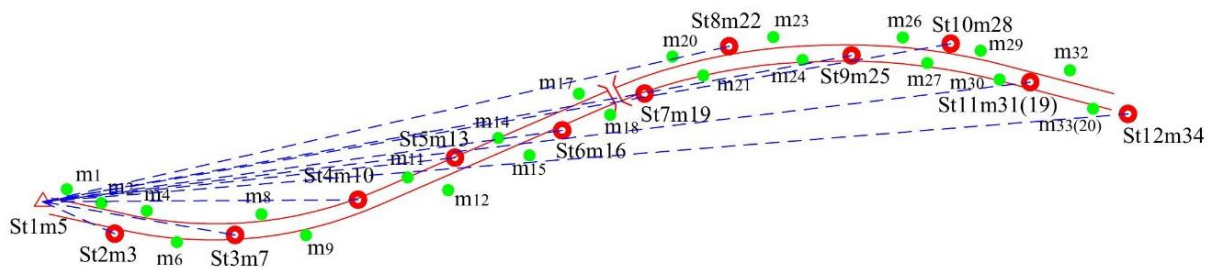
## Продовження таблиці 4.6

II сканування						
M5st1	Reference	07/19/2011 20:01:50	4364767.4979	5304676.4469	98.8862	0.0000
St3m7	Measured	07/19/2011 20:18:12	4364998.3947	5304667.5159	98.1530	0.0167
St4m10	Measured	07/19/2011 20:21:19	4365090.8563	5304678.3967	96.1898	0.0167
Пп1	Measured	07/19/2011 20:02:43	4364798.1682	5304691.3159	99.2592	0.0169
St2m3	Measured	07/19/2011 20:04:58	4364887.2181	5304666.1601	99.2694	0.0174
St6m16	Measured	07/20/2011 15:14:36	4365281.6865	5304768.1587	95.2027	0.0175
St5m13	Measured	07/19/2011 20:24:57	4365184.4418	5304726.4418	95.0763	0.0188
St8m22	Measured	07/20/2011 15:24:29	4365453.7750	5304870.0737	96.0638	0.0194
пп2	Measured	07/19/2011 20:03:43	4364824.9448	5304671.2996	99.1112	0.0200
пп4	Measured	07/19/2011 20:07:12	4364914.8353	5304663.6176	99.1851	0.0203
St11m31(m19)	Measured	07/20/2011 15:32:59	4365721.3440	5304876.9666	95.6345	0.0212
St7m19	Measured	07/20/2011 15:16:42	4365373.8217	5304824.6633	95.9650	0.0251
St9m25	Measured	07/20/2011 15:26:54	4365554.2247	5304887.7101	96.7804	0.0259
St12m34	Measured	07/20/2011 15:38:17	4365874.7911	5304849.0046	93.9524	0.0277
St32(m20)	Measured	07/20/2011 15:36:47	4365790.0086	5304864.5032	94.4916	0.0283
St10m28	Measured	07/20/2011 15:29:49	4365635.2966	5304898.4448	96.5533	0.0303
III сканування						
M5st1	Reference	08/15/2011 15:32:29	4364767,498	5304676,447	98,887	0.0000
St3m7	Measured	08/15/2011 13:09:35	4364998,390	5304667,510	98,155	0.0191
St4m10	Measured	07/19/2011 13:17:51	4365090,861	5304678,394	96,195	0.0165
Пп1	Measured	07/19/2011 12:50:43	4364798,173	5304691,311	99,265	0.0171
St2m3	Measured	07/19/2011 12:56:58	4364887,230	5304666,165	99,275	0.0165
St6m16	Measured	07/20/2011 13:36:36	4365281,674	5304768,158	95,207	0.0201
St5m13	Measured	07/19/2011 13:24:57	4365184,436	5304726,448	95,089	0.0172
St8m22	Measured	07/20/2011 14:05:29	4365453,770	5304870,073	96,072	0.0211
пп2	Measured	07/19/2011 12:53:43	4364824,934	5304671,291	99,287	0.0187
пп4	Measured	07/19/2011 12:59:12	4364914,799	5304663,626	99,156	0.0194
St11m31(m19)	Measured	07/20/2011 14:42:59	4365721,337	5304876,976	95,628	0.0172
St7m19	Measured	07/20/2011 13:52:42	4365373,815	5304824,660	95,954	0.0225
St9m25	Measured	07/20/2011 14:26:54	4365554,229	5304887,716	96,765	0.0203
St12m34	Measured	07/20/2011 15:15:22	4365874,799	5304849,001	93,959	0.0216
St32(m20)	Measured	07/20/2011 15:00:25	4365789,996	5304864,514	94,496	0.0243
St10m28	Measured	07/20/2011 14:29:49	4365635,295	5304898,447	96,558	0.0273

Таким чином, точність визначення координат тимчасової знімальної мережі відносно базової станції склало не більше  $\pm 27$  мм.



прив'язка тимчасової знімальної мережі до пунктів ДГМ



прив'язка точок сканування

Рис. 4.10 Ведення прив'язочних робіт на об'єкті

#### 4.4. Методика ведення робіт з обробки даних наземного лазерного сканування для вирішення завдання геодезичного контролю лінійних об'єктів

Методика, що запропонована для камеральної обробки даних НЛС з метою вирішення завдання геодезичного контролю, ґрунтується на використанні програмного забезпечення Leica Geosystems Cyclone версія 7.0. Leica Cyclone є найпоширенішим програмним комплексом із застосування користувачами серед засобів для візуалізації та обробки даних лазерного сканування, особливістю якого є наявність великої бази функціональних інструментів і висока продуктивність.

При виконанні аналізу результатів сканерної зйомки НЛС були виділені основні етапи обробки результатів: створення і реєстрація бази даних та імпорту вимірювань з НЛС або каталогу отриманих координат; попередня обробка результатів сканування; підготовка даних (фільтрація і сегментування ділянок сканування контрольних елементів); виділення відсканованих зон, які необхідні для аналізу динамічних процесів; визначення тривимірних координат контрольних «віртуальних точок»; контроль отриманих результатів; аналіз та інтерпретація результатів, порівняння з попередніми.

Створення і реєстрація бази даних НЛС відбуваються в діалоговому вікні Cyclone - Navigator, яке активується після запуску програмного комплексу Cyclone. Вводиться ім'я проекту і вказується шлях, де будуть зберігатися результати (рисунок 4.11). Після чого у вкладці «SERVERS» реєструється створена база даних. Далі виконуються імпорту результатів вимірювання; залежно від використовуваної моделі НЛС формат імпортованих даних може змінюватись, найбільш зручні в застосуванні і поширені формати з розширенням \*.PTS, \*.PTX, .TXT [117].

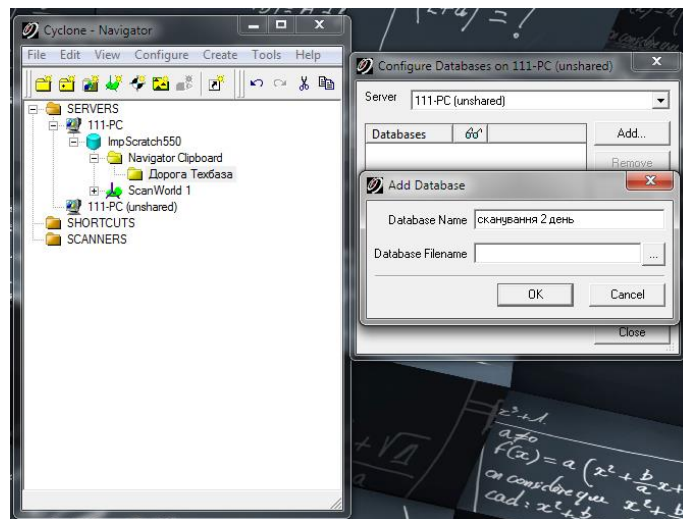
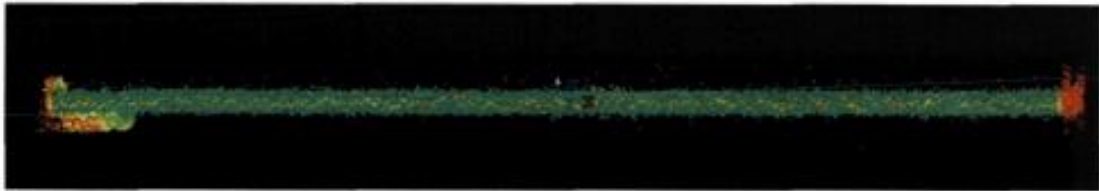


Рис. 4.11 Створення та реєстрація бази даних НЛС

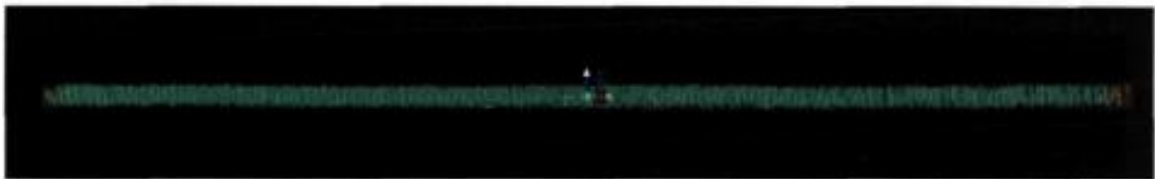
Після етапу імпорту вимірювань переходять до попередньої обробки даних, сутність якої полягає в об'єднанні і, за необхідності, в орієнтуванні сканів. Для цього використовують модуль «Registration», в діалоговому меню якого додають раніше імпортовані дані НЛС, після чого виконують команду «Create Modelspace», яка дозволяє об'єднати підвантажені дані в точкову модель.

Об'єднання даних виконується з метою візуалізації загальної сцени отриманих вимірювань. Однак необхідно відзначити, що завдяки цьому зберігається топологія до кожної точки установки НЛС, в базі даних фіксується чіткий поділ кожного скана за етапами вимірювання і точок установки сканера. Задля виключення впливу накопичення похибки вимірювань, у зв'язку з переорієнтування сканів в єдину зовнішню або умовну систему координат, рекомендується виконувати подальші дії на основі даних тільки одного скана, що належить одній точці установки НЛС.

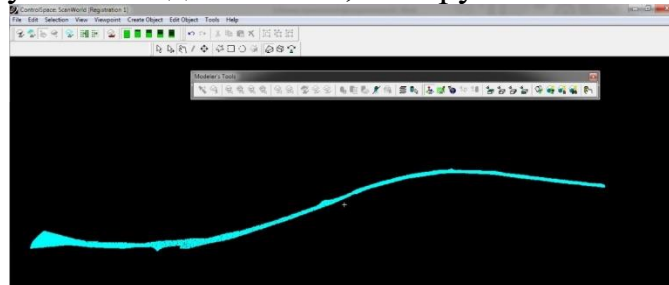
На основі отриманої єдиної точкової моделі об'єкта сканування в інтерактивному режимі за допомогою інструменту «Face Mode» виконується сегментування ділянок сканерних даних, що належать контрольним елементам маркам-реперам об'єкту сканування, а також проводиться видалення вимірювань, що мають грубі похибки і не належать контрольним елементам. На рисунку 4.12 представлені результати даних НЛС.



сканування з однієї точки, з грубими похибками



сканування з однієї точки, без грубих похибок



готова модель дорожнього покриття

Рис. 4.12 Результати сканування дороги з отриманням даних

Далі за допомогою функції «Unify Clouds» виконується фільтрація даних, в процесі якої відбувається первинне усереднення результатів [135]. Усереднення

полягає в автоматичному формуванні нового масиву даних за вимірними точками, що відрізняється їх регулярним розміщенням у площині 3-D. Межі сітки формування нових даних приймаються рівними межах сегментованої ділянки вимірювань, крок сітки визначається користувачем (рис 4.13). Усереднення результатів рекомендується застосовувати при контролі об'єктів, що мають підвищені вимоги до точності отримуваних вимірювань [136].

На основі отриманих сегментованих і відфільтрованих результатів залежно від обраного типу контрольної «віртуальної точки» проводиться визначення її тривимірних координат за методикою, що описана в 3 розділі. Дана процедура повторюється для кожної серії вимірювань контрольних елементів, з кожної точки установки сканера.

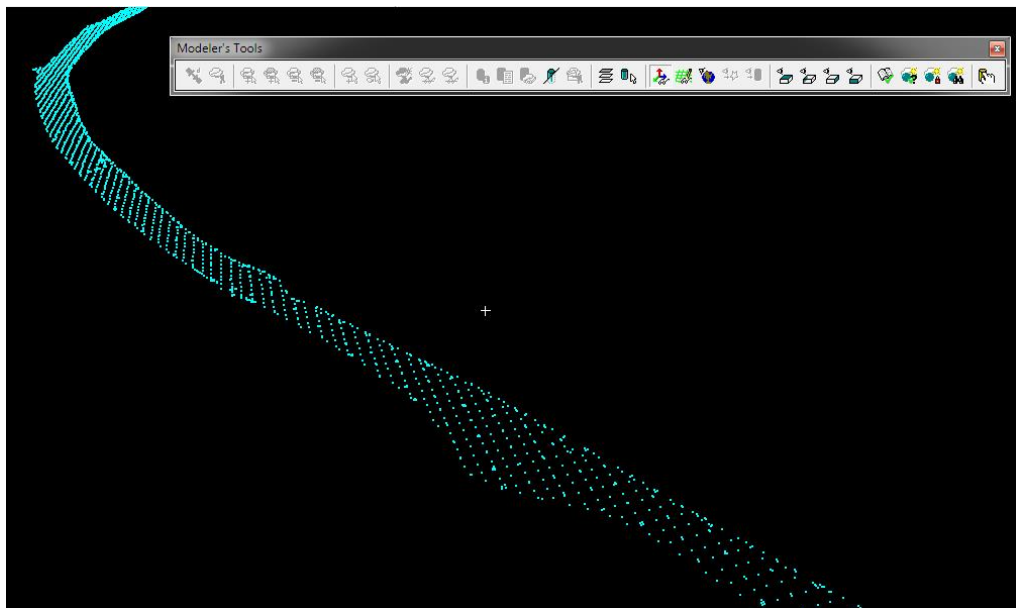


Рис. 4.13 Дорожній одяг з автоматично побудованою сіткою 30 см

Для виконання лінійно-кутових вимірів на основі даних лазерного сканування пропонується використовувати інструмент «Reference Plane» ПЗ Cyclone, за допомогою якого задається опорна площина, що відповідає умовам перпендикулярності або колінеарності відносно осей системи координат [137]. Передбачено кілька варіантів створення опорної площини [105]: в осях  $XU$ ; в осях  $XZ$ ; в осях  $YZ$ ; вільне позиціонування на основі тривимірних координат.

Можна використовувати два основних підходи використання опорної площини для визначення геометричних параметрів інженерних об'єктів:



використання «віртуальної» - опорної площини як точки початку відліку вимірювань і виконання вимірювань від площини до марок-реперів (рисунок 4.14); використання «віртуальної» - опорної площини і допоміжних векторних об'єктів для сегментування ділянок сканерних даних за заданими параметрами (наприклад, порівняння відомих висот марок-реперів).

На основі заданої за необхідними параметрами опорної площини можлива побудова допоміжних векторних моделей у вигляді двовимірних примітивів (відрізки, полілінії, полігони, кола, точки), після чого на їх основі отримують геометричні параметри.

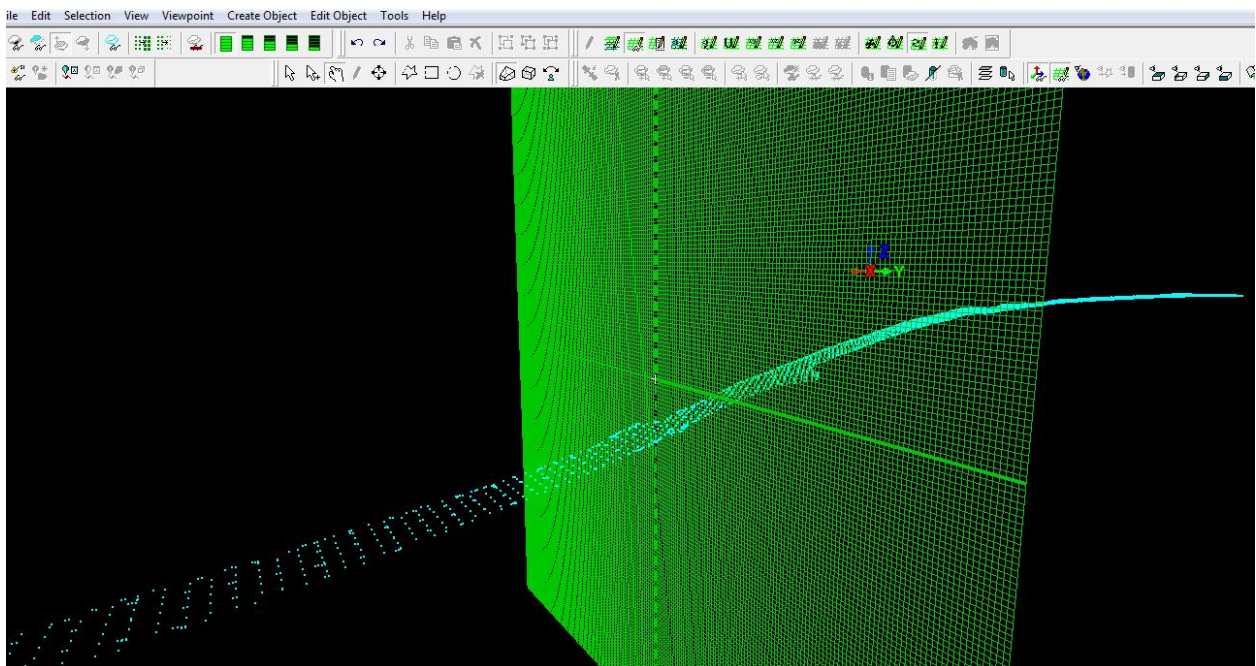


Рис. 4.14 Опорна площина в осях XZ, яка проходить крізь одяг автодороги.

Для визначення положення «віртуальних точок» рекомендовано використовувати функції «Measure - Angle (для визначення кутів) і Distance (для відстаней). Також допускається спосіб визначення «віртуальної точки» на основі векторних тривимірних моделей, вписаних у результати сканерних даних за допомогою функції «Region Grow». Даний інструмент використовує алгоритм апроксимації геометричних примітивів на основі методу найменших квадратів з подальшим виведенням звіту оцінки точності[96].

Використовуючи допоміжний векторний об'єкт «полігон» для визначення координат «віртуальної точки» і опорну площину, сегментують ділянки

сканерних даних, що описують геометричний елемент «площину» і розташовані на контрольованих елементах або марках-реперах. На основі обчислених тривимірних координат двох «віртуальних точок» геометричного центру сегментованих ділянок обчислюють відстань за формулою (4.3), яка буде характеризувати контрольовану геометричну характеристику об'єкта сканування [139].

$$M = m/\sqrt{n} \quad (4.3)$$

де  $M$  – похибка середнього виміру;  $m$ - стандартне відхилення (СКП);  $n$  – кількість вимірів.

Контроль похибки вимірювань проводиться в три основні кроки [139,140]:

а) оцінка повторюваності вимірювань для кожної контрольної «віртуальної точки» виробляється на основі її певних тривимірних координат із серії вимірювань за формулою (4.4);

$$m = \sqrt{\frac{[\delta^2]}{n-1}} \quad (4.4)$$

де  $\delta$  – відхилення окремих значень вимірюваної величини від арифметичної середини;  $n$  - кількість вимірів даної величини.

б) оцінка точності отриманих результатів вимірювань на основі даних сканування і прямих промірів іншими вимірювальними інструментами, точність яких вища, ніж заявлена виробниками НЛС, за формулами (4.5) і (4.6). Додатково виконується порівняння ряду певних тривимірних координат статичного об'єкта за формулою (4.7);

$$\Delta S = S_{\text{вим}} - S_{\text{іст}} \quad (4.5)$$

де:  $\Delta S$  – різниця між істинною та вимірюваною відстанню;  $S_{\text{вим}}$  – вимірювана відстань;  $S_{\text{іст}}$  – істинна відстань.

На основі отриманих різниць  $\Delta S$  обчислюють СКП для кожної дистанції:

$$m = \sqrt{\frac{\sum \Delta S_i^2}{n}} \quad (4.6)$$

в) розрахунок загальної середньої квадратичної похибки визначення геометричних характеристик інженерних об'єктів здійснюється за формулою:



$$m_{\text{заг}} = \sqrt{m^2 + \theta^2 + d^2} \quad (4.7)$$

де  $m_{\text{заг}}$  - загальна середня квадратична похибка визначення геометричних характеристик інженерного об'єкта;  $m^2$  - середня квадратична похибка повторюваності результату вимірювання «віртуальної точки» або «статичного об'єкта»;  $\theta^2$  - похибка компенсаційного пристрою, що приводить у горизонтальне положення НЛС;  $d^2$  - коефіцієнт впливу атмосферних умов.

#### **4.5 Аналіз результатів спостережень за деформацією лінійних споруд НЛС та класичними методами**

Аналіз результатів здійснено на прикладі лінійної споруди – автодороги «Техбаза-кладовище Західне». На даному об'єкті проводились спостереження за деформаційними процесами наступними методиками: нівелювання III класу (нівелір Topcon AT-G2); полігонометрія 2 розряду ( тахеометр South NTS-352R), GPS-спостереження (комплект приймачів Topcon Hiper+), наземне лазерне сканування (сканер Leica ScanStation 2, GNSS-приймачі Leica GX1230GG та ATX1230GG). Використовуючи дані, отримані за цими методами після камеральної обробки польових вимірів, і велась порівняльна характеристика.

Вимірювання з метою досліджень проводились автором на профільній лінії з червня 2011 року по липень 2014 року. Вимірювання включали в себе нівелювання II класу профільної лінії 2 рази на місяць. Прокладання полігонометричного ходу 4 класу 2 рази на місяць. Прив'язка вихідних пунктів профільної лінії GPS приймачами до пунктів ДГМ 1 раз на місяць. Наземне лазерне сканування об'єкту робіт, включаючи репери профільної лінії, 3 рази впродовж одного року. Така кількість виконання різних робіт дає змогу порівняти дані, отримані наземним лазерним скануванням, з класичними методами геодезії отримання координат.

Так як значення остаточних координат, у середині ходу, залежить від точності отримання вихідних пунктів, тому на профільній лінії постійно проводився контроль початкового і кінцевого пункту за допомогою супутникового навігаційного обладнання. Було використано комплект

геодезичного обладнання Topcon HiPer+. Приймач на кожному пункті фіксував дані протягом 90 хвилин, потім його переміщали на інший пункт, таким чином, приймач був встановлений на кожному пункті триангуляції. Схема прив'язки представлена на рисунку 4.15.

Прив'язка вихідних реперів "3" та "29" виконувалась від трьох пунктів ДГМ (Бажаново, Більшовик, Дубова Балка). Спочатку базова станція ставилась на пункт "Бажаново", а ровер переміщався на вихідні репери та інші два пункти ДГМ по черзі. Таким чином, ці дії склали одну сесію спостережень по прив'язці. Потім базова станція встановлювалась на пункт "Більшовик", а ровер знову переміщувався по пунктах ДГМ і вихідних реперах профільної лінії.



Рис. 4.15 Схема прив'язки вихідних реперів профільної лінії

Аналогічно виконувалась остання третя, сесія спостережень. Таким чином, прив'язка одного вихідного реперу складалась з трьох сесій спостережень. При обробці даних отриманих у процесі спостереження навігаційним обладнанням, виконувалось зрівнювання результатів. Отже, координати кожного вихідного репера були отримані тричі. Зрівнювання виконувалось у програмному комплексі "Topcon Tools". Отримані результати однієї сесії представлені на рисунку 4.16.

На рисунку 4.16 наведена схема прив'язки опорних пунктів до мереж ДГМ. На рисунку представлена сесія спостережень, де базова станція стоїть на пункті ДГМ "Дубова Балка". Також у цьому програмному комплексі виконано

зрівнювання GPS-спостережень і отримано вже зрівняні координати пунктів з середньою квадратичною похибкою в плані та по висоті, які представлені на рисунку. З трьох сесій для кожного пункту обчислювались середні значення, які і були остаточними. Ці розрахунки представлені в таблиці 4.7.

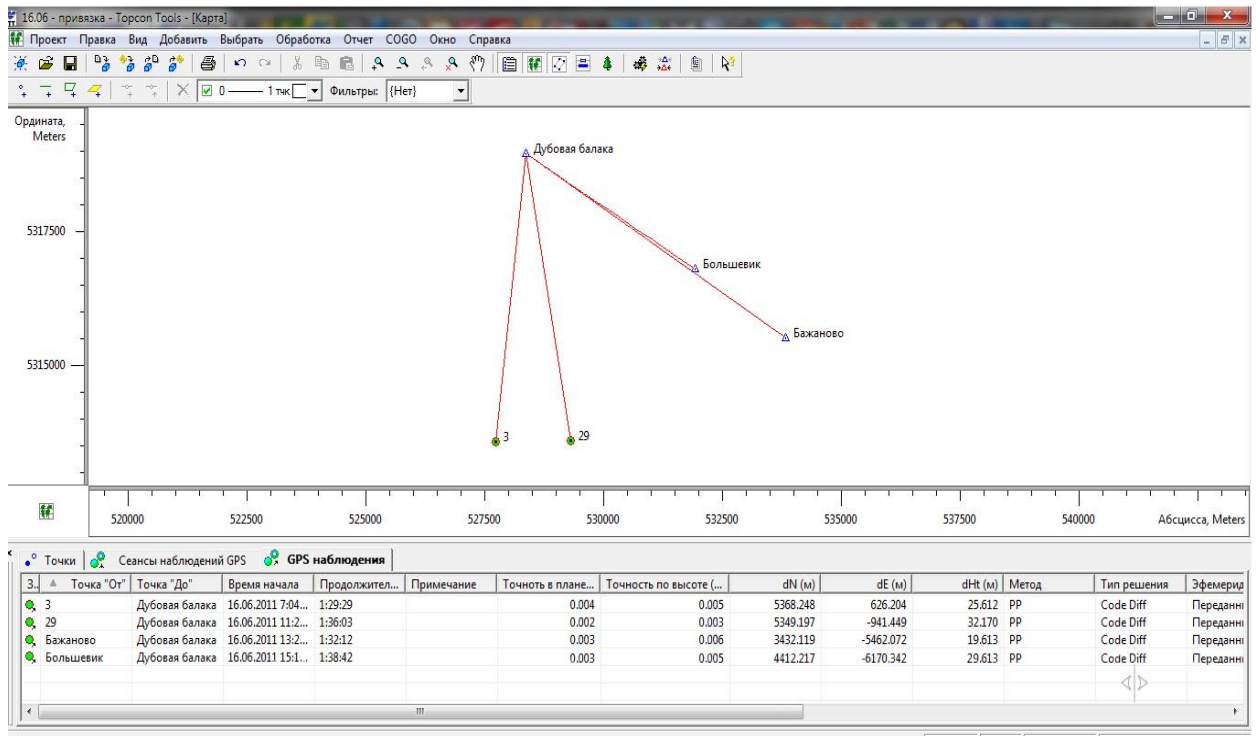


Рис. 4.16 Схема прив'язки опорних пунктів

Таблиця 4.7

#### Розрахунок координат вихідних реперів

№ реперу	X	Y	H
29	5311093,511	6529133,563	93,034
	5311093,504	6529133,569	93,030
	5311093,505	6529133,568	93,034
<b>середнє</b>	<b>5311093,507</b>	<b>6529133,567</b>	<b>93,033</b>
3	5311631,075	6530602,164	98,314
	5311631,077	6530602,159	98,316
	5311631,081	6530602,153	98,325
<b>середнє</b>	<b>5311631,078</b>	<b>6530602,159</b>	<b>98,318</b>

Після визначення координат вихідних реперів визначались координати робочих реперів профільної лінії з полігонометрії та нівелювання. З метою меншого загромождження роботи графічними даними був обраний період спостережень, який відповідає спостереженням наземним лазерним сканером, для



подальшого порівняння отриманих даних різними методами. Ці спостереження виконувались у період 2011-12рр. Також були обрані репери, які вимірювались як нівеліром, тахеометром, так і НЛС - це репери 3-19, та репери зйомочного об'грунтування НЛС (рис. 4.17). На цьому рисунку виділена область реперів, які використовувались у всіх спостереженнях профільної лінії.

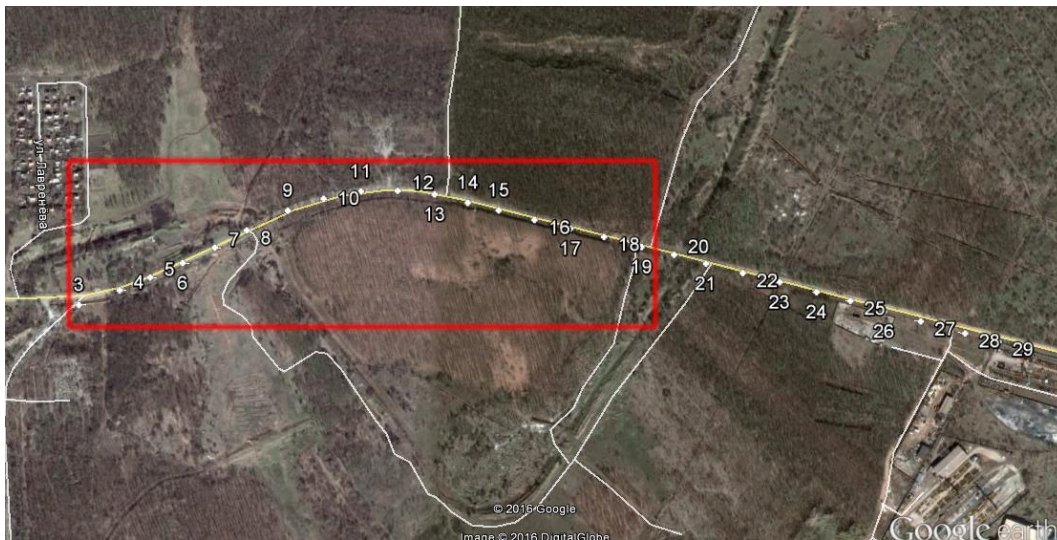


Рис 4.17 Спільні репери для спостережень

На рисунку 4.18 зображені області, у яких велись спостереження НЛС та спостереження з нівелювання, полігонометрії та сейсмічного профілювання.



Рис 4.18 Области ведення робіт

Розглянемо результати нівелювання в період з травня 2011 року по жовтень 2012 року. У таблиці 4.8 представлені зміщення за період з 01 липня 2011 року по 06 квітня 2012 року. У травні 2012 року профільна лінія була частково зруйнована міськими службами, які виконували розчищення дороги грейдерами. Тому дані

представлені саме до цього періоду. Так як деякі репери закладались заново, то порівняння їх даних з накопиченими раніше не мало сенсу.

Графік результатів нівелювання представлений на рисунку 4.19. Графік побудований на основі даних нівелювання за період вересень-жовтень 2012 року, що збігається з останнім етапом наземного лазерного сканування для його подальшого порівняння.

Так як максимальна висотна нев'язка за весь період спостережень склала 3 мм, що в межах допустимої похибки нівелювання III класу [126] (тому що  $10\sqrt{1,4} = 11,8 \text{ мм} > 9 \text{ мм}$ ). Звідси робимо висновок, що нівелірні ходи, які прокладались між реперами, відповідають нівелюванню II класу. Для уникнення загромождження отриманими даними в роботі, їх відображення буде наведено нижче у вигляді порівняльних таблиць з даними, що отриманні під час НЛС.



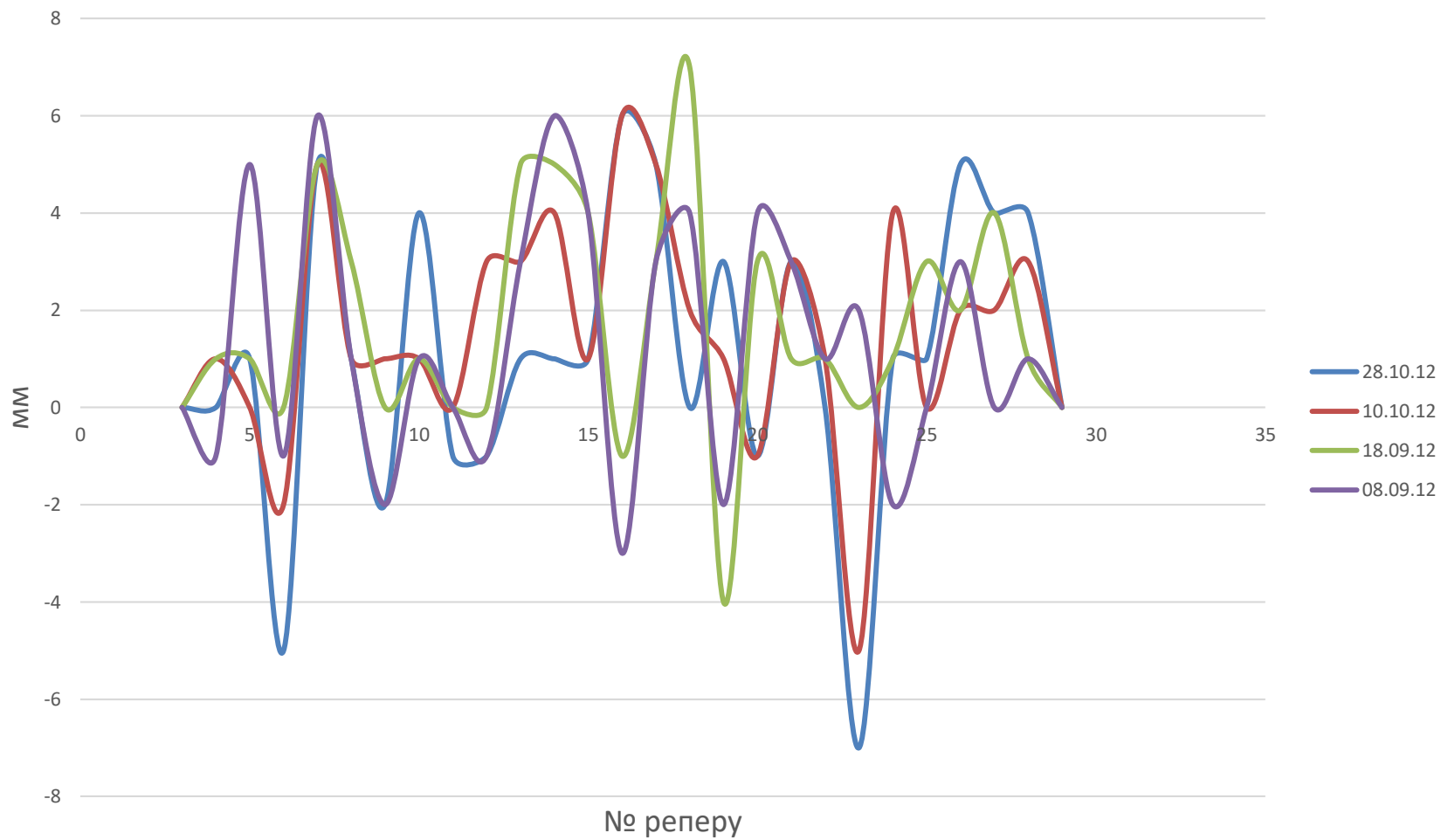


Рис. 4.19 Зміщення реперів за висотою

Полігонометрія велась за тими самими реперами, що і нівелювання. Для цього було прокладено полігонометричний хід між двома вихідними реперами. Отриманні координати були взяті за вихідні значення для подальшого порівняння їх з даними сканування. Основні параметри ходу представлені в таблиці 4.9. У таблиці 4.10 демонструється відомість оцінки точності полігонометричного ходу. При цьому мінімальна помилка склала 2 мм, а максимальна 5 мм, середня помилка складає 4 мм. Зрівнювання виконувалось у програмному комплексі Credo\_DAT.

Таблиця 4.9

Основні характеристики полігонометричного ходу

Клас	Загальна довжина ходу, м	Довжина ліній, м			Кутова нев'язка		Лінійна нев'язка	
		Min	Max	Середня	Fb max	Fb гран.	Fs max	[S]/Fs
4 клас	1638.870	54.806	77.905	32.777	0°00'0.06"	0°00'20.0"	0.010	161536

На рисунку 4.20 показано частину ходу, що зрівнювався у програмному комплексі Credo\_DAT

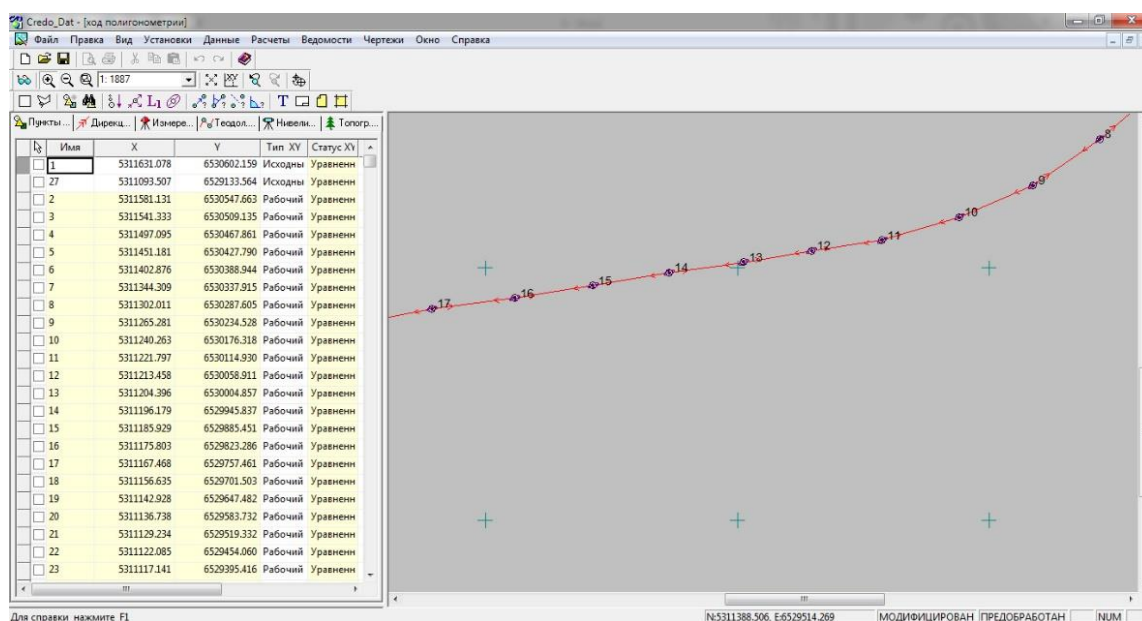


Рис.4.20 Зрівнювання полігонометричного ходу



Таблиця 4.10

Оцінка точності положення реперів за результатами зрівнювання

Пункт	M, м	M <sub>x</sub> , м	M <sub>y</sub> , м	a, м	b, м	α
1	2	3	4	5	6	7
4	0.002	0.001	0.002	0.002	0.000	48°30'17.05"
5	0.003	0.002	0.002	0.003	0.000	48°18'57.13"
6	0.003	0.002	0.002	0.003	0.001	48°39'45.71"
7	0.003	0.002	0.003	0.003	0.001	49°09'31.25"
8	0.004	0.002	0.003	0.004	0.001	49°47'27.62"
9	0.004	0.003	0.003	0.004	0.001	51°27'23.05"
10	0.004	0.003	0.003	0.004	0.001	53°52'07.56"
11	0.004	0.003	0.004	0.004	0.001	56°33'20.08"
12	0.004	0.002	0.004	0.004	0.001	59°35'33.53"
13	0.005	0.002	0.004	0.004	0.001	62°32'56.64"
14	0.005	0.002	0.004	0.004	0.002	65°07'54.18"
15	0.005	0.002	0.004	0.004	0.002	67°25'09.54"
16	0.005	0.002	0.004	0.004	0.002	69°32'39.16"
17	0.005	0.002	0.004	0.004	0.002	71°29'33.09"
18	0.005	0.002	0.004	0.004	0.002	73°16'35.75"
19	0.004	0.002	0.004	0.004	0.002	74°52'51.19"
20	0.004	0.002	0.004	0.004	0.001	76°20'18.13"
21	0.004	0.002	0.004	0.004	0.001	77°55'36.59"
22	0.004	0.001	0.004	0.004	0.001	79°06'56.74"
23	0.004	0.001	0.004	0.004	0.001	80°17'08.32"
24	0.004	0.001	0.003	0.004	0.001	81°21'16.90"
25	0.003	0.001	0.003	0.003	0.001	82°04'24.23"
26	0.003	0.001	0.003	0.003	0.001	82°24'04.49"
27	0.003	0.001	0.003	0.003	0.000	82°50'37.04"
28	0.002	0.000	0.002	0.002	0.000	83°21'55.87"

Відносна нев'язка ходу, який прокладався одночасно з веденням наземного лазерного сканування, задовольняє полігонометрії 4 класу [125].

На рисунках 4.21, 4.22 представлені результати спостережень, що відповідають періоду, в який виконувався останній V етап спостереження НЛС.

Після отримання даних класичними методами геодезії (нівелювання, полігонометрія) були отримані дані з наземного лазерного сканування. Нижче наведена порівняльна характеристика спільних об'єктів вимірювання.

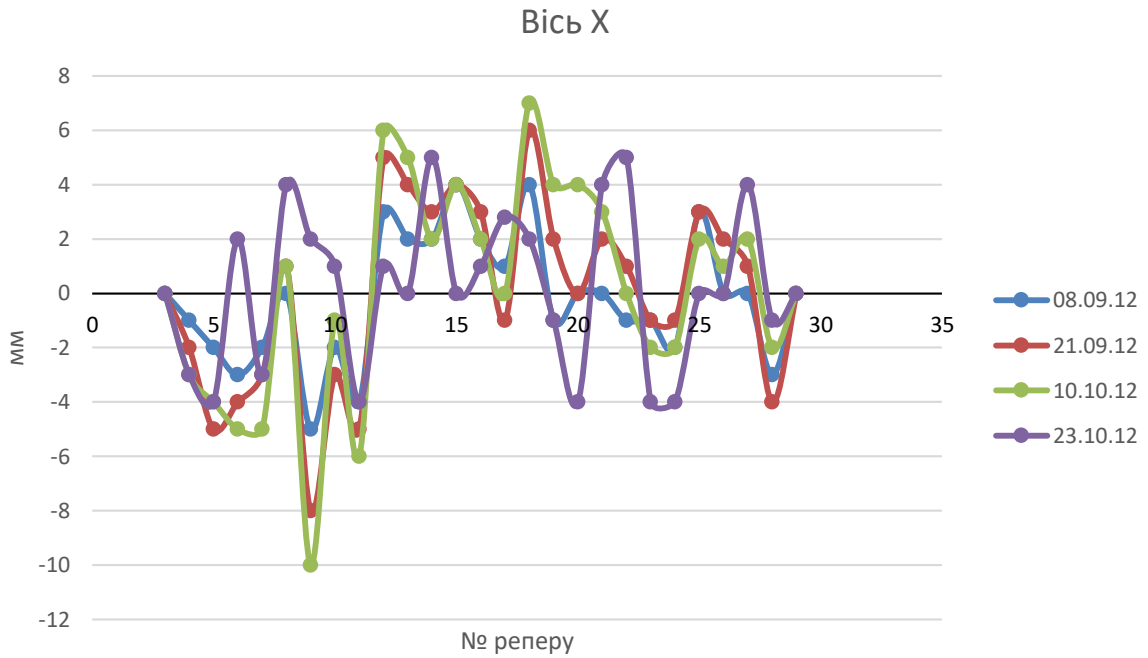


Рис. 4.21 Зміщення реперів профільної лінії по осі X

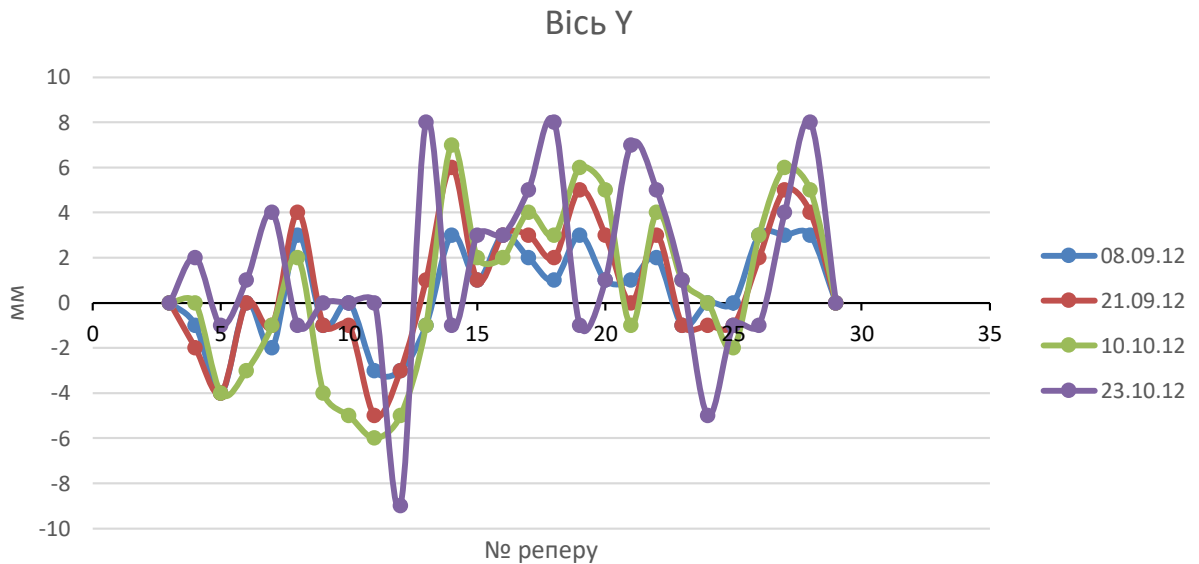


Рис. 4.22 Зміщення реперів профільної лінії по осі Y

На останньому етапі робіт - з наземного лазерного сканування - координати точок тимчасової знімальної мережі для побудови TIN-моделі нерегулярної поверхні покриття проїжджої частини обстеженої ділянки автодороги визначені в вересні 2012 року. Зміщення моделей за результатами наземного 3D-сканування велось відносно St1, при цьому точність в плані складає не більше  $\pm 11$  мм, а за висотою не більше  $\pm 10$  мм. Зрівнювання і оцінка точності координат велась у програмному комплексі «CycloneSCAN» (рис.4.23).

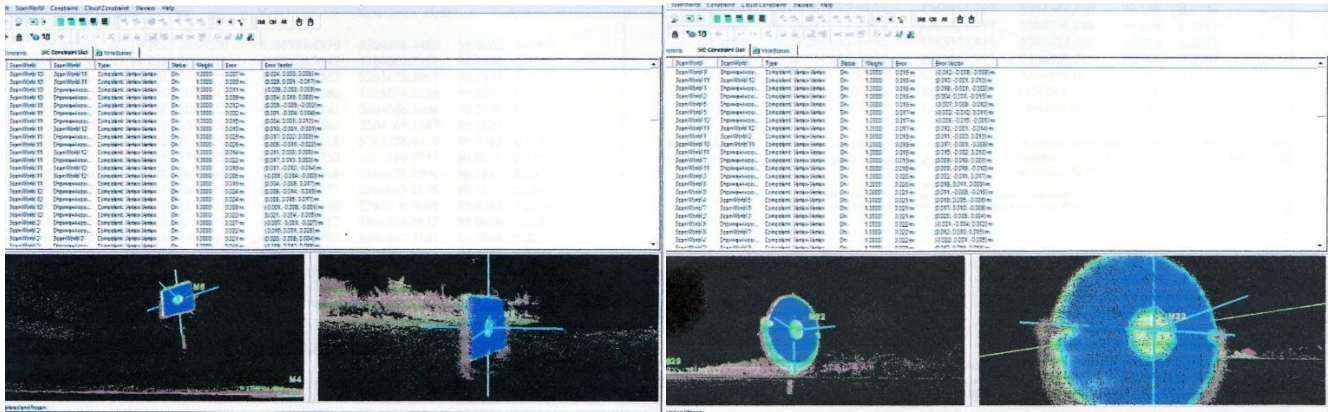


Рис. 4.23 Зрівнювання і оцінка точності координат точок тимчасової знімальної мережі в ПК «CycloneSCAN»

Основні робочі величини і умови сканування, на V етапі виконання робіт, були в межах величин, що представленні в таблиці 4.11.

Таблиця 4.11

Основні робочі величини сканування

Назва робочих величин (умов) сканування	Значення робочих величин (умови сканування)	Примітки
Точність визначення центра марки відносно станції сканування	± 2 мм	
Точність координованих точок об'єкту сканування відносно станції сканування	± 5 мм	
Крок (щільність) сканування: для всього об'єкту для області установки марок	10 мм на 50м 1 мм на 10м	
Максимальна відстань між станціями сканування	200м	
Точність «зшивання» окремих сканів в загальну хмарину координованих точок відносно першої станції сканування	± 25 мм	
Визначення смуги сканування	Дорожній одяг на ділянці сканування	На TIN-моделі відтворюються реальні розміри покриття і узбіччя дороги
Загальна довжина автодороги для сканування	1200 м	
Кількість станцій сканування	13	
кількість точок тимчасової знімальної мережі	35	

Абрис зшитих хмарин координованих точок проїжджої частини всієї ділянки автодороги з реперами профільної лінії наведено на рисунку 4.24.

Тепер TIN-модель нерегулярної поверхні відсканованої проїжджої частини ділянки автодороги будується в ПК «Cyclone 7.0». Тверде покриття дороги відтворене за фактичними розмірами і положенням у просторі. Часткові ушкодження асфальту (ями), утворені внаслідок інтенсивного руху автотранспорту і не пов'язані з деформаціями одягу дороги, на TIN-моделях не демонструвались з метою зменшення графічного навантаження, а також для виявлення реальних ділянок, що зазнали деформацій. Узбіччя дороги відтворене за фактичними розмірами і положенням у просторі.

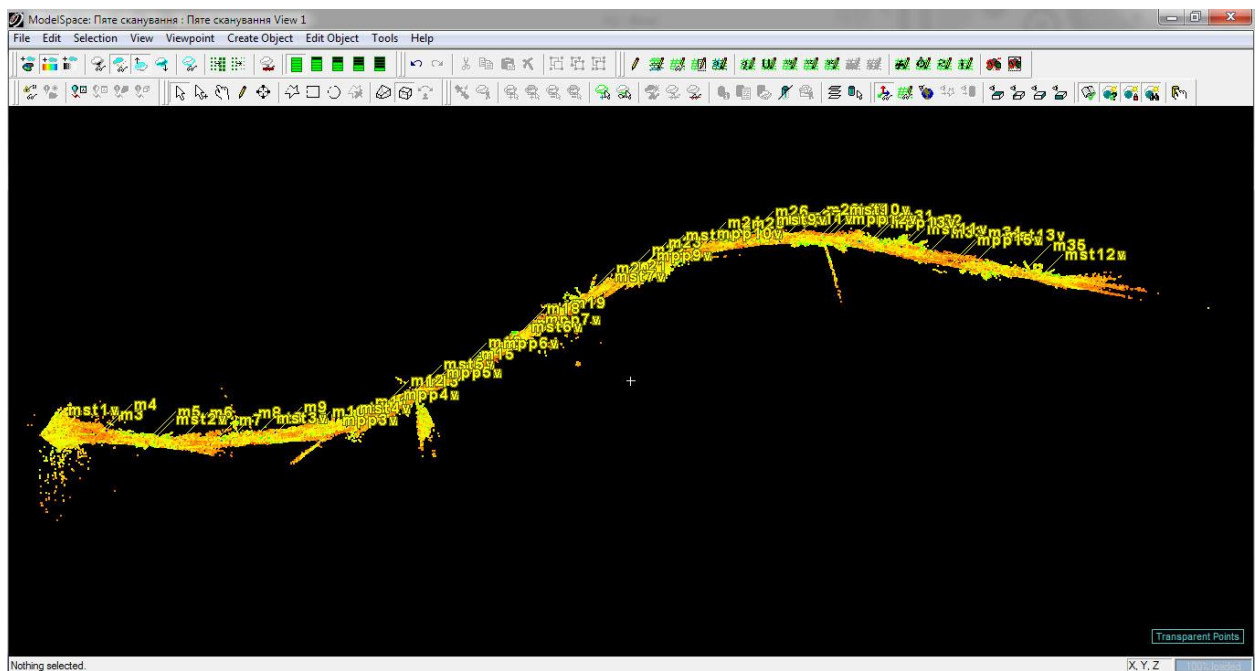


Рис. 4.24 Абрис хмарин координованих точок на проїжджу частину всієї відсканованої ділянки автодороги

Після обробки матеріалів сканування за отриманими даними, створено топографічний план, який відповідає вимогам інструкції [90] та 3D-модель місцевості. Частина топографічного плану зображена на рисунку 4.25.

Для розуміння якості сканування, у ПЗ Credo\_DAT, зроблена оцінка сканерного ходу. Використовувались опорні марки для зшиття сканів як вихідні пункти для оберненої засічки. Після розрахунків отримано наступні величини: середня довжина ліній 38,419 м; загальна довжина ходу 1124,349 м; кутова

нев'язка максимальна 6,9"; лінійна нев'язка максимальна 0,012 м; відносна нев'язка 1/33700.

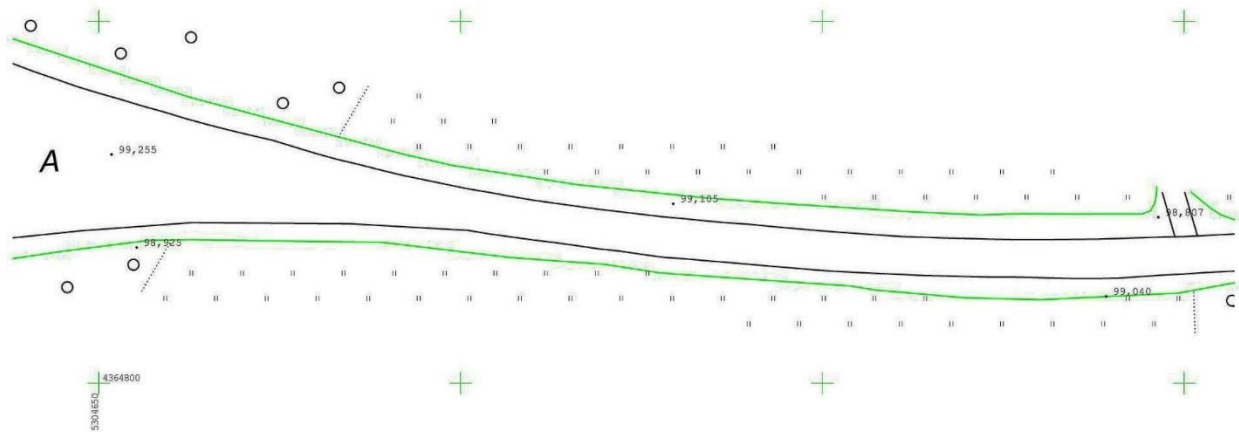


Рис. 4.25 Зразок топографічного плану, що створений за даними наземного лазерного сканування

Для детального аналізу деформацій на дорожньому одязі порівняння даних, що отриманні у різні періоди спостережень, було вирішено проводити частинами. Таким чином, вся ділянка автодороги «Техбаза - кладовище «Західне» була розбита на окремі відрізки, за якими проводився аналіз. Схема розподілу відрізків наведена на рисунку 4.26.

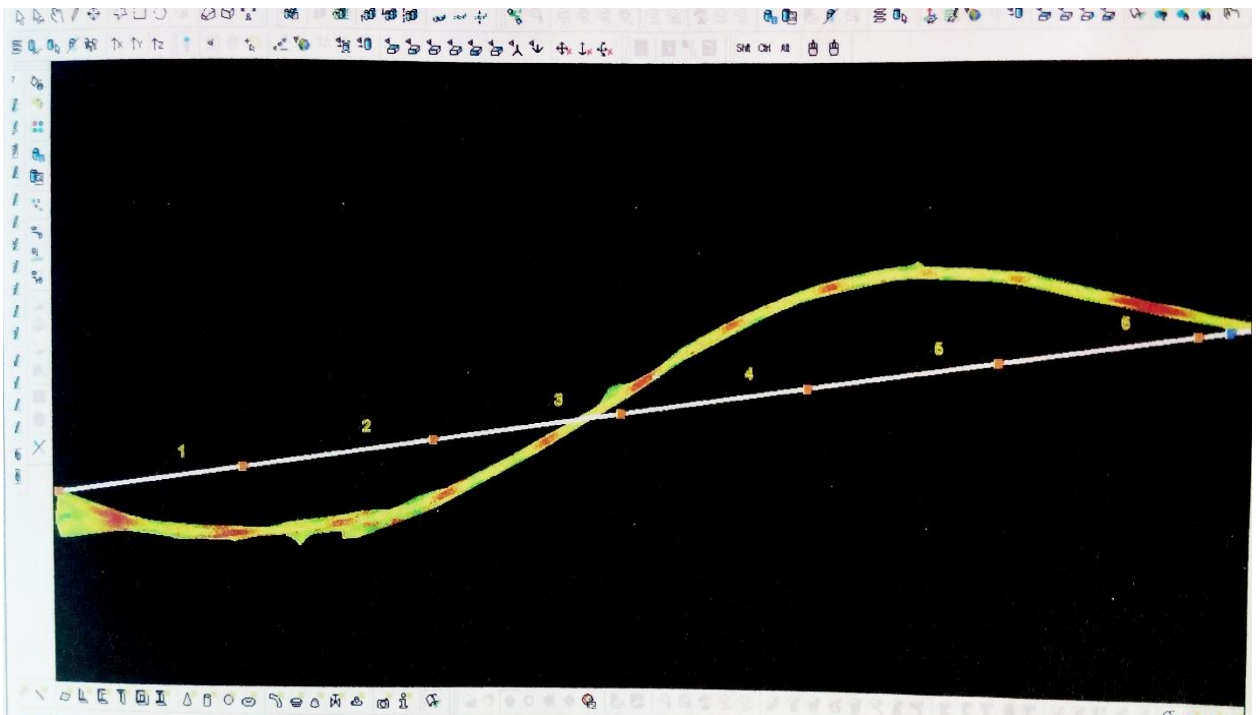


Рис. 4.26 Поділ всієї ділянки автодороги «Техбаза - кладовище «Західне» на відрізки, за якими проводиться аналіз

Для проведення подальшого аналізу і побудови графіків розбіжностей за осями координат  $X$ ,  $Y$  і за висотою вибрано крок між суміжними точками вздовж всієї кривої ділянки автодороги - 3 метри.

Точки країв відрізків, за якими проводиться аналіз всієї ділянки автодороги, пізнані на TIN-моделях нерегулярної поверхні проїжджої частини з двох різних сканувань за елементами подібності і точками тимчасові знімальної мережі. На кожному відрізку ділянки автодороги «Техбаза - кладовище «Західне» аналізу підлягають лінії лівого (північного), правого (південного) країв твердого покриття та осьова лінія автодороги. Це полілінії, які побудовані і відображені на кожній з TIN-моделей нерегулярної поверхні.

З врахуванням простягання досліджуваної ділянки автодороги із заходу на схід відрізки накладених одна на одну TIN-моделей нерегулярної поверхні з різних періодів сканувань спроектовані на пряму лінію, паралельну осі  $Y$ . Початок першого відрізка (0м - 180м) віддалений від St1 на 14,473 м.

Тепер за кожним відрізком складені графіки розбіжностей TIN-моделей нерегулярної поверхні проїжджої частини ділянки автодороги з двох останніх сканувань за осями координат  $X$ ,  $Y$  і за висотою  $H$ .

Абрис накладених одна на одну TIN-моделей нерегулярної поверхні проїжджої частини з 1-го по 6-ий відрізок наведено в додатку Б.

За результатами проведеного аналізу графіків розбіжностей TIN-моделей регулярної поверхні проїжджої частини ділянки автодороги «Техбаза-кладовище «Західне» за осями координат  $X$ ,  $Y$  і за висотою  $H$  з двох останніх сканувань зроблено наступні висновки.

Деформації твердого покриття автодороги в плані на досліджуваній ділянці за період 1 рік не суттєві. Розбіжності TIN-моделей нерегулярної поверхні проїжджої частини ділянки автодороги за полілініями країв і осі твердого покриття з останніх сканувань за віссю координат  $X$  не перевищують  $\pm 0,010$ м, що є в межах точності вимірювань, за віссю координат  $Y$  не перевищують  $\pm 0,010$ м, що є в межах точності вимірювань.

За висотою Н виявлені деформації твердого покриття автодороги в період 1 року досліджень, які складають:

- на відрізку 1 (0 м - 180 м) в межах від -0,022м до +0,010м;
- на відрізку 2 (180 м - 360 м) в межах від -0,022м до +0,000м;
- на відрізку 3 (360 м - 540 м) в межах від -0,022м до +0,000м;
- на відрізку 4 (540 м - 720 м) в межах від -0,058м до +0,005м;
- на відрізку 5 (720 м - 900 м) в межах від -0,090м до -0,050м;
- на відрізку 6 (900 м - 1080 м) в межах від -0,108м до -0,075м.

Найактивніше просідання твердого покриття автодороги відбувається на ділянці, яка спостерігається від 585 метрів (0,000м) до кінцевої точки спостережень – 1080 метрів (-0,108 м). Відповідно, має місце просідання і на частині твердого покриття автодороги далі - в бік «Техбази».

Під час виконання робіт з наземного лазерного 3D-сканування проїжджої частини ділянки автодороги «Техбаза - кладовище Західне» результати отримано та опрацьовано в ПЗ «Суслопе», «AutoCAD», «Graph».

Після опрацювання останніх сканувань зроблено наступні висновки.

1. Виявлені вертикальні (за висотою Н) деформації твердого покриття і ділянки автодороги в межах від -0,108м до +0,010 м.
2. Деформацій у плані твердого покриття на досліджуваній ділянці автодороги «Техбаза - кладовище «Західне» незначні (в межах похибки приладу).
3. Вибрані відстань між суміжними станціями сканування і крок сканування дозволили отримати координовані точки зі щільністю не гірше 1 точка на 2,5 дм<sup>2</sup> вздовж всієї досліджуваної ділянки автодороги «Техбаза - кладовище «Західне»
4. Вертикальні деформації твердого покриття досліджуваної ділянки автодороги, виявлені на останніх етапах робіт (вересень 2012), - сумарно 173 мм (65мм у вересні 2011, 108 мм у вересні 2012), належить рахувати критичними і небезпечними для її подальшої експлуатації.

Для подальшого порівняння результатів отриманих деформацій, вирішено зробити 3-D модель автодороги на яку буде нанесено всі дані.

Спочатку з'єднуються з різних відрізків і наносяться на модель полілінії твердого покриття, всього створено 3 полілінії у кожному скануванні: північна,

південна та осьова. На рисунку 4.27 показані відхилення за осьовою лінією у місці з найбільшими значеннями; відхилення по всій дорозі вказані в додатку 1.

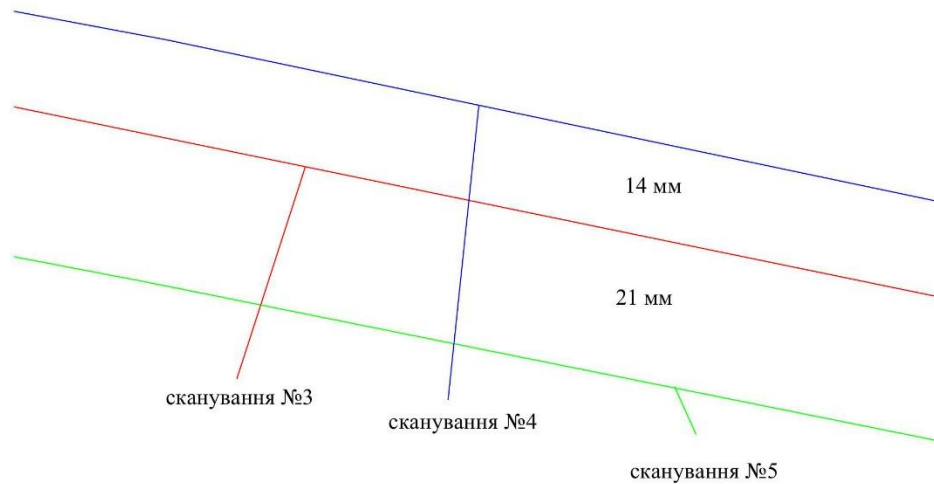


Рис. 4.27 – відхилення поліліній в плані з трьох сканувань

Полілінії побудовані з щільністю 3,2 метри см; таким чином, вся протяжність автодороги поділена на 360 відрізків. Тобто кожна 1/360 частина автодороги проаналізована, що значно перевищує кількість реперів у профільній лінії. При цьому, за необхідності в більш детальному аналізі, відрізки можуть бути зменшені - і тим самим збільшена кількість ділянок, що аналізуються. Це дає змогу побудувати графіки відхилення за висотою, що представлені на рисунку 4.28. Графіки відображають осьову лінію та південну, вздовж якої закріплені реperi, для нівелювання, що дає змогу зробити перший аналіз деформацій, визначених різними методами.





Рис. 4.28 Графіки зміщення положення центра та південного краю автодороги

З графіків видно, що за осьовою лінією деформації відбуваються плавніше і немає різких перепадів. Це пов'язано зі складністю визначення північного та південного країв автодороги, так як немає чіткого краю, що викликає помилкові визначення краю при різних скануваннях. Помітно, що за осьовою лінією на відрізку 161-241(515-770 м) відбуваються просідання, а на відрізку 301-360 (960-

1150 м) - підйом одягу. На південній лінії напрям деформацій той самий, але значення дещо менші і на графіку майже не помітні.

Поверхня дороги знята за допомогою сканера, загальна кількість точок при одному зніманні всієї ділянки складає в середньому 1,8 млн точок. На рисунку 4.29 представлена ділянка дороги знята під час третього та четвертого сканування, потім побудовані їх моделі по регулярній поверхні та відняті одна від одної.

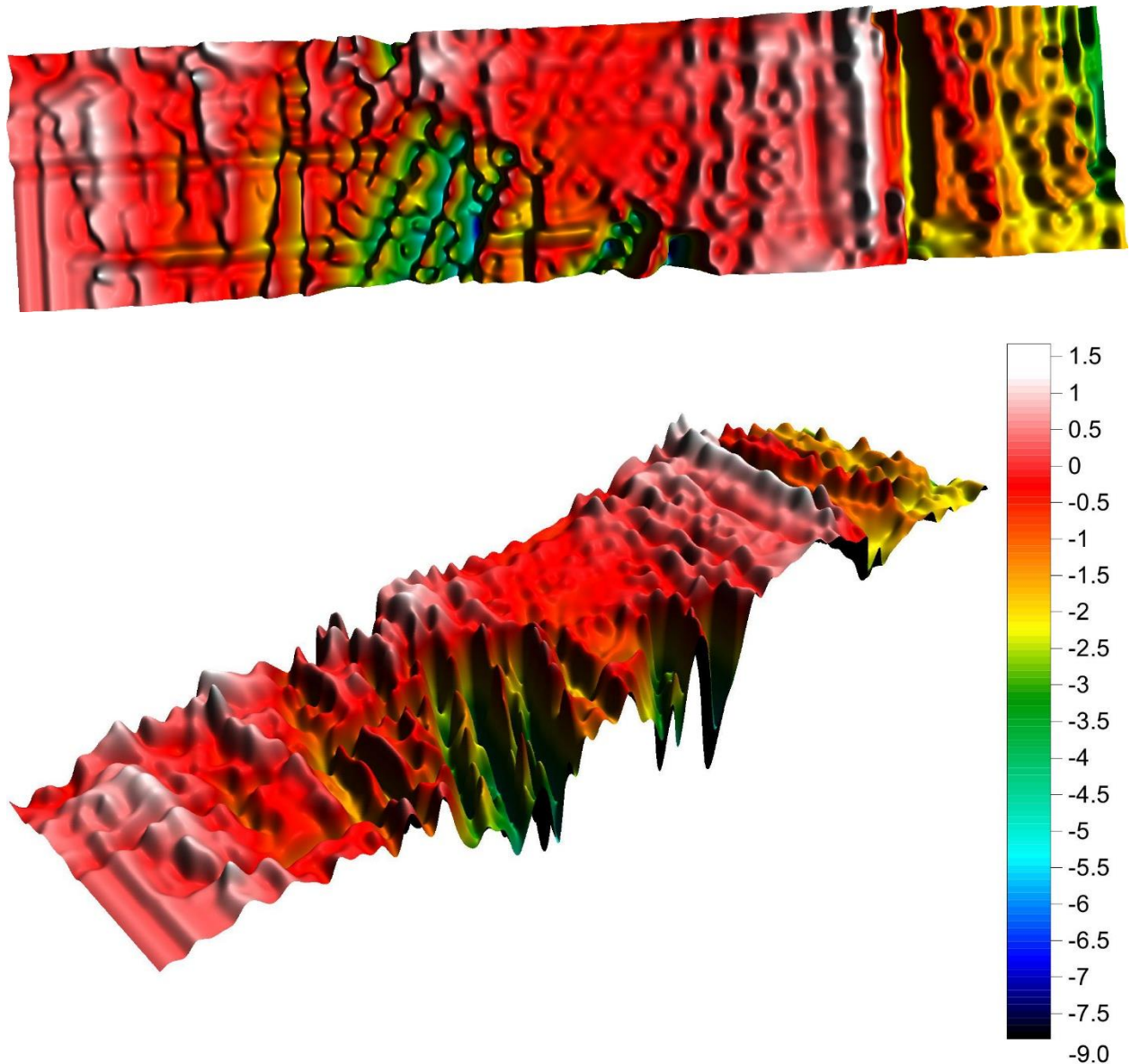


Рис. 4.29 Віднімання поверхонь, отриманих під час 3 та 4 сканувань (на шкалі дані наведені в сантиметрах)

З верхньої частини рисунку чітко видно продовгуваті виїмки, що виникають від великовантажних автомобілів, також можна виявити загальні напрямки та форми просідань покриття дороги.

Порівняльна характеристика НЛС за даними, отриманими під час ведення робіт з нівелювання та полігонометрії, наведено нижче. Але треба зауважити, що дані, отримані під час полігонометрії та нівелювання, відображають положення дороги тільки в місцях закріплення реперів, на відміну від повного покриття даними всього одягу дороги. Тому порівняння зроблено на реперах, які визначались спільно під час ведення усіх видів робіт. Порівняння виконано за останнім, п'ятим, скануванням, що здійснювалось у вересні 2012 року. Нижче представлені порівняльні дані. У таблиці 4.12 представлені координати реперів, що отримані з нівелювання, полігонометрії та з наземного лазерного сканування.

Таблиця 4.12

## Координати, отримані різними методами

№	Класичні методи			НЛС			Відхилення, мм		
	X	Y	H	X	Y	Z	X	Y	Z
19	5311167.462	6529757.462	97.097	5311167.464	6529757.456	97.099	2	-6	2
18	5311175.797	6529823.290	96.247	5311175.804	6529823.290	96.237	7	0	-10
17	5311185.924	6529885.458	96.217	5311185.919	6529885.458	96.213	-5	0	-4
16	5311196.174	6529945.843	96.134	5311196.179	6529945.837	96.125	5	-6	-9
15	5311204.392	6530004.863	96.657	5311204.387	6530004.860	96.649	-5	-3	-8
14	5311213.454	6530058.916	97.922	5311213.455	6530058.917	97.915	1	1	-7
13	5311221.794	6530114.933	98.274	5311221.793	6530114.936	98.278	-1	3	4
12	5311240.261	6530176.321	98.949	5311240.255	6530176.326	98.953	-6	5	4
11	5311265.279	6530234.530	98.821	5311265.273	6530234.533	98.83	-6	3	9
10	5311302.011	6530287.609	98.455	5311302.012	6530287.613	98.464	1	4	9
9	5311344.311	6530337.92	97.815	5311344.314	6530337.924	97.807	3	4	-8
8	5311402.876	6530388.947	97.372	5311402.883	6530388.945	97.370	7	-2	-2
7	5311451.182	6530427.793	97.239	5311451.188	6530427.788	97.235	6	-5	-4
6	5311497.098	6530467.865	97.305	5311497.100	6530467.872	97.310	2	7	5
5	5311541.334	6530509.136	97.311	5311541.337	6530509.131	97.320	3	-5	9
4	5311581.132	6530547.664	97.489	5311581.135	6530547.667	97.491	3	3	2
3	5311631.078	6530602.159	98.319	5311631.078	6530602.159	98.319	0	0	0

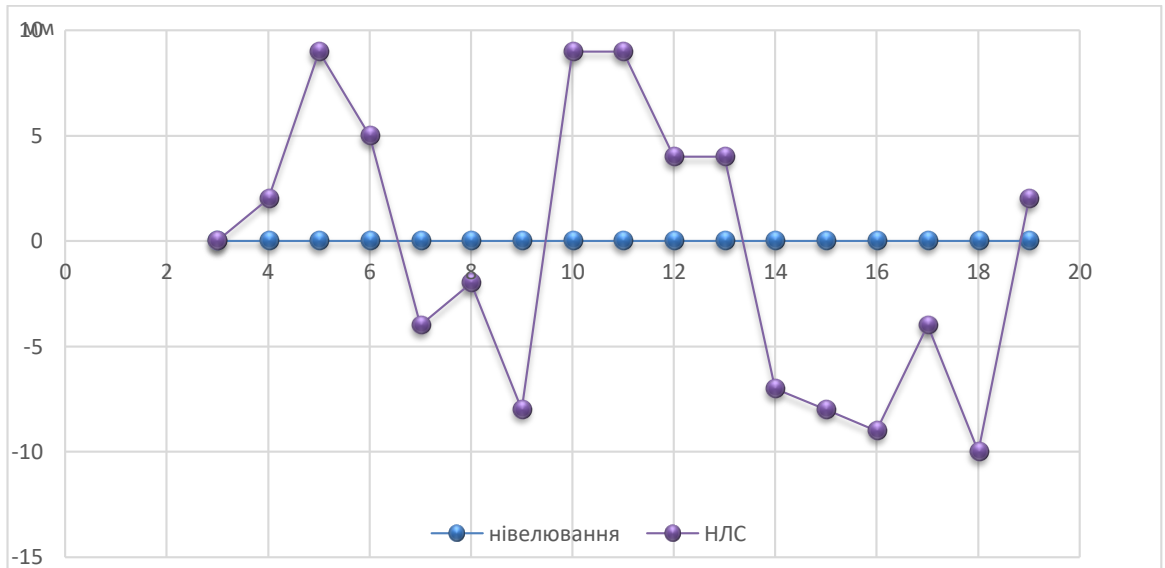


Рис. 4.30 – графік відхилень висотних відміток

На рисунку 4.30 показані вертикальні відхилення на реперах, за початок відліку взяті дані нівелювання. Якщо вибрати максимальне і мінімальне відхилення, отримаємо розбіжність в 19 мм, саме таку максимальну розбіжність за даними між наземним лазерним скануванням і нівелюванням було отримано.

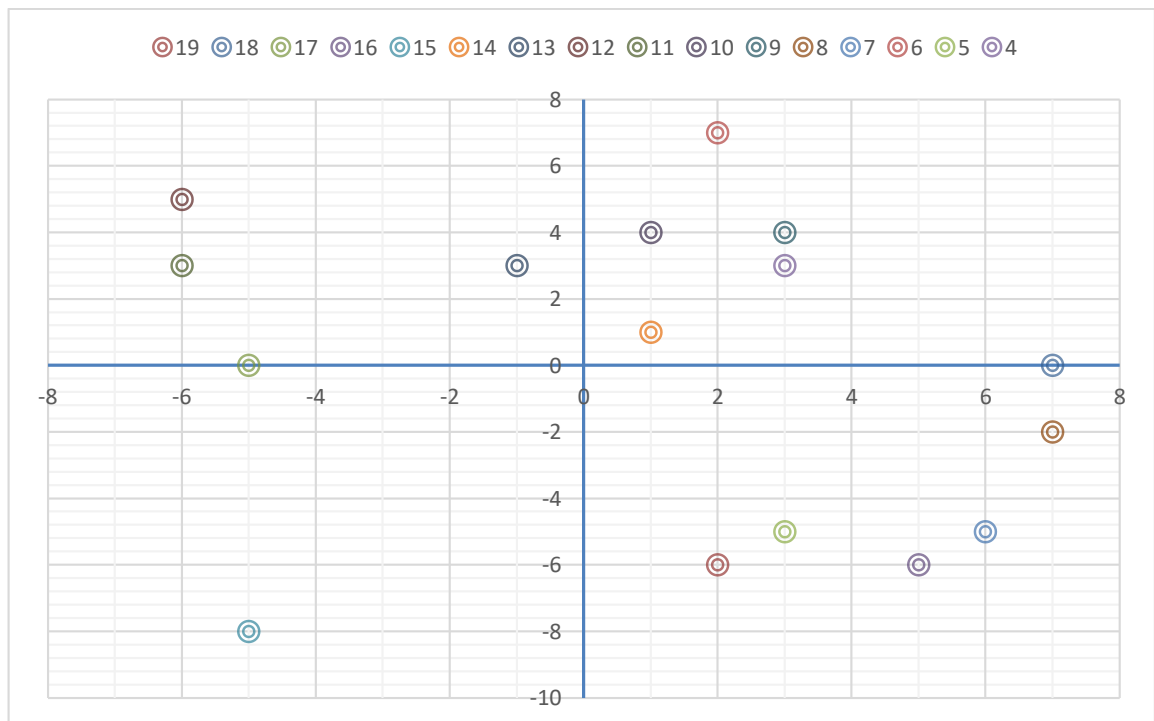


Рис. 4.31 Графік відхилень реперів у плані, значення в мм

На рисунку 4.31 показані планові відхилення реперів. За нуль взяті результати полігонометрії, для аналізу отриманих даних нижче наведені результати середніх квадратичних відхилень.

Планові координати порівнювались між полігонометрією і наземним скануванням.

Характеристикою точності окремого вимірювання слугує середня квадратична помилка. Для її знаходження необхідно знати істинні або максимально наближені до них значення. Взевши за істинні значення, координати, що отримані з полігонометрії, можемо знайти помилки наземного лазерного сканування для одного значення за формулою 4.8 [141].

$$m = \sqrt{\frac{\Delta_1^2 + \Delta_2^2 + \dots + \Delta_n^2}{n}} \quad (4.8)$$

де  $n$  – кількість вимірів.

Порівняння виконано за реперами 4-19, на яких велись спільні спостереження. Розрахунки наведені в таблиці 4.13.

Таблиця 4.13

## Визначення середніх квадратичних помилок

№	відхилення, мм <sup>2</sup>			
	$\Delta X^2$	$\Delta Y^2$	$\Delta H^2$	$\Delta S^2$
19	4	36	4	43.3
18	49	0	100	3.7
17	25	0	16	18.0
16	25	36	81	2.5
15	25	9	64	24.4
14	1	1	49	2.8
13	1	9	16	0.2
12	36	25	16	3.4
11	36	9	81	23.1
10	1	16	81	1.7
9	9	16	64	0.9
8	49	4	4	7.1
7	36	25	16	23.8
6	4	49	25	55.6
5	9	25	81	31.0
4	9	9	4	18.0
	$m_x=4.5$	$m_y=4.1$	$m_z=6.6$	$m_p=4.0$
	$f_x=-0.001$	$f_y=-0.009$	$f_H=0.009$	$f_{\text{відн}}=1/103349$

Основними критеріями, що визначають можливість застосування НЛС для моніторингу подібних об'єктів, є здатність забезпечити високу продуктивність

знімальних робіт при достатній детальності і точності отримуваних точкових моделей. Це визначається поєднанням високої дальності дії, швидкості виконання вимірювань, широкого кута поля зору і достатнього кутового кроку сканування.

Для створення цифрових тривимірних моделей складних технологічних вузлів і устаткування НЛС повинен забезпечувати високу точність і детальність отримуваних даних. При цьому висока дальність дії не грає значної ролі, тому що внаслідок щільного розташування елементів об'єкта при роботі з однієї станції виникає безліч тіньових зон, які усуваються тільки завдяки збільшенню кількості станцій.

На основі аналізу перерахованих вище факторів запропоновані вимоги до технічних характеристик НЛС з метою моніторингу лінійних об'єктів, що представлено в таблиці 4.14.

Таблиця 4.14

Вимоги до технічних характеристик НЛС для моніторингу лінійних споруд

Технічні характеристики	завдання, які вирішуються	
	Створення цифрових тривимірних моделей	моніторинг лінійних споруд
Максимальна дальність дії, м	>100	> 50
Точність вимірювання відстаней, мм	≤10	<5
Розбіжність лазерного випромінювання, мрад	≤0,25 (діаметр плями ≤ 1,2 см на відстані 50 м)	≤0,11 (діаметр плями ≤0,5см на відстані 100 м)
Швидкість виконання вимірювань, точок/с	≥4 000 (дозволяє отримувати 5 млн. точок за час ≤20 хв)	≥4 000 (дозволяє отримувати 5 млн. точок за час ≤20 хв)
Мінімальний кутовий крок сканування	≤0,06 (лінійний крок < 4 см на відстані 40 м)	≤0,03 (лінійний крок <2 см на відстані 40 м)
Кут поля зору у вертикальній площині	>80	>80
Мінімальна робоча температура, °С	>0	>-10
Клас захищеності	не нижче IP42	не нижче IP42
Клас безпеки лазера	не нижче 3R	не нижче 3R

На рисунку 4.32 побудовані вектори напрямлень зміщень. Це зроблено для характеристики в цілому отриманих даних, що стосуються планового положення

векторів. При аналізі векторів можна побачити, що в цілому напрямки мають приблизно однаковий напрямок, за винятком репера 5, 6 та 17,18. Це говорить про однорідність даних, що були отримані різними способами.

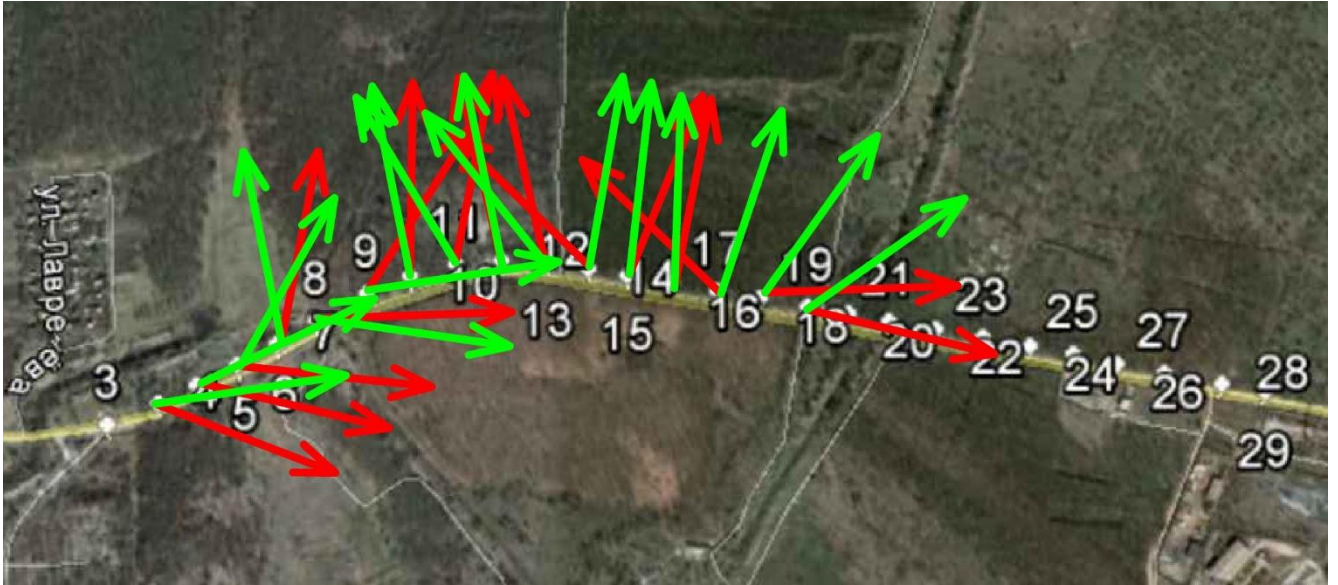


Рис. 4.32 Вектори напрямків (червоний - НЛС, зелений – полігонометрія)

Нижче на рисунку 4.33 представлений графік відхилень значень сканування від значень полігонометрії та нівелювання.

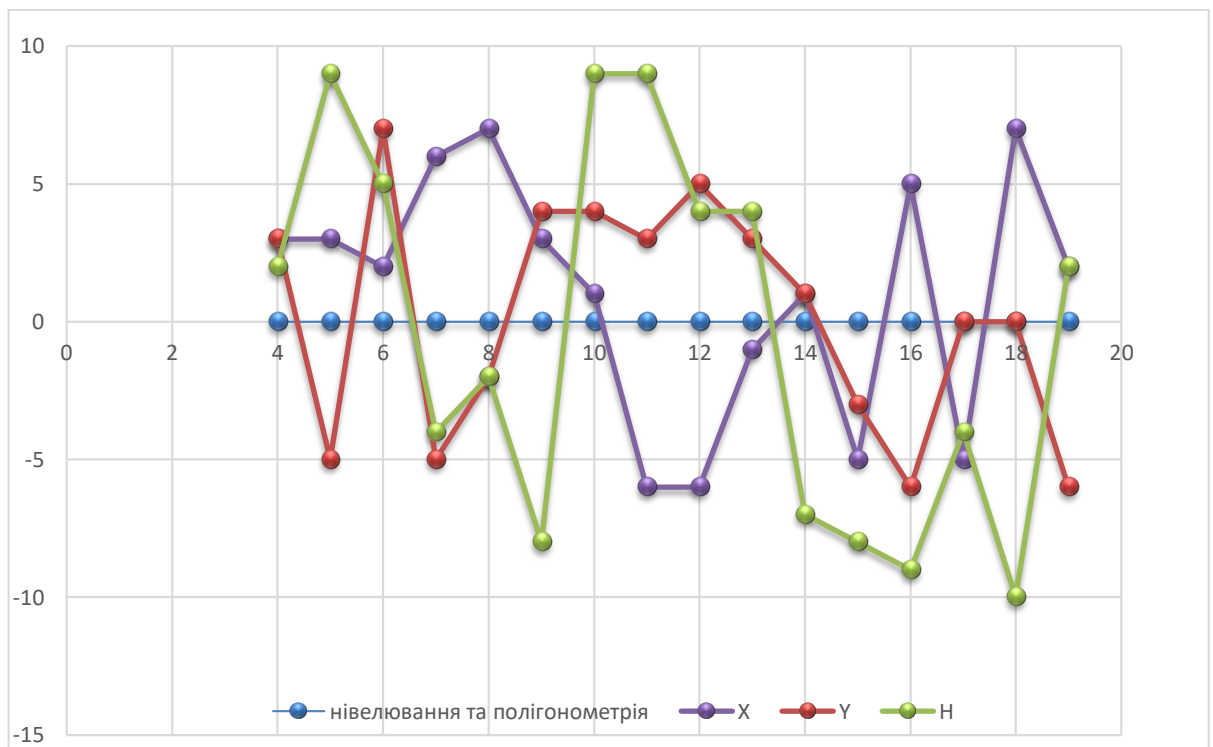


Рис. 4.33 Графік відхилень, значення в мм

Отже, з результатів видно, що максимальні відхилення мають місце у висотних значеннях і досягають 10 мм. Це пов'язано зі складністю визначення

верхньої площини точки, так як вона завжди під гострим кутом для відбиття променю. Відхилення в плані має максимальне значення 7 мм. СКП в плані склала 4 мм, за висотою 6,6 мм. Ці помилки дещо більші за похибки полігонометрії, але об'єм даних, отриманих при скануванні, дуже важко порівняти – 19 реперів полігонометрії проти 1.5 млн точок, за допомогою яких побудована TIN-модель. Сама по собі TIN-модель дає набагато повнішу і більш детальну картину лінійного об'єкта. За допомогою цифрової моделі можна зробити більш детальний аналіз об'єкта і достовірніші висновки за процесами, які відбуваються на об'єкті.

#### **Висновки до розділу 4**

На підставі отриманих результатів констатуємо, що наземне лазерне сканування продемонструвало свій потенціал при вимірюванні деформацій лінійної споруди. Нижче наведені результати виконаних досліджень, що були висвітлені в четвертому розділі:

1. Розраховано тривалість часу для виконання окремих операцій на сканерних станціях, що дозволило вивести норматив часу для роботи на одній станції, що коливається в межах 30-55 хвилин;
2. Розроблені рекомендації, які дозволяють мінімізувати похибки сканування за рахунок обрання оптимальних характеристик сканування і впливати на поліпшення точності кінцевого результату;
3. Проведено ряд польових експериментів, що дозволили наступне: встановити вплив прогріву далекомірного блоку наземного лазерного сканера на результати сканування. На основі експерименту рекомендовано при температурі нижче 15°C прогрівати сканер 15-20 хвилин перед початком роботи, залишаючи його увімкнутим; встановити оптимальні кути посилення-прийому сигналу приладу; встановити оптимальну відстань сканування зі стабільною величиною похибки, яка у більшості випадків становить 8-60 метрів, при цьому відхилення координат на відстані 60 метрів склали  $3 \div 4,5$  мм;



4. Запропонована конструкція репера-марки відомих розмірів з контрольними отворами для більш точного позиціювання контрольного репера у просторі при скануванні;
5. Складена технологія для обробки результатів наземного лазерного сканування з вирішення завдання геодезичного контролю лінійних об'єктів для подальшого моніторингу;
6. Проведений аналіз спостережень за деформаціями лінійних споруд між класичними методами та методом НЛС. При цьому отримані наступні дані: відносна похибка полігонометричного ходу склала 1:41700; СКП нівелювання  $\pm 3$ мм, при довжині ходу 1,36 км; точність отримання 3D-моделей НЛС  $\pm 11$ мм в плані,  $\pm 10$ мм по висоті; максимальні відхилення реперів, які визначались обома способами, склали за віссю X 7мм, за віссю Y 6мм, за віссю H 10мм;
7. За даними знімання НЛС складено топографічний план на всю ділянку автодороги, що відповідає вимогам інструкції [90];
8. Побудовані абрисы накладених TIN-моделей, що дозволило наочно виявити ділянки з деформаційними процесами та розрахувати їх кількісне значення. Так, виявлені сумарні просідання автодорожнього одягу склали 173мм за рік. Відхилення поліліній твердого покриття коливаються від 0 до 21мм. Загальна кількість точок, які аналізувалися, склала приблизно 1,5 млн.

## ВИСНОВОК

Результати досліджень довели, що впровадження технології наземного лазерного сканування для вирішення завдань геодезичного контролю в Україні відбувається повільно з причини відсутності нормативно-технічної документації, що регламентує методику проведення польових і камеральних робіт, а рівень існуючої нормативної документації не відповідає сучасному рівню розвитку геодезичної науки і практики.

Основні результати дисертаційної роботи полягають у наступному:

1. Виявлено фактори, які найбільше впливають на точність вимірювання відстаней блоком лазерного далекоміра. До них можна віднести основні, такі як: зовнішні атмосферні умови; кут падіння лазерного променя по відношенню до відбивної поверхні; коефіцієнт відбивної здатності матеріалу об'єкту сканування.
2. Виконана оцінка стабільності роботи лазерного далекоміра свідчить про те, що для отримання найвищої точності вимірювань необхідний прогрів блоку лазерного далекоміра протягом 15-20 хвилин.
3. Встановлена залежність точності вимірювання відстані від кута падіння лазерного променя вказує, що максимальний кут розвороту поверхні об'єкта, який сканується, по відношенню до падаючого променя без впливу на точність вимірювання відстаней може досягати  $50^\circ$ ; залежність похибки вимірювання відстані від коефіцієнта відбиття (альbedo) показала збільшення точності на пофарбованих в світлі тони поверхні об'єкта сканування, а також отримана залежність точності вимірювання від шорсткості матеріалу.
4. Розроблена методика оцінки функціональних можливостей програмного забезпечення, що дозволяє здійснювати вибір програм для обробки даних наземного лазерного сканування з урахуванням вирішуваних завдань.
5. Проаналізовані основні джерела похибок при вимірюванні відстаней наземними лазерними сканерами, розрахована середня квадратична помилка визначення положення точок.

6. На основі експериментальних досліджень розроблена методика виконання зйомки наземним лазерним сканером лінійних об'єктів для отримання цифрових топографічних планів і тривимірних моделей, що дозволяє підвищити продуктивність польових робіт із застосуванням наземних лазерних сканерів, підвищити достовірність і якість виконаних вимірювань.
7. Розроблена і досліджена методика створення цифрових топографічних планів та моделей на основі даних наземного лазерного сканування, що, в свою чергу, підвищує їх точність, якість і знижує трудові затрати.
8. На основі експериментальних досліджень розроблена методика виконання сканерної зйомки лінійних інженерних об'єктів на прикладі автомобільної дороги для подальшого моніторингу деформаційних процесів, що дозволяє підвищити достовірність і якість виконаних вимірювань.

Запропоновані методики пройшли апробацію, підтверджені актами про впровадження на реальних об'єктах і продемонстрували свою здатність на використання.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Аналіз надзвичайних подій в Україні [Електроний ресурс]: – сайт державної служби України з надзвичайних ситуацій. – Режим доступу: <http://www.dsns.gov.ua>
2. Вегенер А. Происхождение материков и океанов /А. Вегенер// Современные проблемы естествознания. М.-Л.: Геоиздат, 1925. 145 с.
3. Кузьмин Ю.О. Современная геодинамика и оценка геодинамического риска при недропользовании. /Ю. Кузьмин// М.: Агентство экологических новостей, 1999. 220 с.
4. Sashourin A.D., Panzhin A.A., Kostrukova N.K., Kostrukov O.M. Field investigation of dynamic displacement in zone of tectonic breaking. /Rock mechanics - a challenge for society: Proceedings of the ISRM regional symposium EUROK 2001. Espoo, Finland 3-7 June 2001/ Balkema 2001. p. 157-162.
5. Николаев Н.И. Новейшая тектоника и геодинамика литосферы / Николаев Н. – М.: Недра, 1988. -491 с.
6. Теркот Д.Л., Шуберт Дж. Геодинамика: Геологические приложения физики сплошных сред / Теркот Д. – Ч. 1: Пер. с англ. - М.: Мир, 1985. -376 с.
7. Энциклопедия «Техника». – М.: Росмэн. 2006.
6. Учитель И.Л. Геодинамика. Основы динамической геодезии. / И.Л.Учитель, В.С.Дорофеев, В.Н.Ярошенко, Б.Б.Капочкин// – Под редакцией д.т.н., профессора С.П.Войтенко. – О. : Астропринт, 2007. - 264 с.
7. Энциклопедия «Техника». – М.: Росмэн, 2006.
8. Учитель И.Л. Разрушительные свойства геодеформаций. / И.Л. Учитель // – О. : Астропринт, 2010. – 222 с.
9. Новак В.Е., Власов В.Д. Геодезическо-маркшейдерские работы в строительстве / В.Е. Новак, В.Д. Власов // – М.: ВАГО, 1989.
10. Гзовский М.В. Основы тектонофизики / М.Гзовский // – М.: Наука, 1975.
11. Полевиченко А.Г. Опыт укрепления оползневых участков свайными подпорными стенами / А.Г. Полевиченко, А.А. Капралов // – Вопросы повышения

надежности земляного одеягу на дорогах Дальнего Востока. Сб. трудов ХаБииЖТ, вып. 50. – Хабаровск, 1984.

12. Учитель И.Л. Основы неогеодинимики, газове сети как элемент деформационного мониторинга / И.Л. Учитель, В.Н. Ярошенко, И.И. Гладких, Б.Б. Капочкин // – Одесса. Астропринт. 2000 г.-144с.

13. Спиридонов В.П. Деформации горных пород и сооружений, предупреждение чрезвычайных ситуаций /В.П. Спиридонов// – Журнал «Горная механика», № 1-2, 2004, с. 28-34 (Минск).

14. Гудков В.М. Критерии устойчивости горнопромышленных сооружений и зданий / В.М. Гудков, В.П. Спиридонов// – Маркшейдерский вестник. № 2, 2004 г., с. 68–71.

15. Сильянов В.В. Транспортно-эксплуатационные качества автомобильных дорог и городских улиц / В.В. Сильянов, Э.Р. Домке // – М.: «Академия», 2008. – 352 с

16. Глаголева Т.Н. Справочник инженера-дорожника. Издание 3-е переработанное и дополненное / Т.Н. Глаголева, Е.Н. Гарманов и др. // – М «Транспорт», 1977. -560 с.

17. Сашурин А.Д. Явления изостазии при разработке месторождений полезных ископаемых / А.Д. Сашурин // Приложение результатов исследования полей напряжений к решению задач горного дела и инженерной геологии. – Апатиты: Кольский фил. АН СССР, 1985. – С.27-31.

18. Сашурин А.Д. Масштабное техногенное воздействие горных разработок на участок литосферы / А.Д. Сашурин, А.А. Панжин // Проблемы геотехнологии и недроведения (Мельниковские чтения): Доклады Международной конференции 6-10 июля 1998 г. -Екатеринбург. УрО РАН, 1998. -С.170-178.

19. Адамсон А. Физическая химия поверхностей / А. Адамсон // – М.: Мир,1979. – 568 с.

20. Кабанов В.В., Устройство дорожных покрытий / В.В. Кабанов, Л.М. Кириллова // – М. «Транспорт», 1992.-262с.

21. Зайцев А.К. Геодезические методы исследования деформаций сооружений / А.К. Зайцев, С.В. Марфенко, Д.Ш. Михелев и др // – М.Недра, 1991. - 272 с.
22. Михелев Д. Ш. Геодезические измерения при изучении деформаций крупных инженерных сооружений Текст./ Д. Ш. Михелев, И. В. Рунов, А. И. Голубцов// – М.: Недра, 1977. - 152 с.
23. Левчук, Г.П. Прикладная геодезия. Основные методы и принципы инженерно-геодезических работ / Г.П. Левчук, В.Е. Новак, В.Г. Конусов// – М.: Недра, 1983.
24. ДСТУ Б В.2.1-30:2014. Грунти. Методи вимірювання деформацій основ будинків і споруд. –Мінрегіон України 2015, 33 с.
25. Способы наблюдений за осадками сооружений. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.stanoknavodu.ru/osadkisooruzh>
26. Васютинский И.Ю. Гидронивелирование / И.Ю. Васютинский// – Москва: Недра, 1983.– 180 с. ил. библиография: 78-179.
27. Жуков Б.Н. Влияние температурных факторов на точность измерений превышений гидростатическими приборами и системами/ Б.Н. Жуков // – Вестник Сибирской государственной геодезической академии, 1999. №4. С. 42–47.
28. Meier E. Hydrostatic Levelling System: measuring at the system limits / E. Meier, A. Geiger, H. Ingensand, H. Licht, P. Limpach, A. Steiger, R. Zwysig // – Journal of Applied Geodesy, 2010. Vol. 4. Issue 2. Pp. 91–102.
29. Ключин Е.Б. Инженерная геодезия: Учебник для вузов / Е.Б. Ключин, М.И. Киселев, Д.Ш. Михелев, В.Д. Фельдман // – Под ред. Михелева Д.Ш. – 4-е изд., испр. – М.: Издательский центр «Академия», 2004. — 480 с.
30. Ворошилов А.П. Особенности тригонометрического нивелирования коротким лучем при маркшейдерских наблюдениях за осадками / Проблемы повышения эффективности маркшейдерских работ на горных предприятиях: Сб. науч. тр. /А.П. Ворошилов// – Свердловск, 1989. - С. 22-26
31. Ганьшин В.Н. Геодезические работы при реконструкции промышленных предприятий / В.Н. Ганьшин, Б.И. Коськов, И.М. Репалов // – М.: Недра, 1990.

32. P. Hánek. Testing of Electronic Surveying Instruments / Proceedings of 8th Mining Surveying Conference "Actual Problems of Mining Surveying and Geology"/ Hánek P. // - VŠB-TU Ostrava, Faculty of Mining and Geology, Ostrava (2001), pp. 73-82

33. Середович, В.А. Мониторинг деформаций сооружений в сочетании с технологией трехмерного моделирования / В.А. Середович, Т.А. Широкова, Д.В. Комиссаров, А.В. Середович, А.В. Комиссаров, Т.Н. Ткачева, С.С. Студенков// – Геодезия и картография. - 2006. - № 6. - С. 12-15.

34. Kai-yuen Wong. Мониторинг деформации мостов в Гонконге посредством метода кинематики в реальном времени / Kai-yuen Wong, King-leung Man, Wai-yee Chan// – Health Monitoring and Management of Civil Infrastructure Systems, (3 August 2001).

35. Панкрушин, А.А. Некоторые аспекты устройства вентилируемого фасада /А.А. Панкрушин// – Стройпрофиль.- 2004,- №8(38).- С.20-23.

36. Середович, В.А. Создание трехмерных метрических моделей с применением технологии лазерного сканирования для повышения оперативности и эффективности принятия управленческих решений в условиях чрезвычайных ситуаций / В.А. Середович, Д.В. Комиссаров, А.В. Середович// – Материалы научно-практ. конф. «Спасиб-Сиббезопасность 2004», 15 сент. 2004 г., Новосибирск - Новосибирск, 2004 - С Л 01-102.

37. Наземное лазерное сканирование. Введение в технологию. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.gsi.ru/catalog.php?id=1>

38. Дураев, В.П. Квантовая электроника / В. П. Дураев, Е. Т. Неделин, Т. П. Недобывайло и др.// – Квантовая электроника.- Т. 31. -№ 6.- 2001. — С. 529-530.

39. Середович В.А., Н19 Наземное лазерное сканирование: монография / В.А. Середович, А.В. Комиссаров, Д.В. Комиссаров, Т.А. Широкова// – Новосибирск: СГГА, 2009. – 261 с.

40. Dumalski A. An Attempt at Using a Terrestrial Laser Scanner for Detecting Minimal Displacement and Objects Deformation / A. Dumalski, K. Hejbudzka // – Facing the Challenges – Building the Capacity, Sydney, Australia, 11-16 April 2010.

41. Alba M. Investigations about the accuracy of target measurement for deformation monitoring / M. Alba, F. Roncoroni, M. Scaioni // – The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXVII, Part B5, Beijing 2008.

42. Mill T. Terrestrial Laser Scanning Technology for Deformation Monitoring of a Large Suspension Roof Structure / T. Mill, A. Ellmann // INGEO 2014 – 6th International Conference on Engineering Surveying Prague, Czech Republic, April 3-4, 2014

43. Truong-Hong. Application of Terrestrial Laser Scanner in Bridge Inspection: Review and an Opportunity / Truong-Hong, Linh, Laefer, F. Debra // 37th IABSE Symposium: Engineering for Progress, Nature and People, Madrid, Spain, 3-5 September 2014

44. A.Soni, S. Robson, B. Gleeson .Structural Monitoring for the Rail Industry using Conventional Survey, Laser Scanning and Photogrammetry [Электронный ресурс]. – сайт London's Global University. – Режим доступа: [http://discovery.ucl.ac.uk/1463632/3/Robson\\_pdf\\_Structural%20Monitoring%20for%20the%20Rail%20Industry%20using%20Conventional%20Survey%252C%20Laser%20Scanning%20and%20Photogrammetry\\_third%20review091214.pdf](http://discovery.ucl.ac.uk/1463632/3/Robson_pdf_Structural%20Monitoring%20for%20the%20Rail%20Industry%20using%20Conventional%20Survey%252C%20Laser%20Scanning%20and%20Photogrammetry_third%20review091214.pdf)

45. Fryer J. R. Analysis of as-built cylindrical shapes / J. Fryer, R. Parberry, et al.// – Australian Journal of Geodesy, Photogrammetry and Surveying 56: 91-109 p., 1992.

46. Abellán A. Detection of millimetric deformation using a terrestrial laser scanner / experiment and application to a rockfall event / A. Abellán, M. Jaboyedoff, T. Oppikofer, J.M. Vilaplana // – Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 2009, 9, 365–372

47. Collins B.D. Correlation between thermal gradient and flexure-type deformation as a potential trigger for exfoliation-related rock falls (Invited) / D.D. Collins, G.M. Stock // – *AGU Fall Meet. Abstr.* 2010, 43, 0742. [[Google Scholar](#)].

48. Сова А.А. Моделирование геомеханических процессов при формировании отвала на подработанной территории / А.А. Сова, А.В. Сазонов, М.И. Русаков // - Геоинформационные системы, компьютерные технологии



эколого-экономического мониторинга, Сборник докладов ГИСКТЭЭМ, Днепропетровск, 2016.

49. Данилин И.М. Лазерная локация земли и леса / И.М. Данилин, Е.М. Медведев, С.Р. Мельников // – учеб. Пособие.-Красноярск.:Институт леса им.В.Н.Сукачева СО РАН, 2005.-182с.

50. Бруннер, В. Справочник по лазерной технике Текст. / В. Бруннер // – М.: Энергоатомиздат, 1991.-544 с.

51. Вильнер В. Методы повышения точности импульсных лазерных дальномеров Текст. / В. Вильнер, А. Ларюшин, Е. Рудь // – ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2008. - № 3.

52. Крутиков Д. В. Трехмерное наземное лазерное сканирование в решении задач геоинформационного обеспечения инфраструктуры горнодобывающих предприятий / дис. канд. техн. наук / Д. В. Крутиков// – Екатеринбург: УГГУ, 2011. - 123 с.

53. Шануро Г.А. Геотроника. Наземные и спутниковые радиоэлектронные средства и методы выполнения геодезических работ / учеб. Пособие 137 / Г.А. Шануров, СР. Мельников// – М.; УПП «Репрография» МИИГАиК, 2001, - 136с.; ил.

54. Барышников Н.В. Экспериментальный анализ погрешности измерения триангуляционного метода в задачах технологического контроля профиля поверхности сложной формы / Н.В. Барышников, Д.Г. Денисов, И.В. Животовский, В.Я. Менделеев // Инженерный журнал: наука и инновации, 2013, вып. 9.

55. Горькавый И.Н. Разработка и исследование методик обработки и классификации трехмерных данных лазерного сканирования / дис. канд. техн. наук / И. Н. Горькавый// – М.: МИИГАиК, 2011. - 136 с

56. Бакулев П.А. Радиолокационные системы: Учебник для вузов / Бакулев П.А. // – М.: Радиотехника, 2005. – 320 с.

57. Ю.М. Казаринов. Радиотехнические системы: Учебник для вузов / Ю.М. Казаринов// – М.: Высшая школа, 1990. – 496 с.

58. Середович, А.В. Современные наземные системы лазерного сканирования и возможности их применения в геодезии [Текст] / А.В. Середович// - Сборник материалов ЛШ междунар. научно-техн. конф., посвящ. 70-летию СГГА «Соврем, проблемы геодезии и оптики», Ч. IV, 11-12 марта 2003 г., Новосибирск.- Новосибирск, 2003.- С.367-370.

59. Середович, А.В. Сравнительная характеристика и области применения современных лазерных сканеров [Текст] / А.В. Середович// – Вести. Сиб. гос.геод. академии / СГГА.- 2003.- Вып. 10.- Новосибирск.- С. 107-109.

60. Класс защиты оборудования IP-XX [Электронный ресурс]. сайт Электротехнической компании «Фаза». – Режим доступа: <http://faza.spb.ru/?p=28>

61. Laser Safety Fact Sheet [Электронный ресурс]. – сайт University of Kentucky. - Режим доступа: [http://ehs.uky.edu/radiation/laser\\_fs.html](http://ehs.uky.edu/radiation/laser_fs.html).

62. Direct Reflex EDM Technology for the Surveyor and Civil Engineer [Электронный ресурс]: сайт ЗАО ННН «Навгеоком». - Режим доступа. – [http://www.navgeocom.ru/download/pub/raznoe/Direct\\_Reflex\\_EDM\\_Technology\\_White\\_Paper.pdf](http://www.navgeocom.ru/download/pub/raznoe/Direct_Reflex_EDM_Technology_White_Paper.pdf).

63. Laser safety [Электронный ресурс]. – сайт Encyclopedia of laser physic and technology. – Режим доступа: [http://www.ф-photonics.com/laser\\_safety.html](http://www.ф-photonics.com/laser_safety.html)

64. An Overview of the LED and Laser Classification System in EN 0825-1 and IEC 60825-1 [Электронный ресурс]. – сайт Lasermet ltd. – Режим доступа: [http://www.lasennet.com/resources/classification\\_overview.htm](http://www.lasennet.com/resources/classification_overview.htm).

65. Laser Classification [Электронный ресурс]. – сайт Physical & Theoretical Chemistry Laboratory. University of Oxford. – Режим доступа: [http://ptcl.chem.ox.ac.uk/MSDS/laser\\_classification.html](http://ptcl.chem.ox.ac.uk/MSDS/laser_classification.html).

66. Классификация лазерного излучения [Электронный ресурс]. – сайт Robotun. – Режим доступа: <http://robotun.com.ua/wiki/klassifikaciya-lazernogo-izlucheniya>.

67. An Overview of the LED and Laser Classification System in EN 0825-1 and IEC 60825-1 [Электронный ресурс]. – сайт Lasermet ltd. Режим доступа: <http://www.lasermet.com/laser-standards.php>

68. A prototype of remote-control scanning system developed [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://www.faro.com/news-events/news/>

69. Amberg GRP scanning system developed for railway scanning [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://www.ambergtechnologies.ch/news-events/news-detail/browse/4/article/amberg-ims-1000-and-amberg-ims-3000-systems//228/>

70. Integration of laser scanner and digital camera [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://www.zf-laser.com/Press-Release.143.0.html?&L=1>

71. Li, Y. Extraction and Simplification of Building Façade Pieces from Mobile Laser Scanner Point Clouds for 3D Street View Services / Y. Li, Q. Hu, M. Wu, J. Liu, X. Wu // – ISPRS Int. J. Geo-Inf. 2016, 5, 231.

72. Kersten T.P. Comparative geometrical investigations of hand-held scanning systems / T. P. Kersten, H.J. Przybilla, M. Lindstaedt, F. Tschirschwitz, M. Misgaiski-Hass // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLI-B5, 12–19 July 2016, Prague, Czech Republic.

73. Комиссаров А.В. Исследование точности наземных лазерных сканеров / Современ. проблемы техн. наук / А.В. Комиссаров// – Сб. тез. докл. Новосиб. межвуз. науч. студен. конф. «Интеллектуальный потенциал Сибири». Ч. 3. - Новосибирск, 2004. - 104 с.

74. Большаков В.Д. Радиогеодезические измерения: учебник для вузов / В.Д. Большаков и др// – М.: Недра, 1985. - 303 с.

75. Воронин М. Я. Внешнее и внутреннее воздействие на оптико-радио-электронные приборы и их испытания / монография / М.Я. Воронин, А.К. Синякин, М.Б. Устюгов // – Новосибирск: СГГА, 2004.- С. 1-60.

76. Ландсберг Г.С. Элементарный учебник физики. Колебания, волны, оптика, атомная физика / Г. С. Ландсберг// – М., 1985. - Т. 3

77. Dorninger P. On-the-job detection and correction of systematic cyclic distance measurement errors of terrestrial laser scanners / P. Dorninger, C. Nothegger, N. Pfeifer, G. Molnar // J. Appl. Geodesy 2008, 2, 191–204.

78. Літинський В.О. Врахування нівелірної рефракції з використанням приладів з зарядовим зв'язком / В.О. Літинський, О.В. Кіселик, С.В. Літинський //

Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва: Зб. наук. пр. – Львів, 2005.  
– Вип. II. – С. 71 – 75

79. Ваксман Ю.Ф. Оптика / Ю.Ф. Ваксман// – Одесса: Астропринт, 2001.

80. W. Voebier, M. Bordas Vicent, A. Marbs Анализ точности лазерных сканирующих систем. Доклад на XIX симпозиуме CIPA, Анталья, Турция (30 сентября - 4 октября 2003 г.) [Электронный ресурс]. – сайт Фирмы Г.Ф.К. – Режим доступа: <http://www.gfkleica.ru/data/LASER%20SCANNER%20accuracy.doc>

81. Евченко, К.Г. Выбор геометрического моделировщика [Электронный ресурс] / К.Г. Евченко// САПР и графика. - 2002. - № 2. - Режим доступа: <http://www.sapr.ru/Archive/SG/2002/2/28/138>.

82. Жигулин В.О. Том, как твердое тело может быть слишком твердым, или взгляд на параметризацию сбоку [Электронный ресурс]. – САПР и графика. – 2001, - № 1. - Режим доступа: <http://www.sapr.ru/Archive/SG/2000/1/5/>.

83. Быков А.В. Желаемое и действительное в геометрическом моделировании [Электронный ресурс]. – / А.В. Быков// – САПР и графика, - 2002, - № 1. – Режим доступа: <http://www.sapr.ru/Archive/SG/2002/1/7/>.

84. Преимущества перехода с AutoCAD LT на AutoCAD 2006 [Электронный ресурс]. – сайт компании IPro. – Режим доступа: <http://www.itpro.kiev.ua/licensing/view/?id=44>.

85. Справочник по проектированию электроснабжение / Под ред. Ю.Г. Барыбина, Л.Е. Федорова, М.Г. Зименкова, А.Г. Смирнова // – М.: Энергоатомиздат, 1990. — 576 с.

86. Bing Song Reconstructing DEM using TLS point cloud data and NURBS surface / Bing Song, Nan-shan Zheng, Dong-wei Li, Ran-Li Chen, Liang Li // – Transactions of Nonferrous Metals Society of China, Volume 25, Issue 9, September 2015, P 165-172

87. Пономаренко С.И., Пиксел и вектор. Принципы цифровой графики /С.П. Пономаренко // – СПб.: БХВ-Петербург, 2002, - 496с.

88. Allen, S. Seeing into the Past: Creating a 3D Modeling Pipeline for Archaeological Visualization / S. Allen, P. Feiner, A. Troccoli, H. Benko, E. Ishak, B.

Smith // – Department of Computer Science, Columbia University, New York, NY, 2004. – англ.

89. Берлянт, А.М. Картография. Учебник для вузов / А.М. Берлянт// – М.: Аспект Пресс, 2001,- 336 с.

90. Інструкція з топографічного знімання у масштабах 1:5000, 1:2000, 1:1000, 1:500. ГКНТА–2.04–02–98, затверджена наказом Головного управління геодезії, картографії та кадастру при Кабінеті Міністрів України від 09.04.1998 № 56

91. Инструкция по развитию съёмочного обоснования съёмке ситуации и рельефа с применением глобальных навигационных спутниковых систем ГЛОНАСС и GPS. - М.: ЦНИИГАиК. 2002. - 124с.

92. Генике А.А. Глобальная спутниковая система определения местоположения GPS и применение в геодезии / А.А. Генике, Г.Г. Побединский// – М.: Картгеоцентр – Геодезиздат, 1999. – 272 с.

93. Буров М. И. Практикум по фотограмметрии / М.И. Буров, Б.В. Краснопевцев, А.П. Михайлов// – учеб. пособие для вузов. - М.: Недра, 1987.-302 с: ил.

94. Технология создания трехмерных цифровых моделей различного назначения [Электронный ресурс]. – офиц. сайт компании НПП «Геокосмос». – Режим доступа: <http://www.geokosmos.ru>.

95. Toša Ninkov. Application of laser scanning technology for civil engineering projects in Serbian / Toša Ninkov, Vladimir Bulatović, Zoran Sušić and Dejan Vasić // – FIG Congress 2010 Facing the Challenges – Building the Capacity Sydney, Australia, 11-16 April 2010

96. Жуков Б.Н. Геодезический контроль сооружений и оборудования промышленных предприятий / монография /Б.Н. Жуков // – Новосибирск: СГГА, 2003. -356 с.

97. Грунин А.Г. Наземная лазерная сканирующая система – ILRIS 3D / А.Г. Грунин // – Геопрофи. – 2003. – № 2. – С. 23.

98. Balzani, M. 3D laser scanner: Accuracy tests / M. Balzani, A. Pellegrinelli, N. Perfetti, F. Uccelli // – Proc. 18th Int. Symp. CIPA 2001, pp. 445-453

99. Lichti D. Comparison of digital photogrammetry and laser scanning / D. Lichti // – Proc. of the CIPA WG6 Int. Workshop on scanning for cultural heritage recording, 2002.

100. Leica TPS400 Series Easy, quick, reliable and powerful [Электронный ресурс]. – сайт Leica Geosystems. - Режим доступа: <http://www.leicageosystems.com/common/shared/downloads/inc/downloader.asp?id=226>

101. MS-Z360 Laser mirror scanner. Technical documentation and users instructions. - Horn: Riegl Laser measurement systems, 2003. - 92 p.

102. Середович А.В. Методика топографической съемки застроенных территорий с применением наземного лазерного сканирования / А.В. Середович // – Изв. вузов. Горн, журнал. - Екатеринбург, 2004.- Kst 6-С. 3-8.

103. Ким Ли. 3D Studio MAX 4/5. Для дизайнера. Искусство трехмерной Анимации / Ким Ли// – Киев: ООО «ТИД «ДС», 2002. – 848 с.

104. Технология создания крупномасштабных карт и планов в составе ИПД [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.gisinfo.ru/createplan/createplan.htm>

105. Комиссаров А. В. Исследование точности построения цифровой модели рельефа по данным наземного лазерного сканирования / А.В. Комиссаров// – ГЕО-Сибирь-2006. Т. 1. Геодезия, картография, маркшейдерия: сб.материалов науч. конгр. «ГЕО-Сибирь-2006», 24-28 апр. 2006 г.,- Новосибирск: СГГА, 2006. - С. 150-153.

106. Бруннер В. Справочник по лазерной технике / В. Бруннер// – М.: Энергоатомиздат, 1991.—544 с.

107. Бломберген Н. Нелинейная оптика / Н. Бломберг// – пер. с англ. - М.:Мир, 1966.-286 с.

108. Середович В.А. Наземное лазерное сканирование./ монография / В.А. Середович, А.В. Комиссаров, Д.В. Комиссаров, Т.А. Широкова// – Новосибирск: СГГА,-2009.-С261.

109. Мезенов А.В. Термооптика твердотельных лазеров / А.В. Мезенов // – Л.: Машиностроение, 1986.- 199 с.

110. Великодский, Ю. И. Влияние альbedo и рельефа на закон распределения яркости по диску Луны / дис. канд. техн. наук/ Ю.И. Великодский // – Киев: ХНУ, 2002. - 136 с.

111. Кравцов Ю. А. Геометрическая оптика неоднородных сред / Ю.А. Кравцов, Ю. И. Орлов // – М.: Наука, 1980.-280 с.

112. Кринов Е.Л. Спектральная отражательная способность природных образований / монография / Е.Л. Кринов // – М.-Л.: АН СССР, 1947. -С. 89-132.

113. Ямбаев Х. К. Геодезическое инструментоведение. Практикум: учеб. пособие для вузов / Х. К. Ямбаев // – М.: Академический проект; Гаудеамус, 2011. -С. 476-502.

114. Арефьев А. А. Исследование влияния амплитудных искажений энергетического профиля лазерного пучка на ошибку измерения прямолинейности и неплоскостности / А.А. Арефьев // – Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. - 1983. - № 5. - С. 95-98.

115. Исимару А. Модели распространения и рассеяния оптического излучения в случайно неоднородных средах / А. Исимару, И. П. Гуров //– М.: Медицина, 2006. - 136.

116. Исимару А. Распространение и рассеяние волн в случайно-неоднородных средах в 2 т. / А. Исимару// – М.: Мир, 1981.-281 с.

117. Тарасов Л. В. Четырнадцать лекций о лазерах / Л.В. Тарасов // – М.: Книжный дом «Либроком», 2011. - 174 с.

118. Stahlberg C. / Eine vektorielle Darstellung des Einflusses von Zielund Kippachsenfehler auf die Winkelmessung / C. Stahlberg // Zeitschrift fur Vermessungswesen 122 (5), pp. 225-235.

119. Deumlich F. / Instrumentenkunde der Vermessungstechnik / F. Deumlich, R. Staiger / 9 vullig neu bearbeitete und erweiterte auflage // Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg, 2002.

120. Neitzel F. / Investigation of axes errors of terrestrial laser scanners / F. Neitzel // Fifth International Symposium Turkish-German Joint Geodetic Days, Berlin, 2006.

121. Harald S. / Comparison of terrestrial laser scanning systems in industrial as-built-documentation applications/ S. Harald, P. Kersten Thomas // Optical 3-D Measurement Techniques VIII, Gruen/Kahmen (Eds.), Zurich, July 9-12, 2007, Vol. I, pp. 389-397.

122. Tsakiri M. Terrestrial laser scanning for deformation monitoring 3rd IAG / M. Tsakiri, D. Lichti, N. Pfeifer // – 12th FIG Symposium, Baden, May 22-24, 2006

123. Luhmann T. Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik / T. Luhmann // – Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2003. Wichmann Verlag, Heidelberg.

124. Fritz Deumlich. Instrumentenkunde der Vermessungstechnik / Fritz Deumlich, Rudolf Staiger// - völlig neu bearbeitete und erweiterte Auflage 2002. Buch. IX, 426 S.: 814 s/w-Abbildungen, 75 s/w-Tabellen. Hardcover.

125. Инструкция по полигонометрии и трилатерации. М., Недра, 1976, 104 с. (Главное управление геодезии и картографии при Совете Министров СССР).

126. Инструкция по нивелированию I, II, III и IV классов. - М.: "Недра", 1990.

127. Бычин Б.В. Организация и нормирование труда. учебник для вузов / Б.В. Бычин, С.В. Малинин, Е.В. Шубенкова // – под. ред. Ю.Г. Одегова. -М.: Экзамен, 2003.-464 с.

128. Матвеев В.Т. Практикум по нормированию труда в геодезическом производстве / учеб. пособие / В.Т. Матвеев// –Новосибирск, НИИГАиК,1988.-66 с.

129. Lague D. Accurate 3D comparison of complex topography with terrestrial laser scanner / D. Lague, N. Brodu, J. Leroux // – Application to the Rangitikei canyon (N-Z). ISPRS J. Photogramm. Remote Sens. 2013, 82, 10–26.

130. Ko S.-J. Center weighted median filters and their applications to image enhancement / S.-J. Ko, Y.H. Lee// – IEEE Trans. Circuits Syst. 1991, 38, 984–993.

131. Кузнецов М.А. Инструкция по наблюдениям за сдвижением горных пород и земной поверхности при подземной разработке рудных месторождений. / М. А. Кузнецов, Е. И. Кузнецова, С. Н. Зеленцов, Г. П. Лукин, В. А. Внуков, Г. Ш.



Сакаев, В. М. Тяпин Н. Е. Яковлев// – (ВНИПИГорцветмет). УТВЕРЖДЕНО Госгортехнадзором СССР 3 июля 1986

132. Продажа профессионального геодезического оборудования [Электронный ресурс]. – Лазерный сканер Leica Scan Station 2. - Режим доступа: [http://www.geooptic.ru/\\_files/leica-scanstation-2-instrukcia.pdf](http://www.geooptic.ru/_files/leica-scanstation-2-instrukcia.pdf)

133. Вшивков О. В. О комплексном подходе к решению рефракционной проблемы / О. В. Вшивков // – Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. — 2005.- №4.-С. 41-46.

134. Середович А.В. Создание крупномасштабных топографических планов сложных технологических объектов средствами наземного лазерного сканирования / А.В. Середович// – Сб. тез. конф. «Геопространств, технологии и сферы их применения», 14-17 марта, 2006 г., г. Москва- М., 2006.- С.41-42.

135. Дементьева О.А. Особенности обработки результатов наземного лазерного сканирования в программном продукте Cyclone 4.1 / О.А. Дементьева, Е. В. Миллер // – Тезисы докладов IV Международной конференции и выставки «Лазерное сканирование и цифровая аэросъемка. Сегодня и завтра». -М.: Типография компании XPortMedia, 2004. - С. 12-13.

136. Прокопьева С.А. Применение технологии трехмерного наземного лазерного сканирования при решении задач археологии / С. А. Прокопьева // – ГЕО-Сибирь-2006: сб. материалов науч. конгр. «ГЕО-Сибирь-2006», 24-28 апр. 2006 г., Новосибирск: СГГА, 2006. - Т. 1, ч. 2.

137. Велижев А.Б. Разработка и исследование алгоритмов автоматического взаимного ориентирования трехмерных дискретных моделей объектов, полученных в результате лазерного сканирования / дис. канд. техн. наук/ А.Б. Велижев// – М.: МИИГАиК, 2008. - 78 с.

138. Комиссаров А.В. Методика исследования метрических характеристик сканов / дис. канд. техн. наук / А. В. Комиссаров // – Новосибирск: СГГА, 2007.- 201с.

139. Кемниц Ю.В. Теория ошибок измерений / Ю. В. Кемниц// – общ. ред. В. В. Ключева. - 2-е. изд., перераб. и доп. - М.: Недра, 1967. - 176 с

140. Падве В.А. Показатель точности геопространственных данных / В. А. Падве// – Геодезия и картография.-2005.-№ 1.-С. 18-19.

141. Большаков В.Д., Маркузе Ю.И. Практикум по теории математической обработки геодезических измерений / В.Д. Большаков, Ю.И. Маркузе// – М.: Недра, 1983

142. Нестеренко Е.А. Методика съемки карьеров, отвалов и складов на основе применения трехмерных лазерно-сканирующих систем/ дис. канд. техн. наук / Е. А. Нестеренко// – СПб.: СПб ГГИ им. Г.В. Плеханова, 2010.-149 с.

143. Михеичев, В.С. Геодезические светодальномеры [Текст] / В.С. Михеичев // – М.: Недра, 1979. – 222 с.

144. Анемов Е.М. Колебания и волны. Базовая терминология / Е. М. Анемов – 2008. - 156 с.

145. Исаев М.П. Самовоздействие поля излучения твердотельного непрерывного лазера / М. П. Исаев, В. Р. Кушнир // – Квантовая электроника. - 1982.- Т. 9, № 4.- С. 820-821.

146. Борн М. Основы оптики / М. Борн, Э. Вольф// – пер. с англ. - М.: Наука, 1973.-713 с.

147. Бутиков Е. И. Оптика / Е. И. Бутиков // – М.: Высшая школа, 1986.-507 с.

148. Ван де Хюлст. Рассеяние света малыми частицами / Ван де Хюлст // – пер. с англ. - М.: Изд-во иностранной литературы, 1961. - 537 с.

149. Хргиан А.Х. К вопросу о теории боковой рефракции / А.Х. Хргиан // – Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. - 1961. -№ 3. - С. 17-22.

150. Ямбаев Х.К. Геодезический контроль прямолинейности и соосности в строительстве / Х.К. Ямбаев // – М.: Недра, 1986.-264 с., ил

151. Asner G. Mapping tropical forest carbon: Calibrating plot estimates to a simple LiDAR metric. Remote Sens. Environ / G. P. Asner, J. Mascaro // – 2014, 140, 614–624. [Google Scholar]

152. Cosso T. Surveying and mapping a cave using 3d laser scanner: the open challenge with free and open source software / T. Cosso, I. Ferrando, A. Orlando // – 2014, Int. Soc. Photogramme, XL-5, 181–186. [Google Scholar]

## ДОДАТОК А

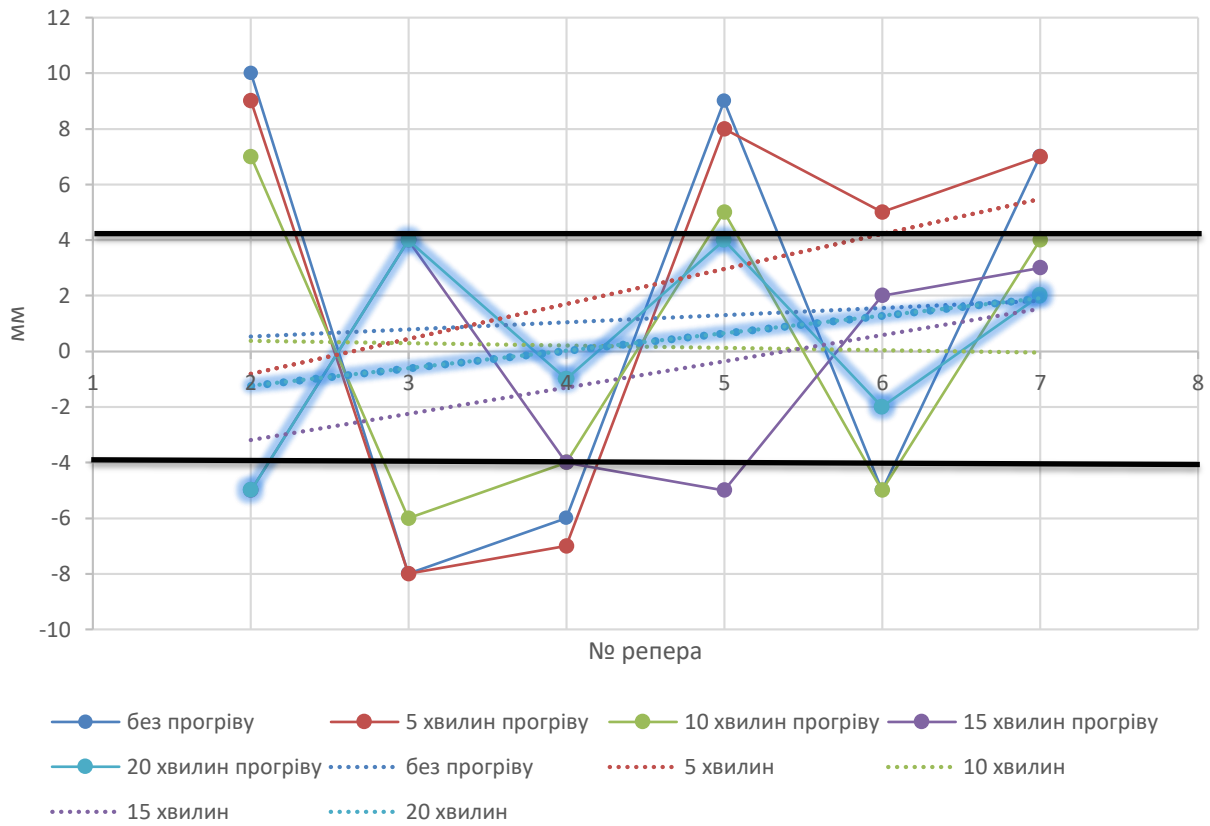


Рис. А.1 Відхилення реперів по профільній лінії «11 метрів» по осі Н

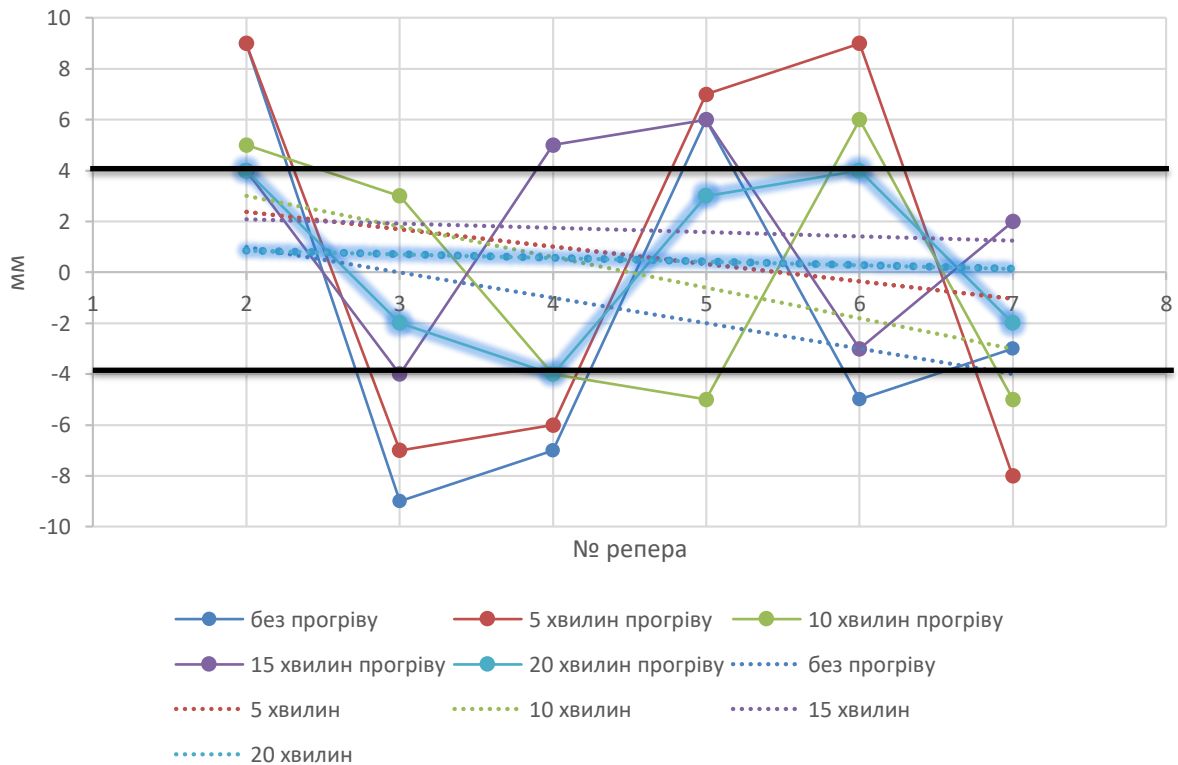


Рис. А.2 Відхилення реперів по профільній лінії «11 метрів» по осі Х

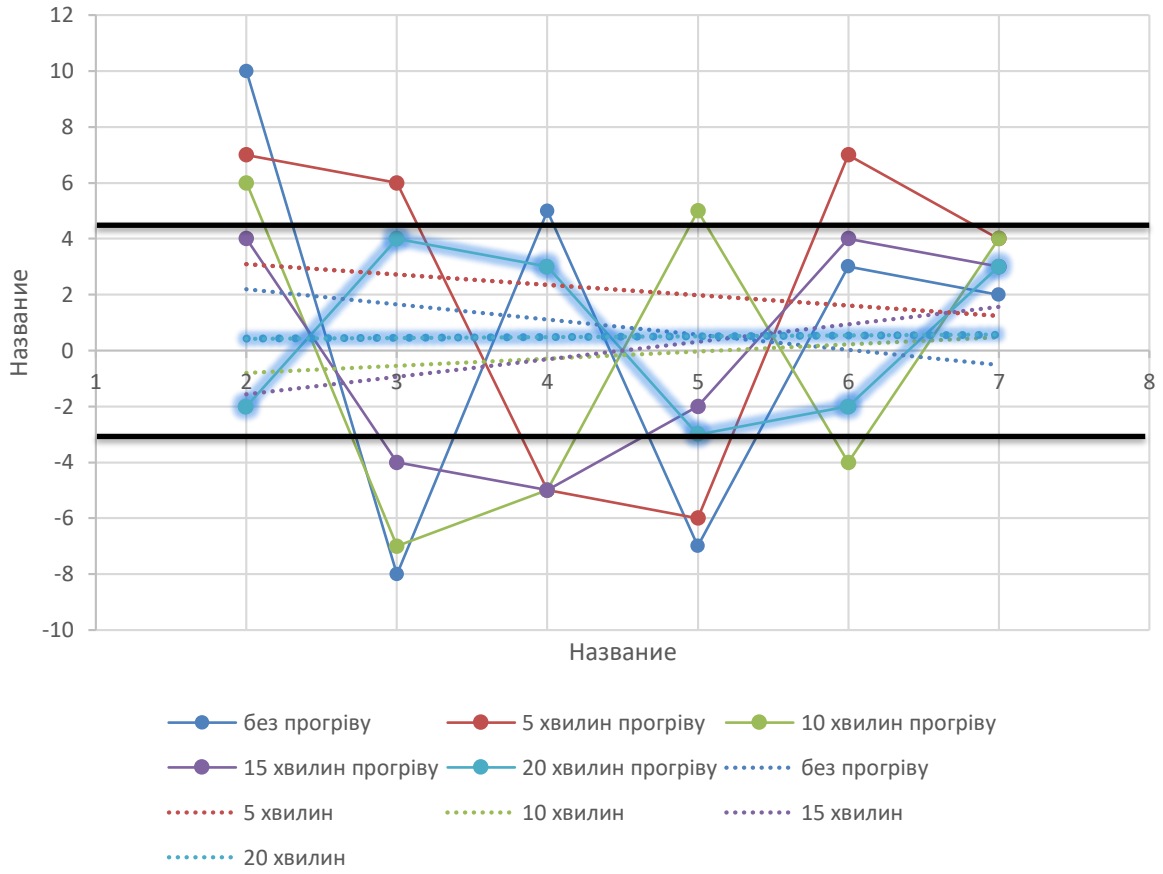


Рис. А.3 Відхилення реперів по профільній лінії «11 метрів» по осі У

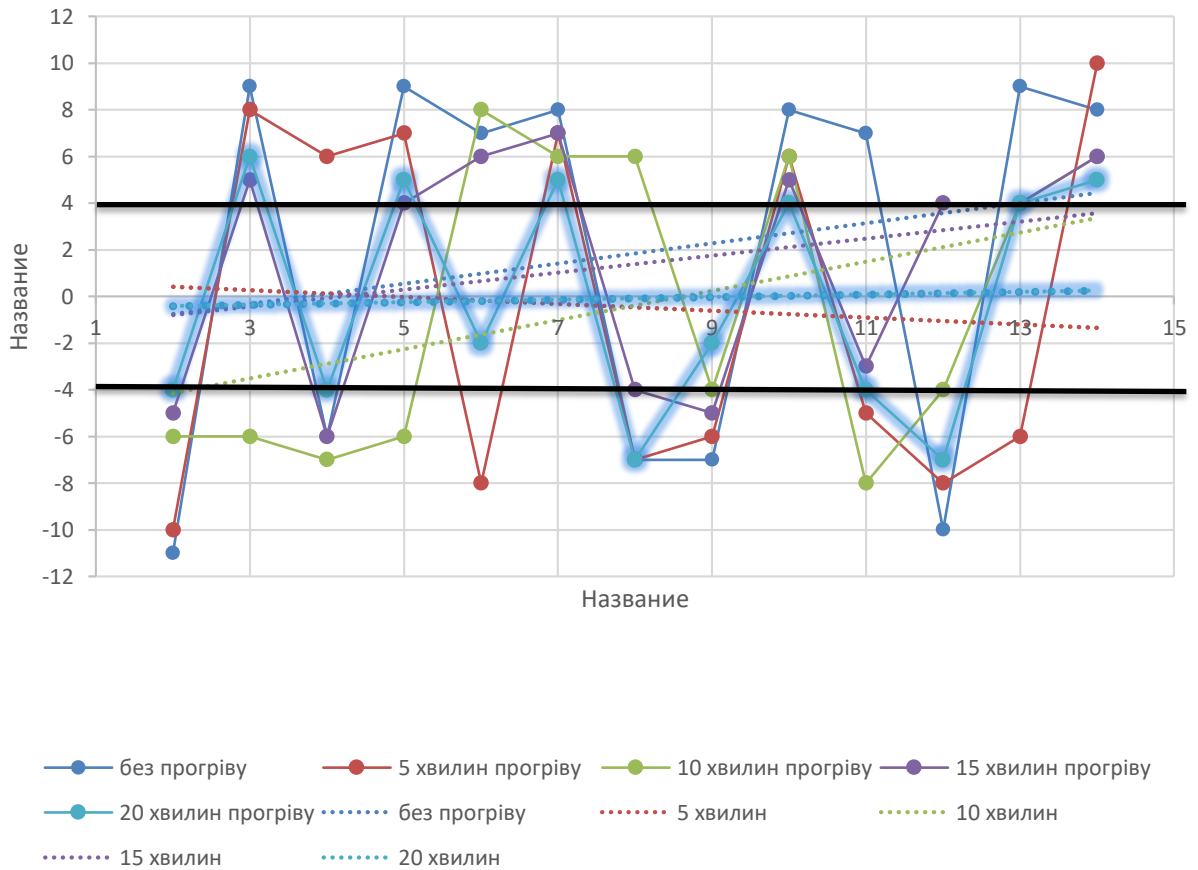


Рис. А.4 Відхилення реперів по профільній лінії «5 метрів» по осі Н

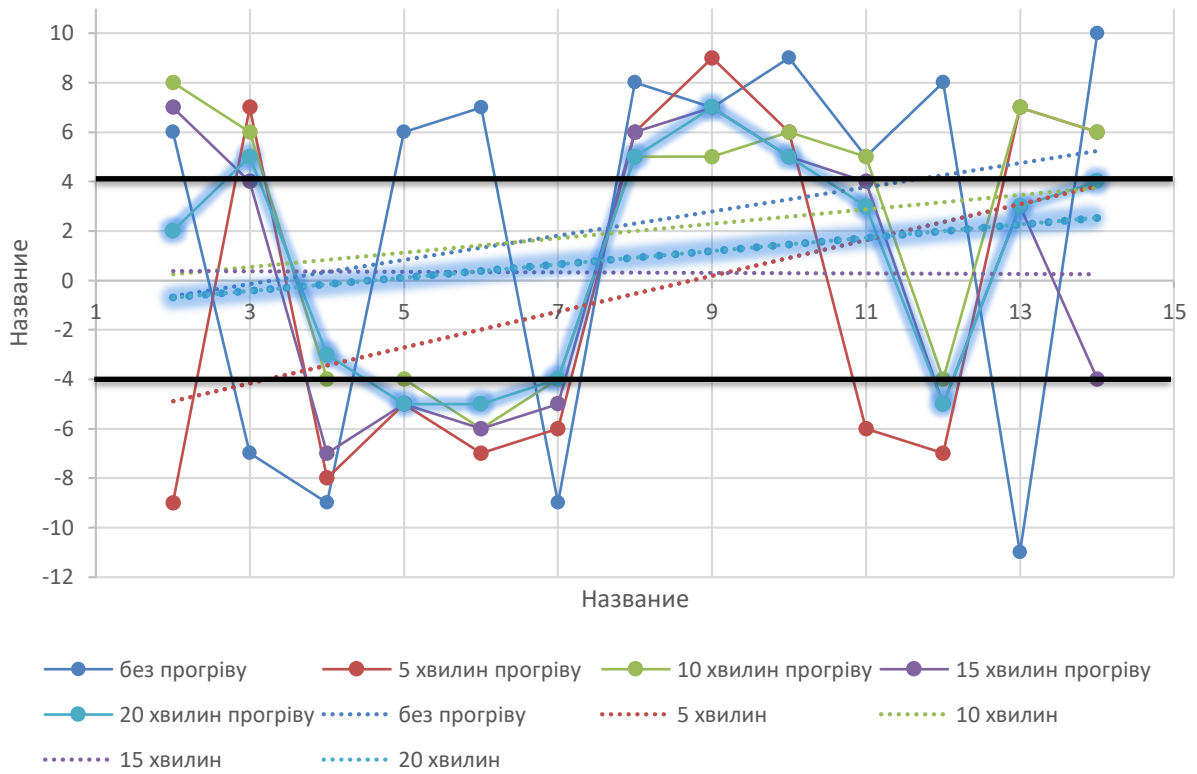


Рис. А.5 Відхилення реперів по профільній лінії «5 метрів» по осі Х

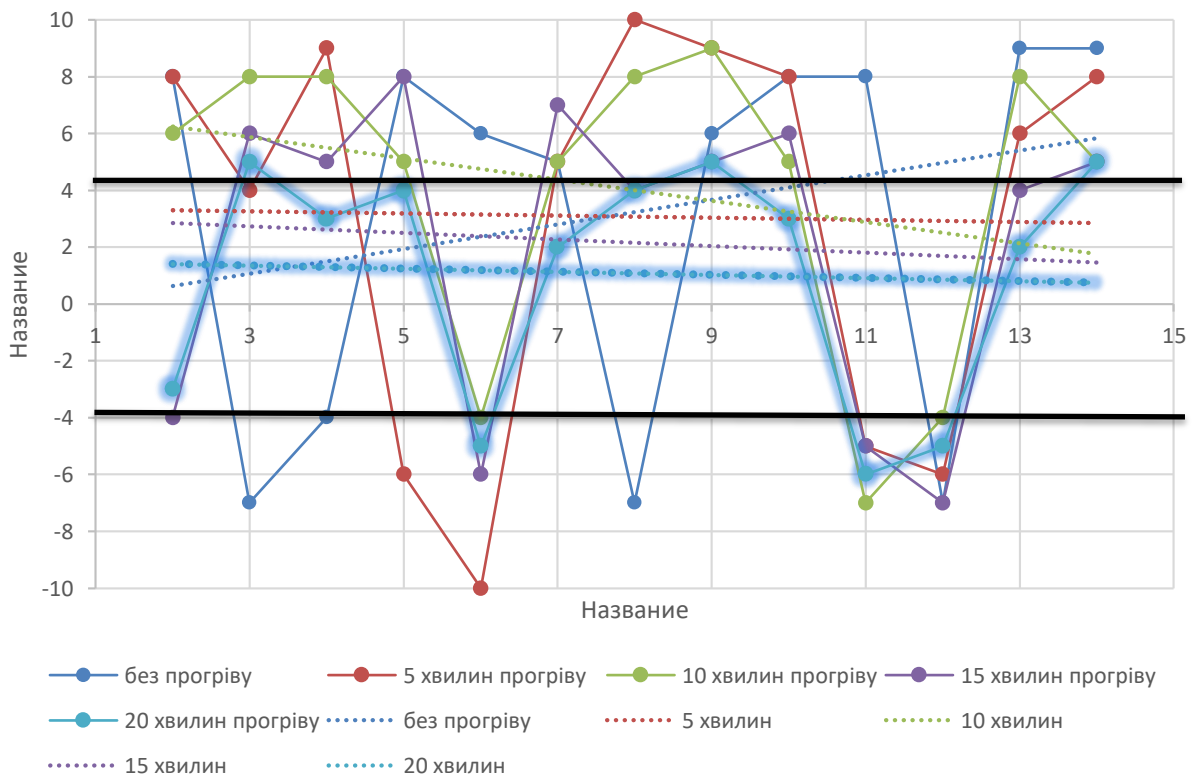


Рис. А.6 Відхилення реперів по профільній лінії «5 метрів» по осі У

## ДОДАТОК Б

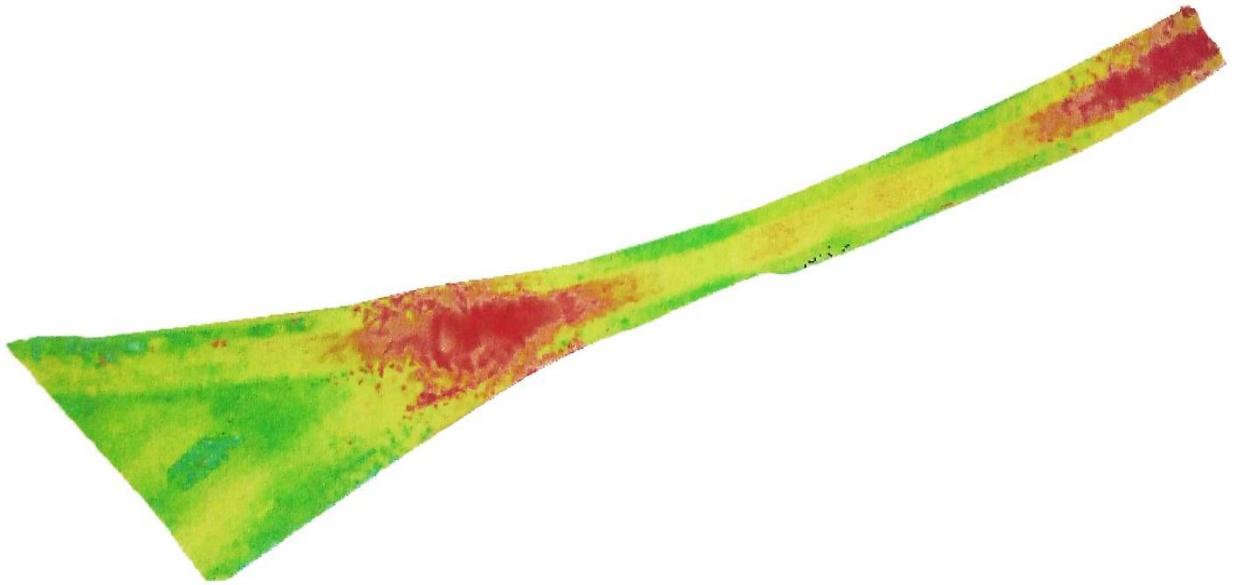
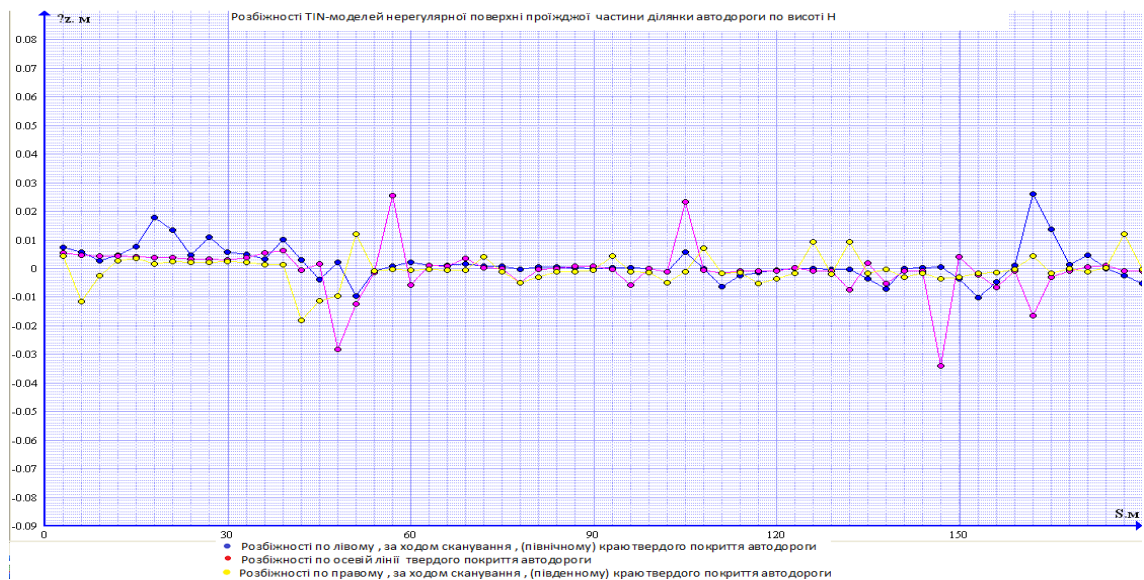
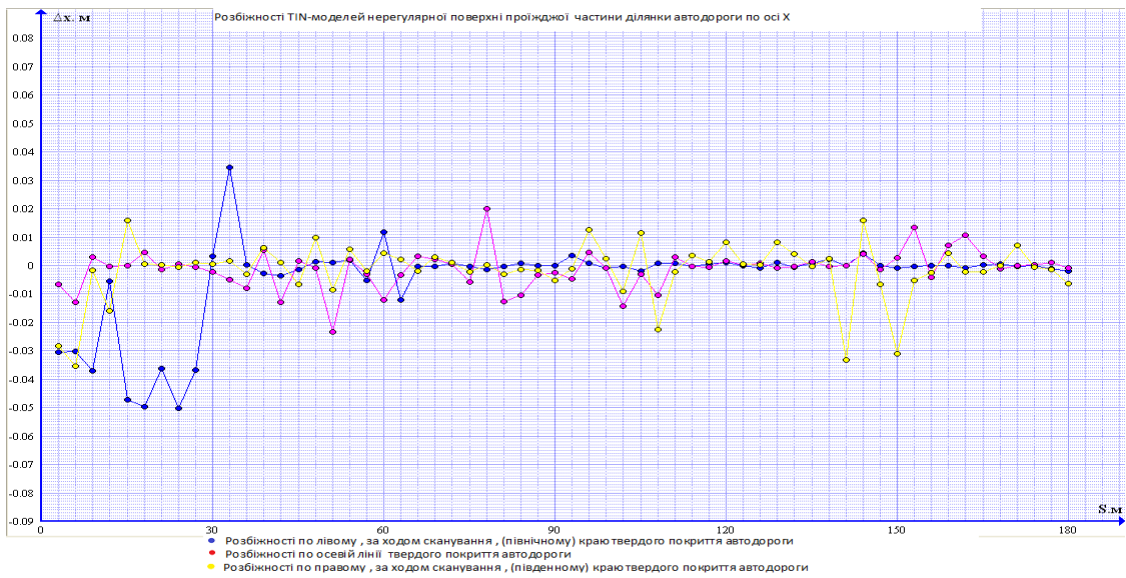


Рис. Б.1 Абрис накладених TIN-моделей нерегулярної поверхні проїжджої частини з двох останніх сканувань на першому відрізку

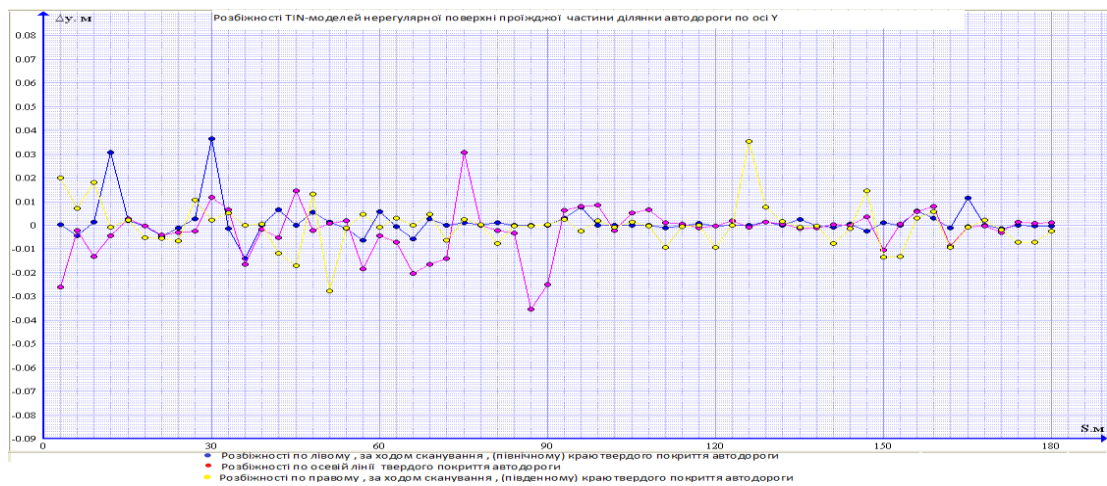
Графік розбіжностей TIN-моделей нерегулярної поверхні ділянки автодороги по осях координат X, Y і по висоті H на першому відрізку наведені на рисунку Б.2.



ПО ВИСОТІ



по осі X



по осі Y

Рис. Б.2 Графік розбіжностей TIN-моделей на першому відрізку  
 Абрис накладених одна на одну TIN-моделей нерегулярної поверхні  
 проїжджої частини 2-го відрізку наведений на рисунку Б.3.



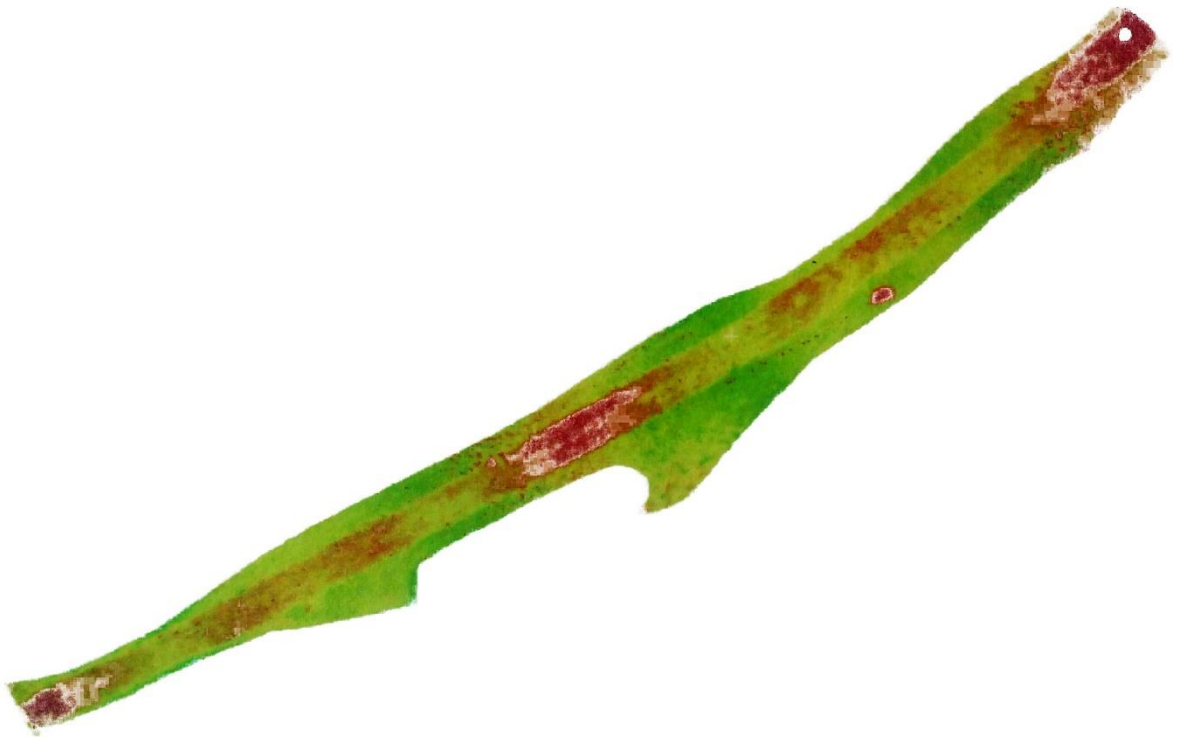
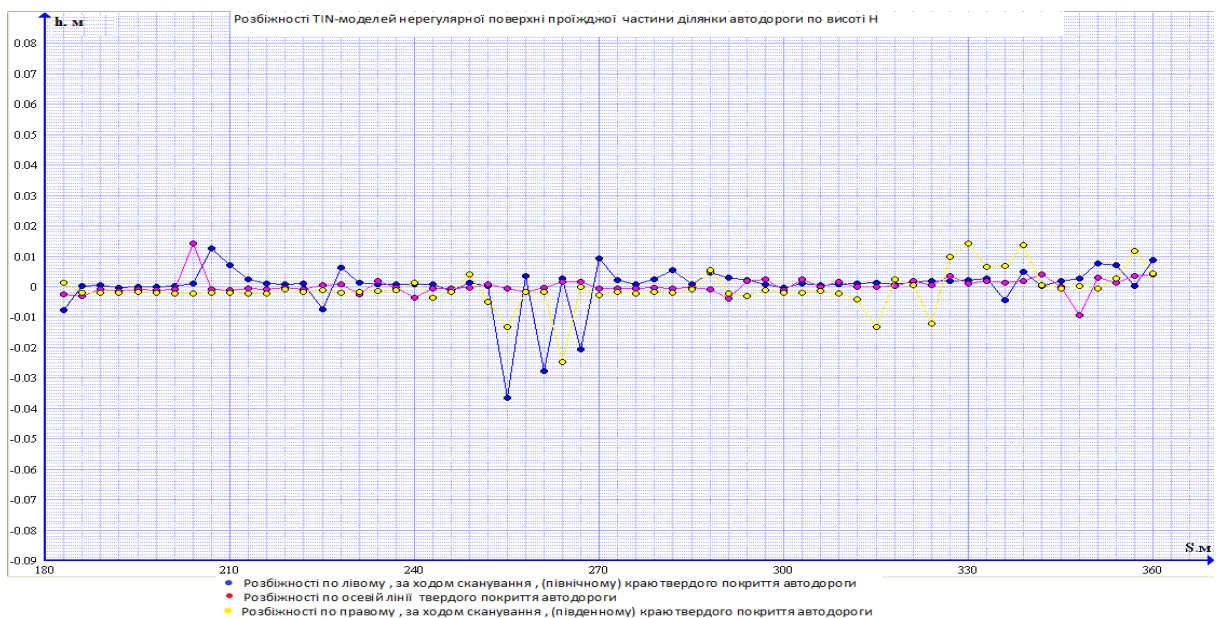


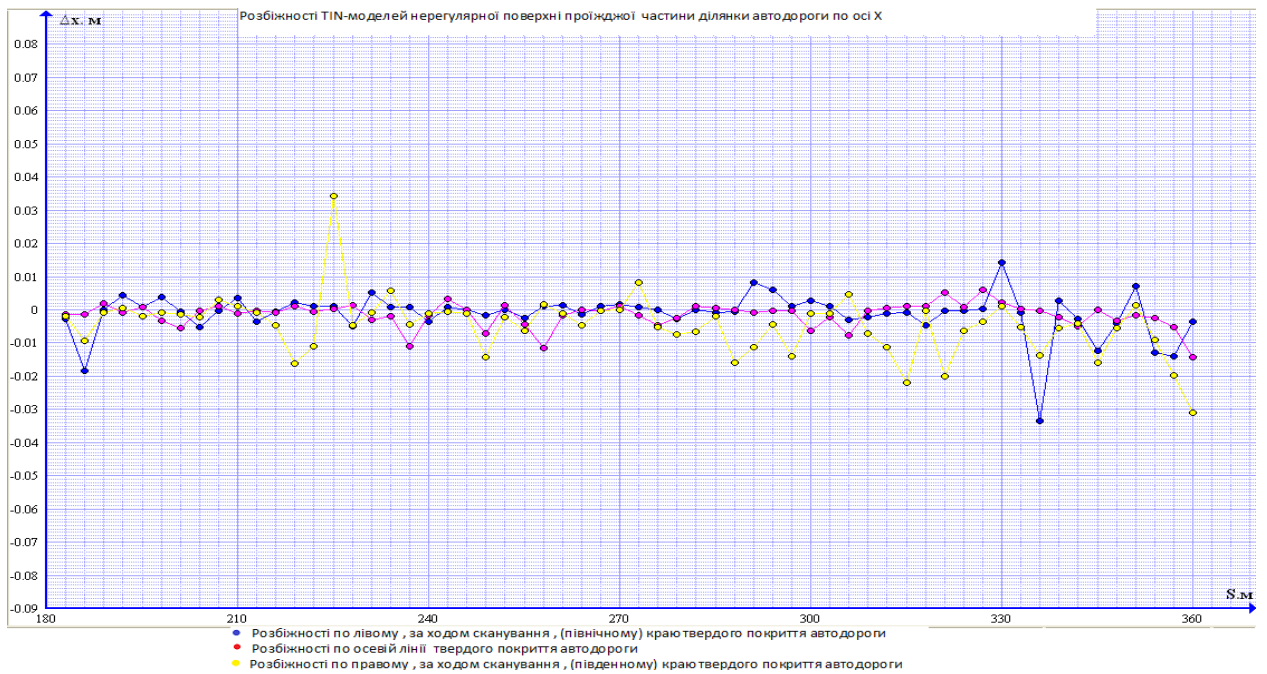
Рис. Б.3 Абрис накладених TIN-моделей нерегулярної поверхні проїжджої частини з двох останніх сканувань на другому відрізку

Графік розбіжностей TIN-моделей нерегулярної поверхні ділянки автодороги по осях координат X, Y і по висоті H на другому відрізку наведені на рисунку Б.4.

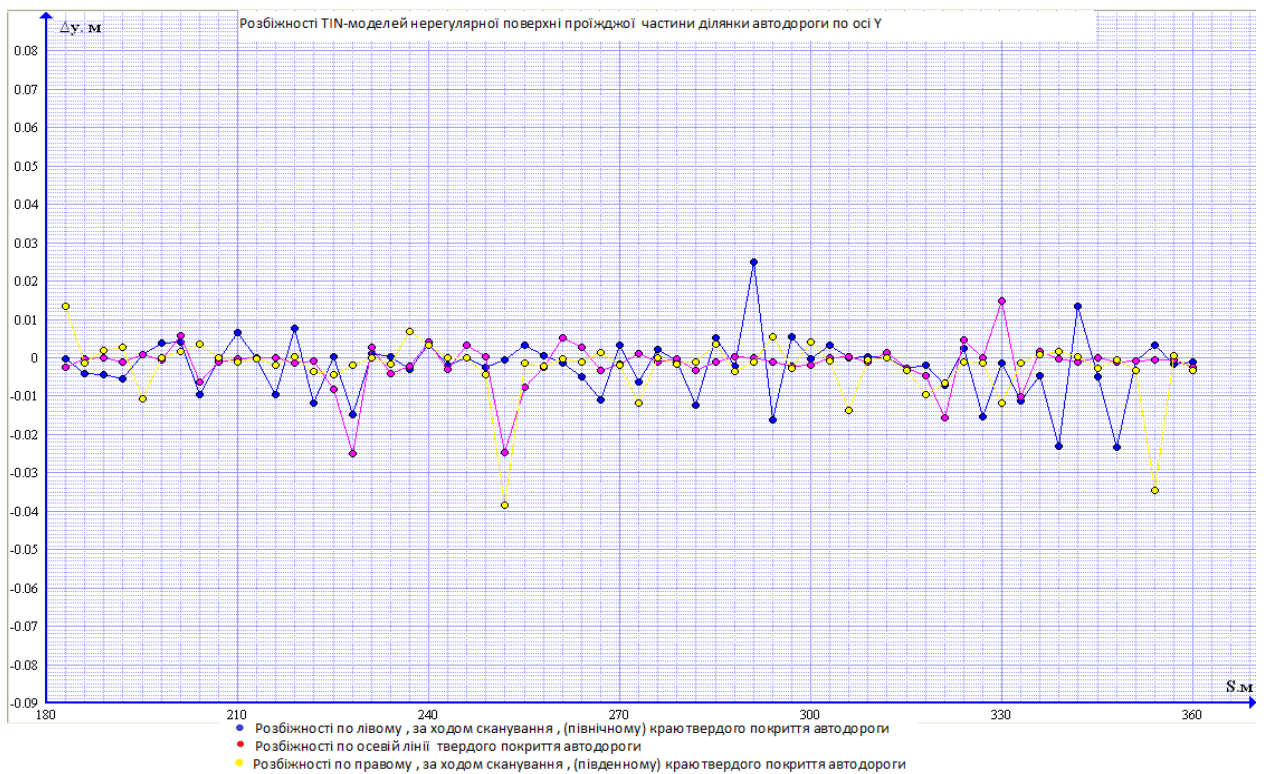


по висоті





по осі X



по осі Y

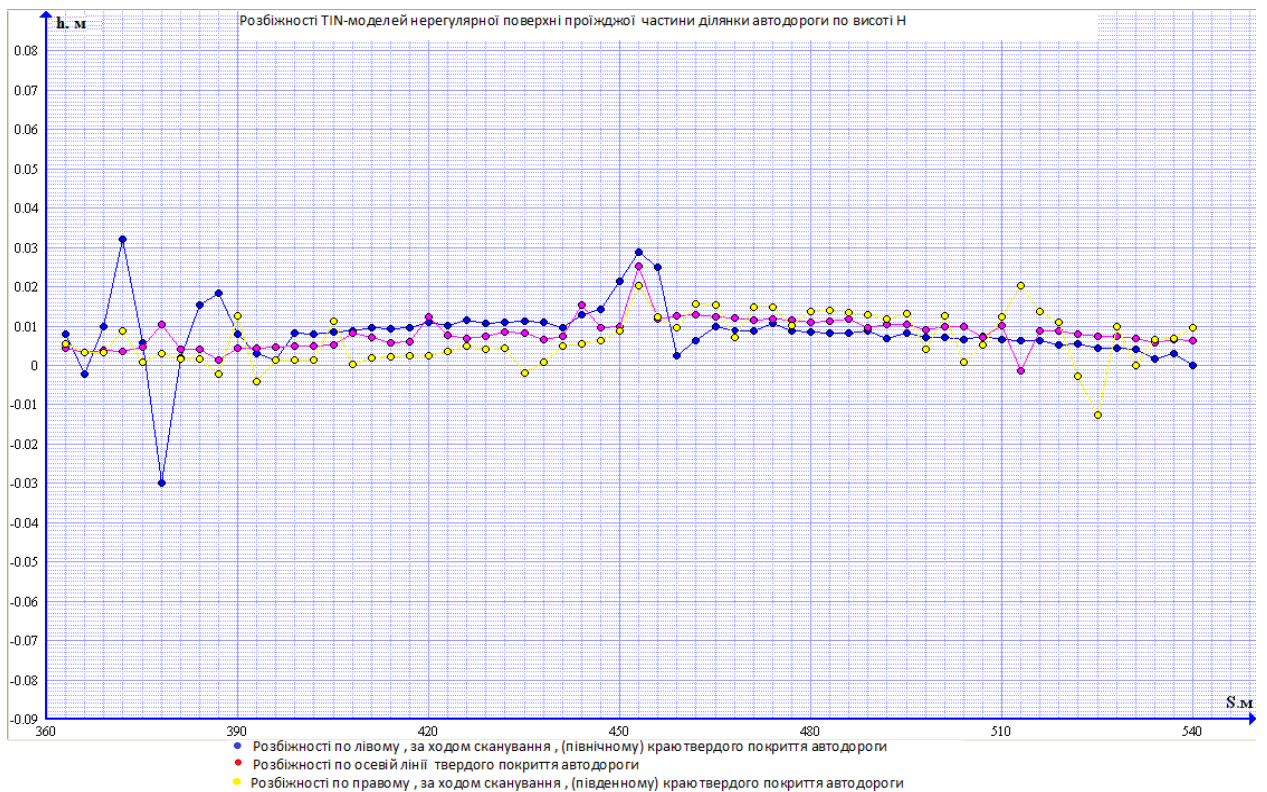
Рис. Б.4 Графік розбіжностей TIN-моделей на другому відрізку

Абрис накладених одна на одну TIN-моделей нерегулярної поверхні проїжджої частини 3-го відрізка наведений на рисунку Б.5.

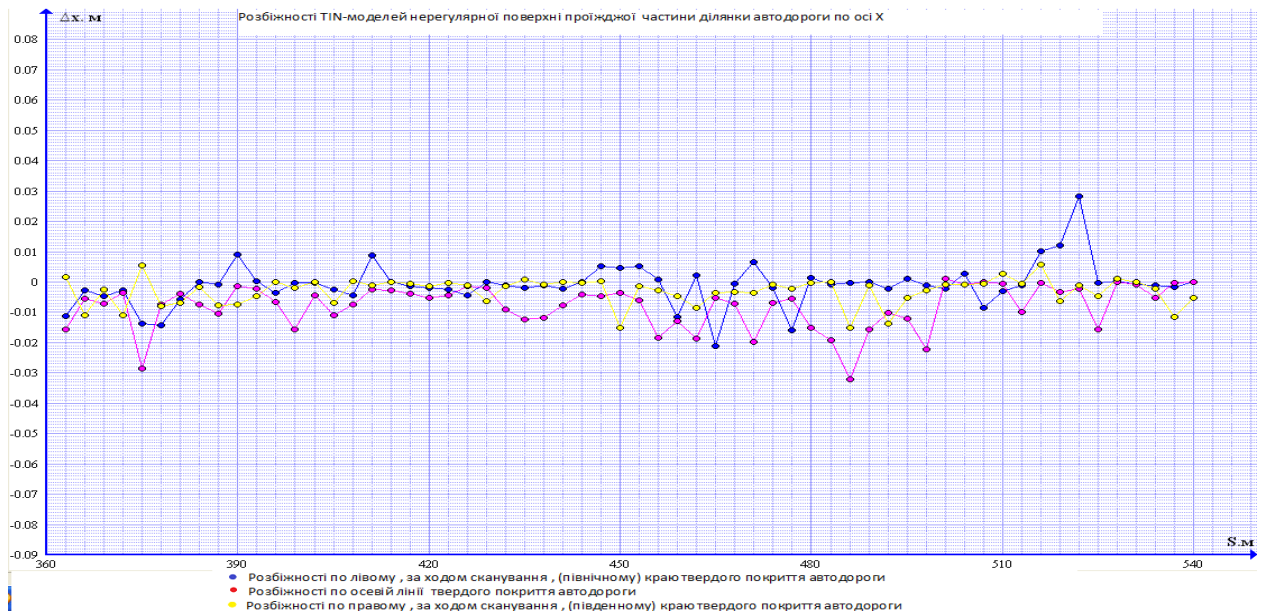


Рис. Б.5 Абрис накладених TIN-моделей нерегулярної поверхні проїжджої частини з двох останніх сканувань на третьому відрізку

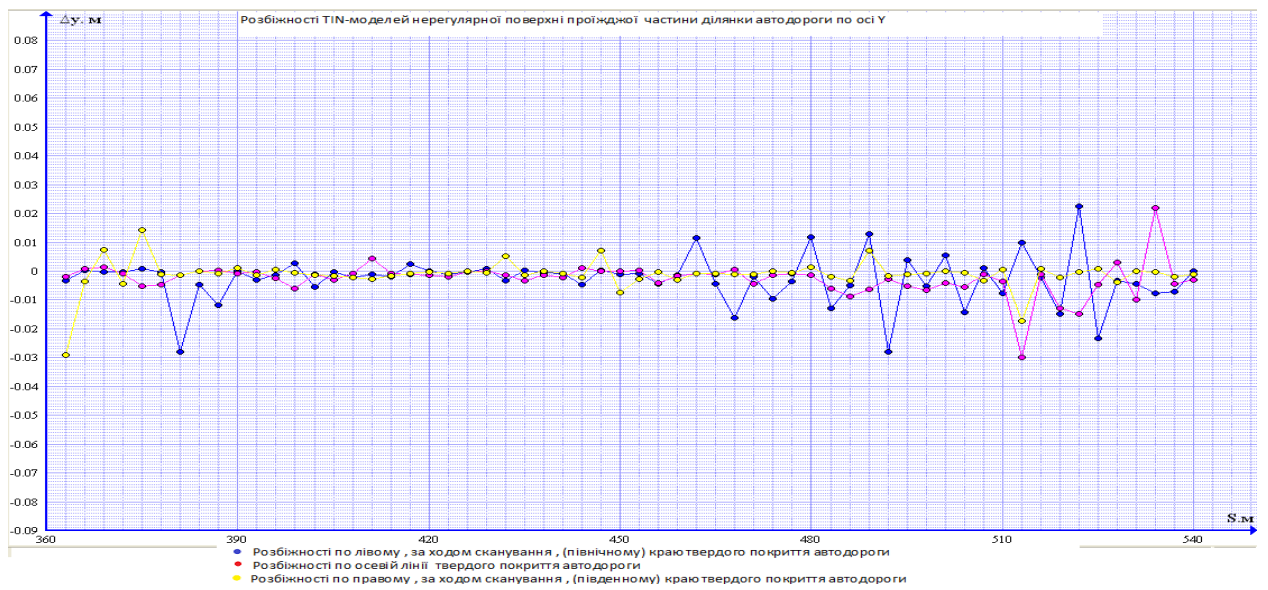
Графік розбіжностей TIN-моделей нерегулярної поверхні ділянки автодороги по осях координат X, Y і по висоті H на третьому відрізку наведені на рисунку Б.6.



ПО ВИСОТІ



по осі X



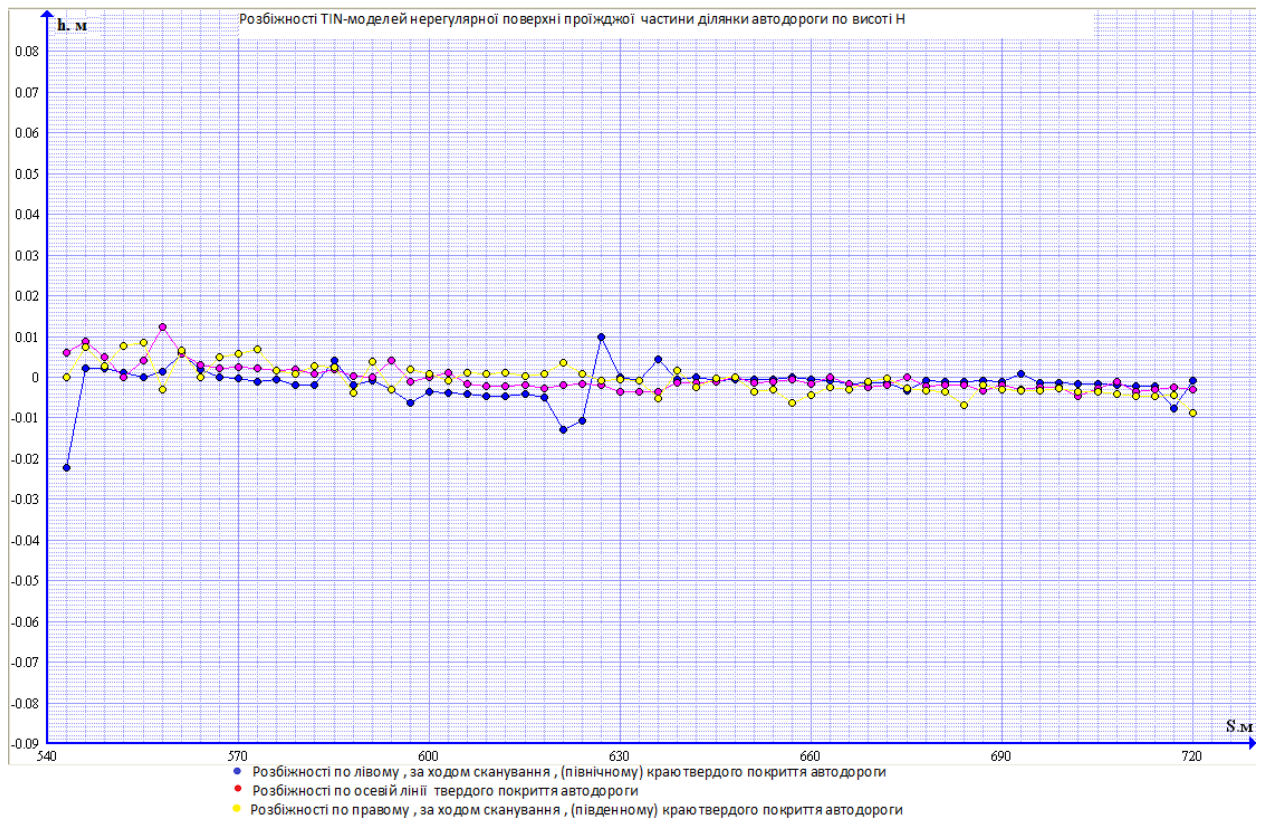
по осі Y

Рис. Б.6 Графік розбіжностей TIN-моделей на третьому відрізку  
 Абрис накладених одна на одну TIN-моделей нерегулярної поверхні  
 проїжджої частини 4-го відрізка наведений на рисунку 4.37.



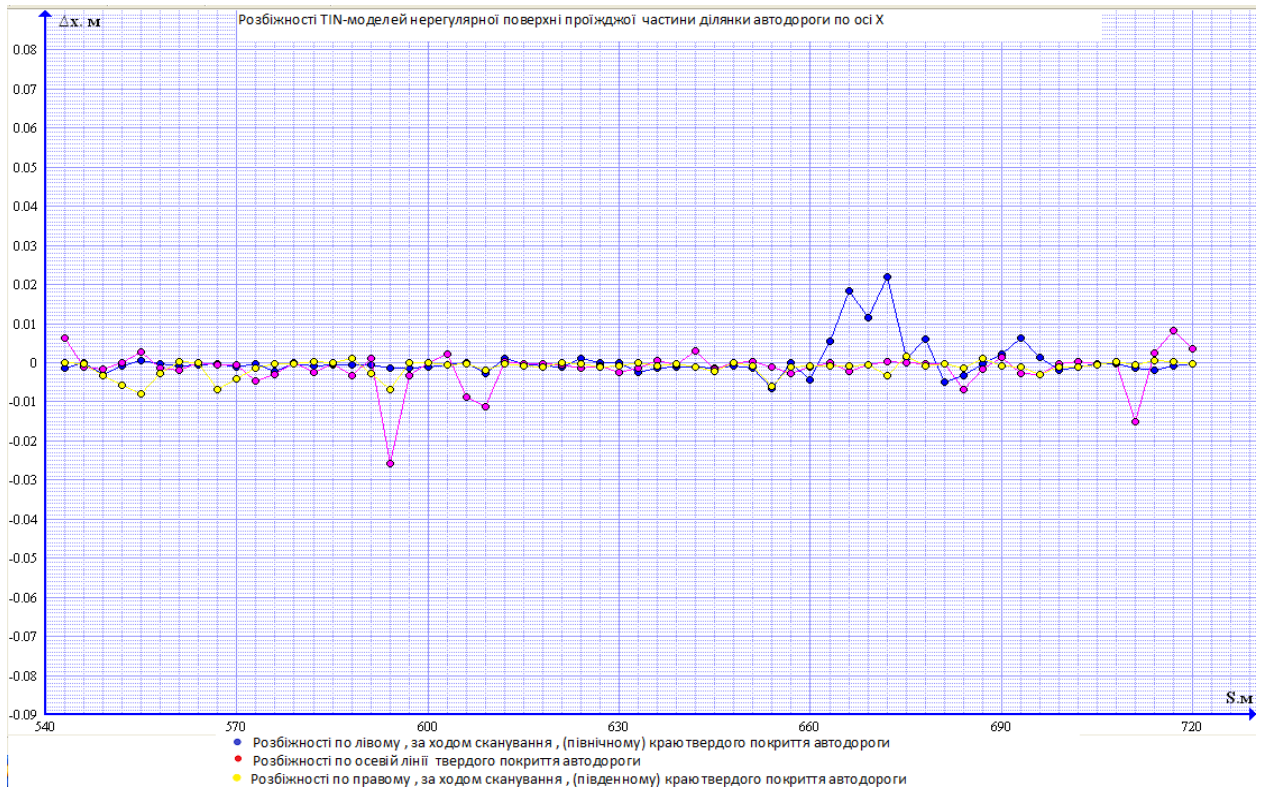
Рис. Б.7 Абрис накладених TIN-моделей нерегулярної поверхні проїжджої частини з двох останніх сканувань на четвертому відрізку

Графік розбіжностей TIN-моделей нерегулярної поверхні ділянки автодороги по осях координат X, Y і по висоті H на четвертому відрізку наведені на рисунку 4.38.

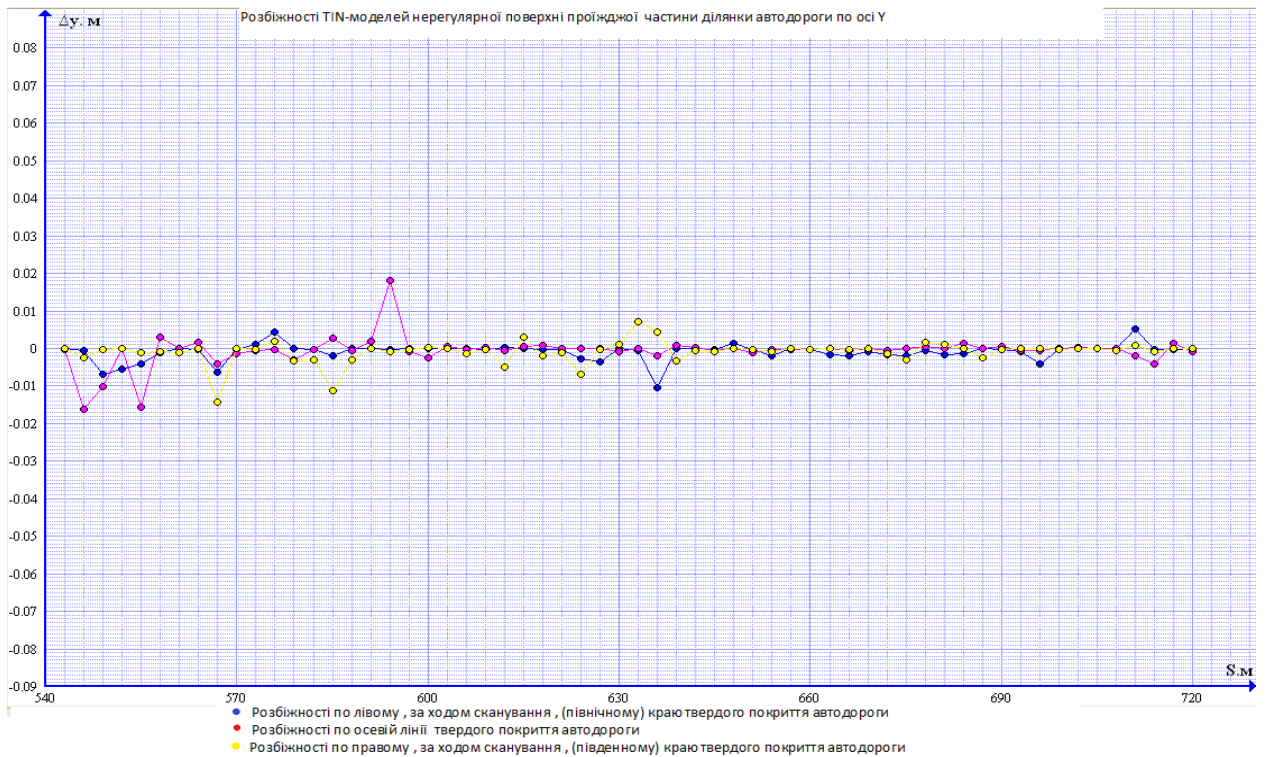


ПО ВИСОТІ





по осі X



по осі Y

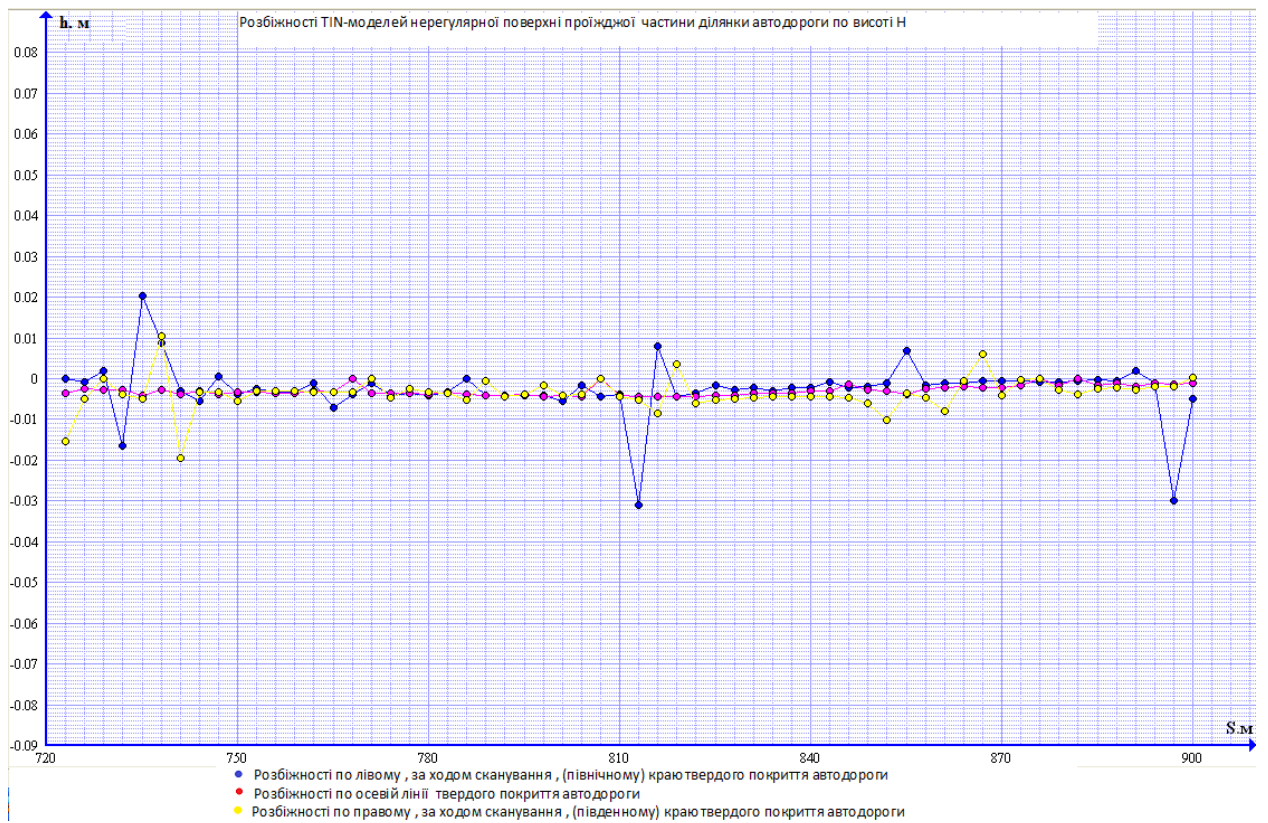
Рис. Б.8 Графік розбіжностей TIN-моделей на четвертому відрізку

Абрис накладених одна на одну TIN-моделей нерегулярної поверхні проїжджої частини 5-го відрізка наведений на рисунку Б.9.

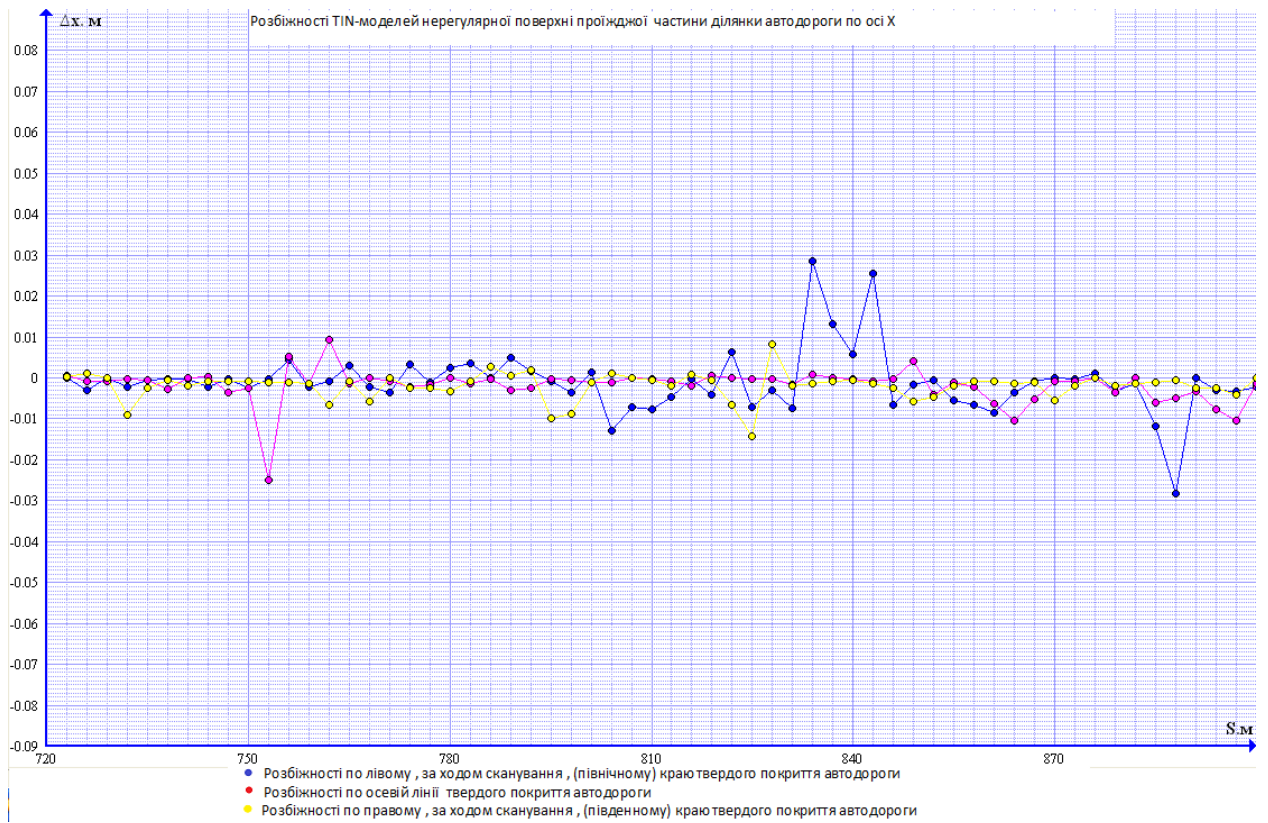


Рис. Б.9 Абрис накладених TIN-моделей нерегулярної поверхні проїжджої частини з двох останніх сканувань на п'ятому відрізку

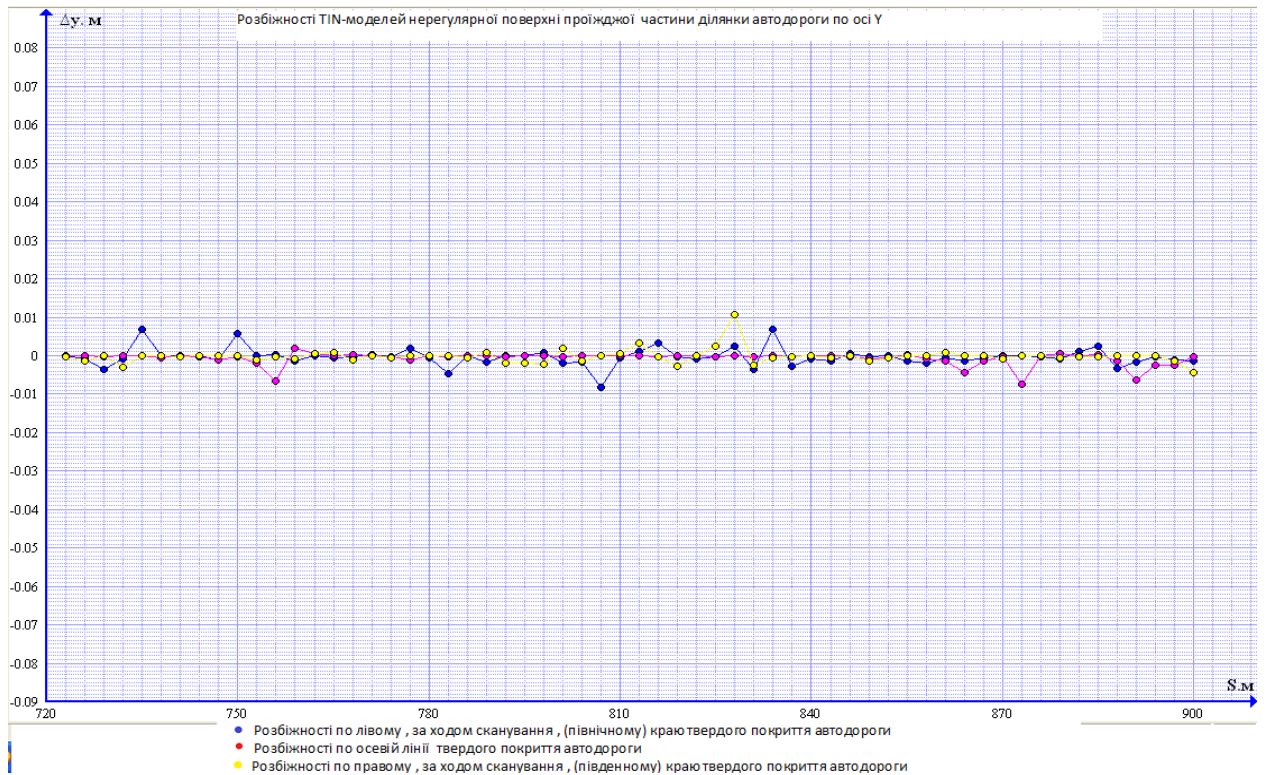
Графік розбіжностей TIN-моделей нерегулярної поверхні ділянки автодороги по осях координат X, Y і по висоті H на п'ятому відрізку наведені на рисунку Б.10.



ПО ВИСОТІ



по осі X



по осі Y

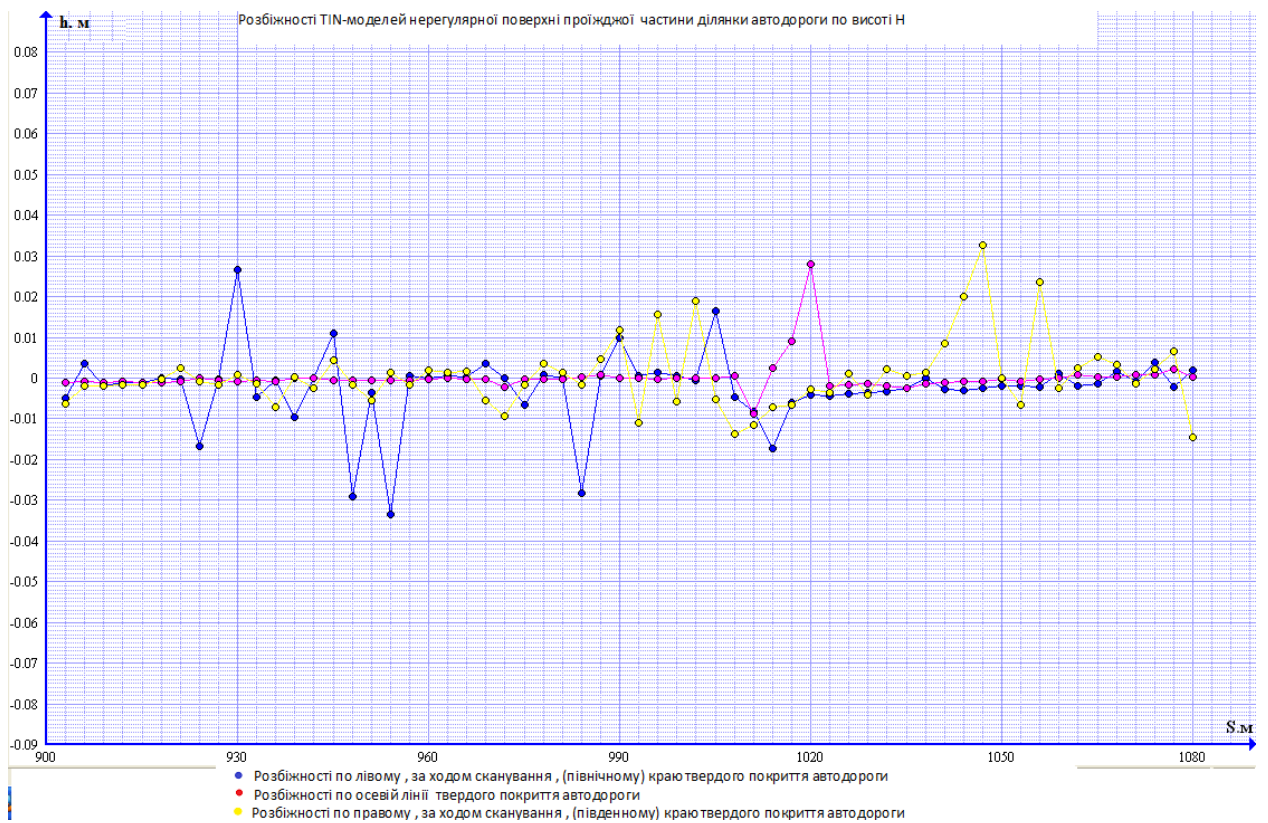
Рис. Б.10 Графік розбіжностей TIN-моделей на п'ятому відрізку

Абрис накладених одна на одну TIN-моделей нерегулярної поверхні проїжджої частини 6-го відрізка наведений на рисунку Б.11.



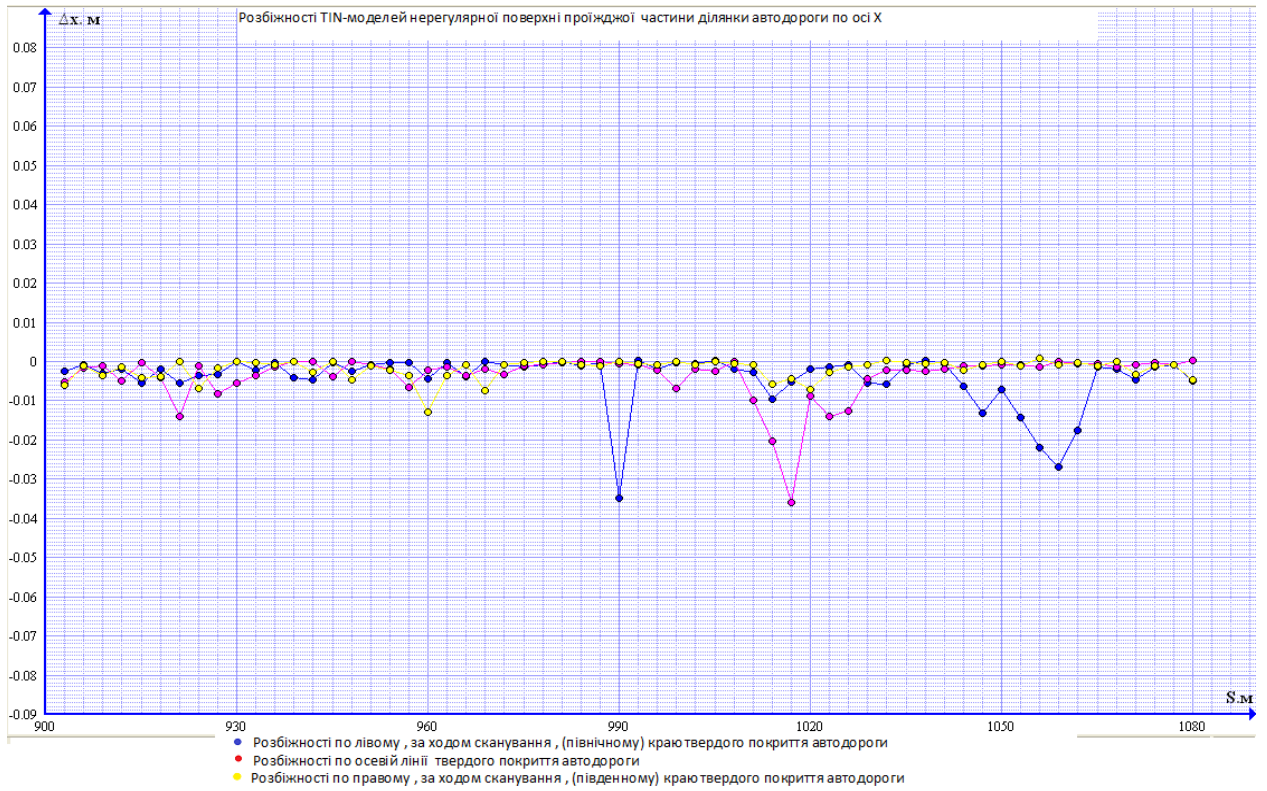
Рис. Б.11 Абрис накладених TIN-моделей нерегулярної поверхні проїжджої частини з двох останніх сканувань на шостому відрізку

Графік розбіжностей TIN-моделей нерегулярної поверхні ділянки автодороги по осях координат X, Y і по висоті H на шостому відрізку наведені на рисунку Б.12.

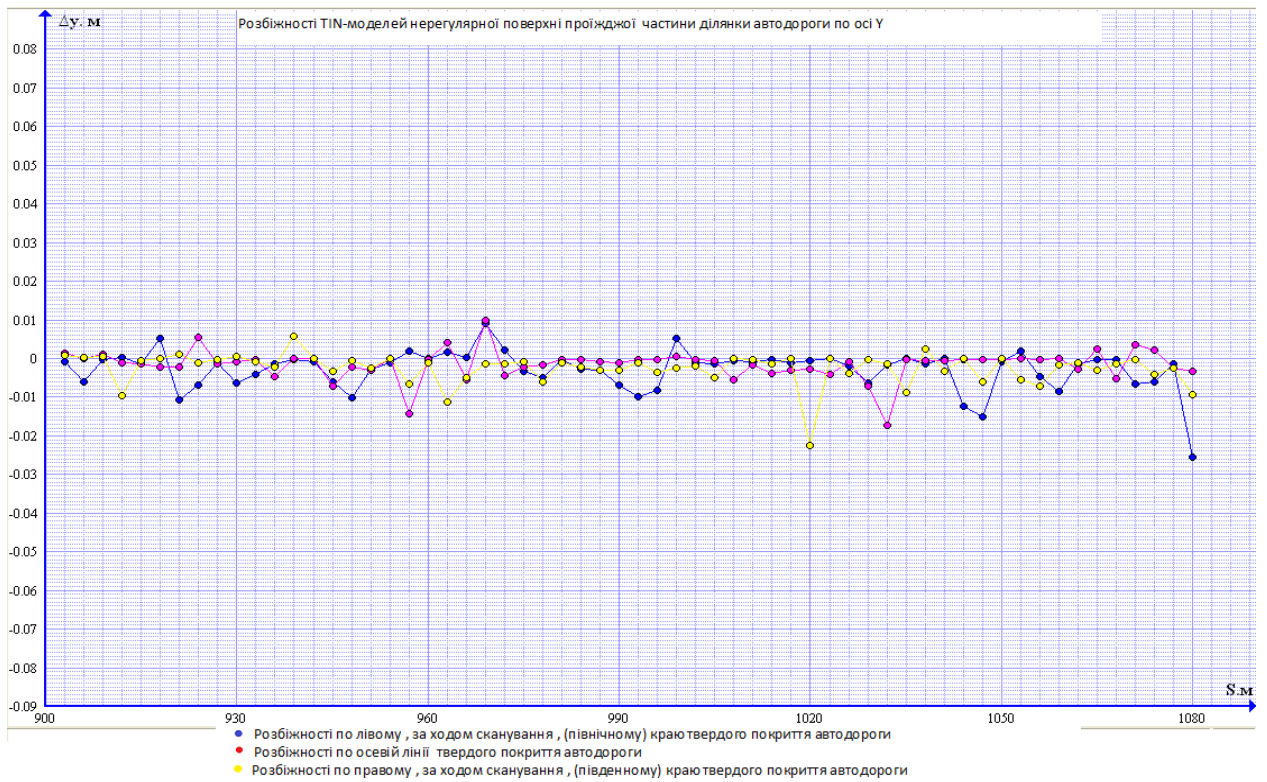


ПО ВИСОТІ





по осі X



по осі Y

Рис. Б.12 Графік розбіжностей TIN-моделей на шостому відрізку