

**ЗАКЛАД ВИЩОЇ ОСВІТИ
«ПОДІЛЬСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ»
ФАКУЛЬТЕТ АГРОТЕХНОЛОГІЙ І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ
КАФЕДРА САДОВО-ПАРКОВОГО ГОСПОДАРСТВА,
ГЕОДЕЗІЇ І ЗЕМЛЕУСТРОЮ**

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

«УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ ГЕОДЕЗИЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ МОНІТОРИНГУ ЛІНІЙНИХ ОБ'ЄКТІВ В ЗОНАХ ВПЛИВУ ПІДЗЕМНИХ ГІРНИЧИХ РОБІТ»

Виконав:

здобувач освітнього ступеня «Магістр»
освітньо-професійної програми
«Землеустрій і кадастр»
спеціальності 193 «Геодезія і землеустрій»
денної форми навчання
БАБИЧ Микола Валентинович

Керівник:

кандидат сільськогосподарських наук, доцент
ПОТАПСЬКИЙ Юрій Васильович

Оцінка захисту:

Національна шкала _____
Кількість балів _____ Шкала ECTS _____

«_____» _____ 2024 р.

Допускається до захисту:

«_____» _____ 2024 р.

Гарант освітньо-професійної програми

«Землеустрій і кадастр»

спеціальності 193 «Геодезія і землеустрій»

доктор економічних наук, професор

_____ ЯСІНЕЦЬКА Ірина Анатоліївна

ЗМІСТ

ВСТУП.....	3
1. СУЧАСНИЙ СТАН ТЕХНОЛОГІЙ З ВИЗНАЧЕННЯ ДЕФОРМАЦІЙ ПОВЕРХНІ І НАДР ЗЕМЛІ.....	7
1.1 Причини і необхідність визначення деформацій поверхні і надр.....	7
1.2. Аналіз існуючих методів визначення деформацій інженерних споруд.....	16
1.3. Області застосування та переваги сучасного методу наземного лазерного сканування.....	20
2. ХАРАКТЕРИСТИКИ НАЗЕМНИХ ЛАЗЕРНИХ СКАНЕРІВ, ОСНОВНІ ПОХИБКИ ПРИ ВИКОНАННІ РОБІТ НАЗЕМНИМ ЛАЗЕРНИМ СКАНЕРОМ	25
2.1 Наземні лазерні сканери, що використовуються сьогодні.....	25
2.2 Вимірювання сучасними наземними лазерними сканерами, основні етапи робіт	35
2.3 Класифікація похибок у результатах наземного лазерного сканування.....	39
2.4 Програмне забезпечення для обробки даних, отриманих за допомогою наземних лазерних сканерів	49
3. РОЗРОБКА МЕТОДИКИ ВИЗНАЧЕННЯ ДЕФОРМАЦІЙ ЛІНІЙНИХ СПОРУД ЗАСОБАМИ НАЗЕМНОГО ЛАЗЕРНОГО СКАНУВАННЯ	61
3.1 Сучасні інструменти і технології отримання тривимірних координат для моніторингу лінійних споруд.....	61
3.2 . Методика зйомки лінійних споруд методом наземного лазерного сканування для подальшого моніторингу.....	63
3.3 Створення цифрових планів лінійних споруд на основі наземного лазерного сканування з метою подальшого моніторингу	71
3.4. Методика створення просторових тривимірних моделей лінійних інженерних споруд	76
ВИСНОВОК	79
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	81
ДОДАТКИ.....	86

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 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;

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.

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.

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

сканування.

Структура та обсяг роботи:

Робота складається з вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел, додатків. Повний обсяг роботи 100 сторінок, 22 рисунків, 6 таблиць.

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 XX 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 XX 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 поклатися, 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 ендегенними 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 ізостатичної 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).

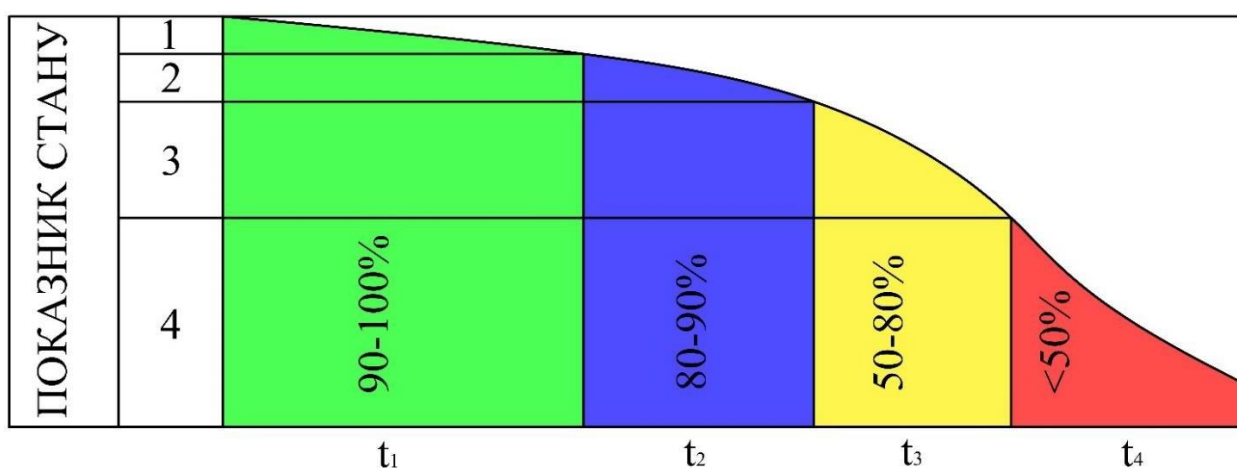


Рис. 1.1 Характерні періоди зміни стану дороги:

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 прийняттого стану одягу автодороги необхідно вчасно виконувати роботи з його відновлення, щоб уникнути передчасної реконструкції всієї дороги (рисунк 1.2)

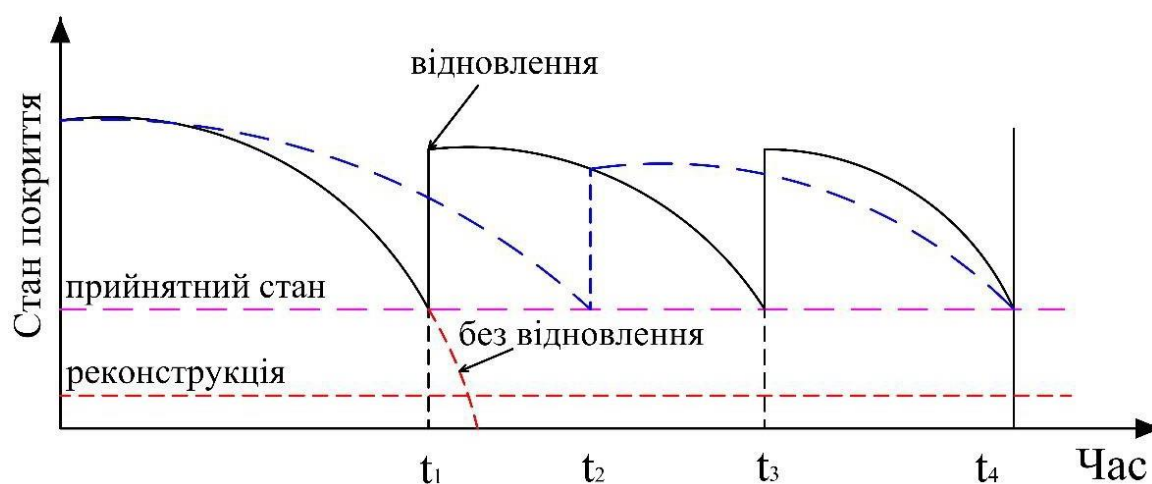


Рис. 1.2 Терміни поточних ремонтів дороги

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 тріангуляції 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, тріангуляції, 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 проєктним показникам. Особливо ефективно використання даного методу при зйомці складних металоконструкцій. Останнім часом у будівництві все більшого поширення набувають навісні вентильовані фасади (НВФ) і світлопрозорі

конструкції, що дозволяють поліпшити зовнішній вигляд будівель. Результати зйомки фасадів з використанням НЛС дозволяють на стадії проектування точно розрахувати обсяг і специфікації застосовуваних матеріалів. Така проблема на сьогоднішній день стоїть досить гостро, так як точність і детальність проекту 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, проектувати 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 проектної документації на ці об'єкти; коригування проекту 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].

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 2';

- 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 α відстань

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

де π – 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 тріангуляції.

Тріангуляційний метод заснований на розрахунку шуканої відстані через співвідношення трикутника з використанням відомих параметрів системи. Він дозволяє вимірювати як відносну зміну відстані від датчика до контролюваного 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 тріангуляції	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; ґ) 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° в обох площинах [58,59], більшість сучасних моделей мають кут поля зору близький до панорамного (до 360° в горизонтальній і 320° 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°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 IEC 60825-1 [60]. Сучасні НЛС дозволяють працювати при температурах до мінус 40°C і мають клас захисту до IP66.

За ступенем безпеки лазери діляться на декілька класів відповідно до міжнародного стандарту IEC 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).

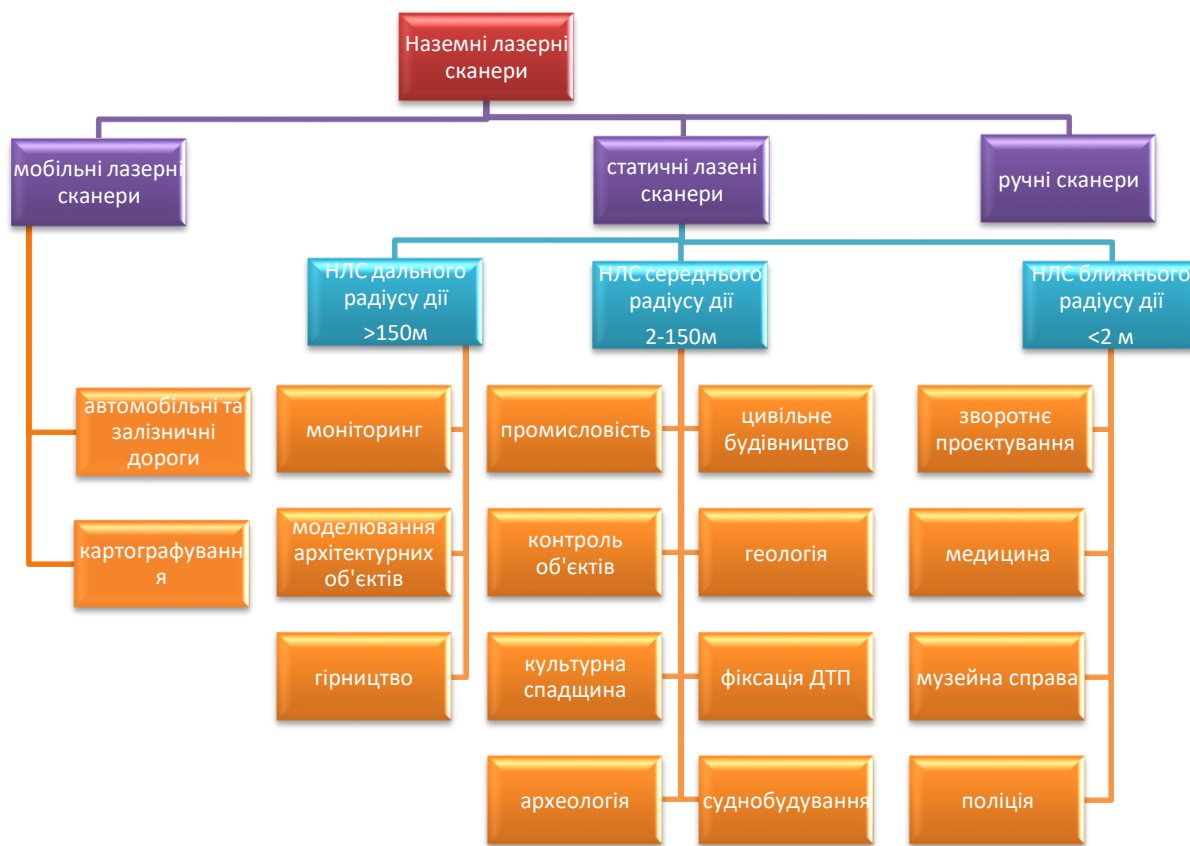


Рис. 2.2 - Класифікація НЛС.

- 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]

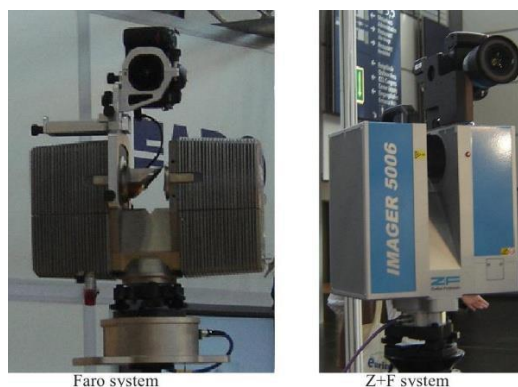


Рис. 2.5 Інтегрована камера з НЛС

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 позиціювання, відеокамера та пристрої для боротьби з вібрацією чи передачею даних тощо[71].



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 роботі 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).

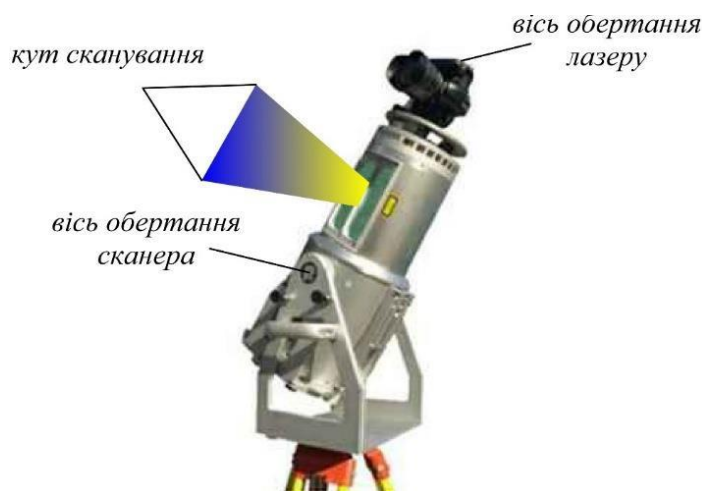


Рис.2.8 - Наземний лазерний сканер з обмеженим кутом поля зору

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).

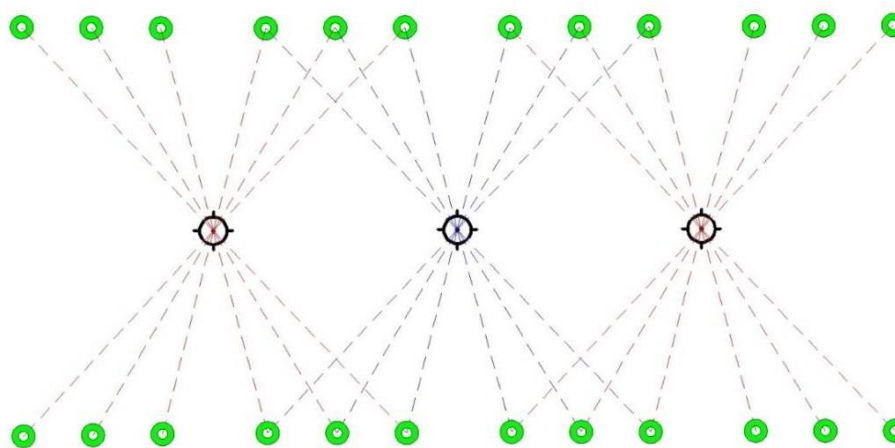


Рис. 2.11 Схема створення ПВО прокладанням ходу за допомогою сканера

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 відрізнятися від заданої внаслідок розбіжності положення відеокамери з приймально-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 (λ) 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; λ -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]:

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

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

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

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

Підставляючи в формулу значення кожного метеоелемента з кроком: $\Delta t=10^\circ\text{C}$, $\Delta P=10$ 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°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 роботі.

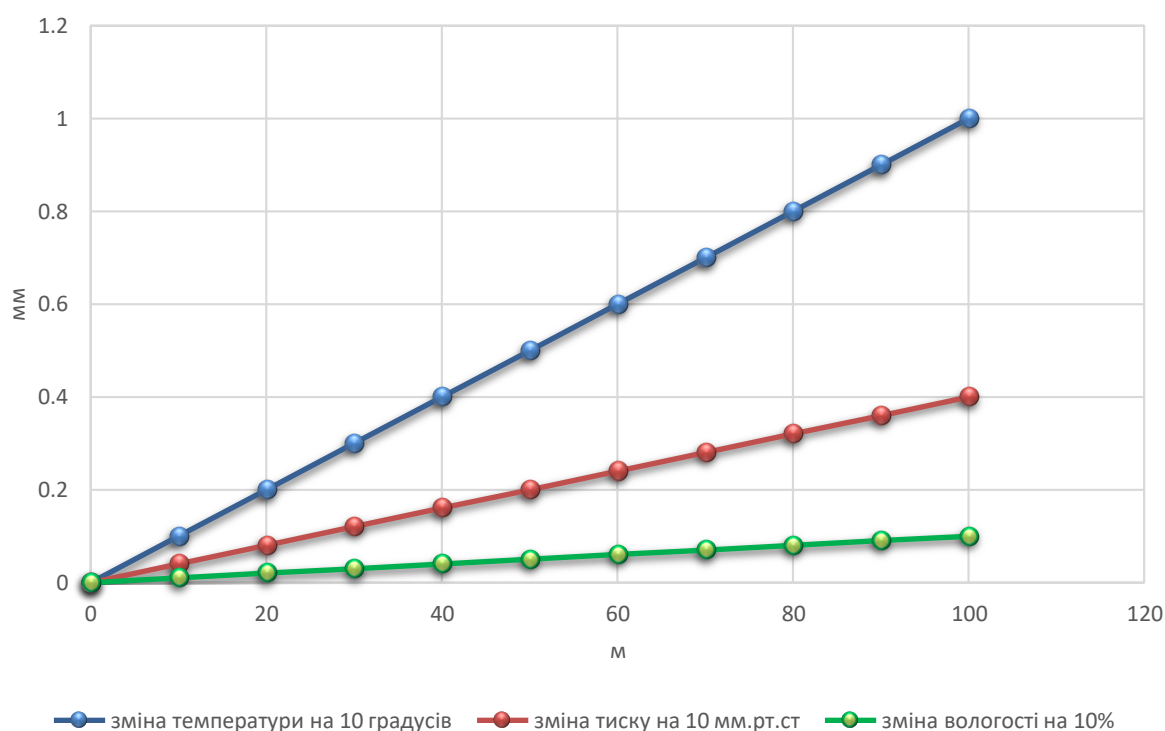


Рис. 2.11 – Залежність результатів вимірювань від метеоумов.

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.

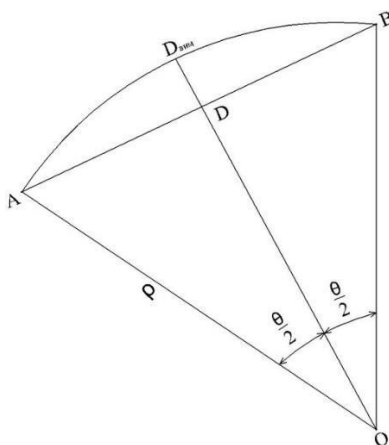


Рис. 2.12 Рефракційне відділення траєкторії

де: $D_{\text{вим}}$ - хорда; AB – шукана геометрична відстань D ; $AO = OB = \rho$ – радіус кривизни; θ -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]:

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

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 ρ 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.

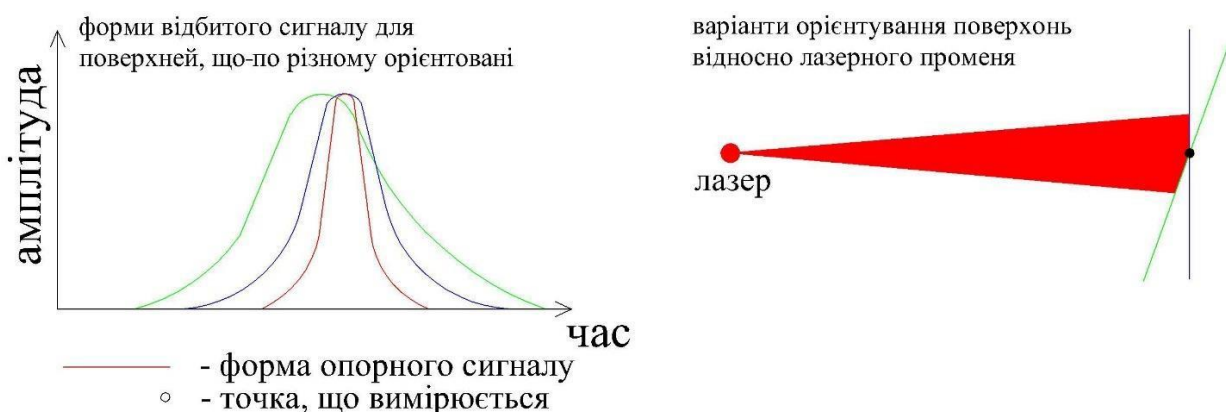


Рис. 2.13 Залежність форми відбитого сигналу від орієнтації поверхні відбиття

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].

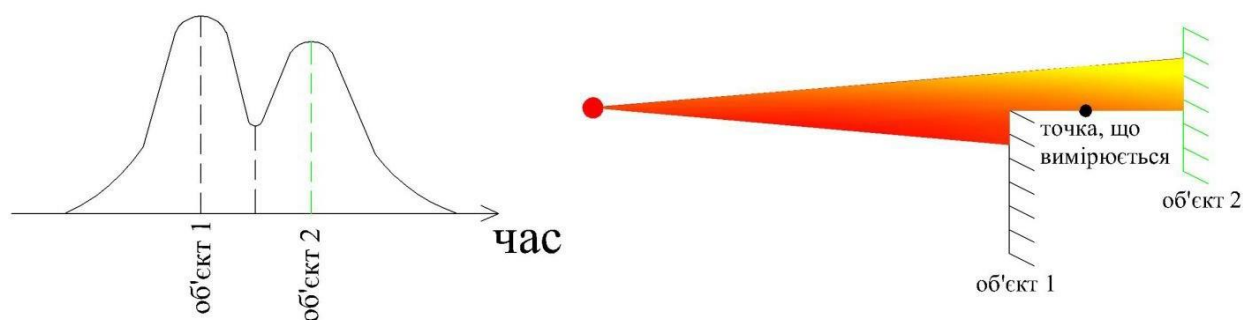


Рис. 2.14 Форма сигналу, що потрапив на межу двох об'єктів

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.

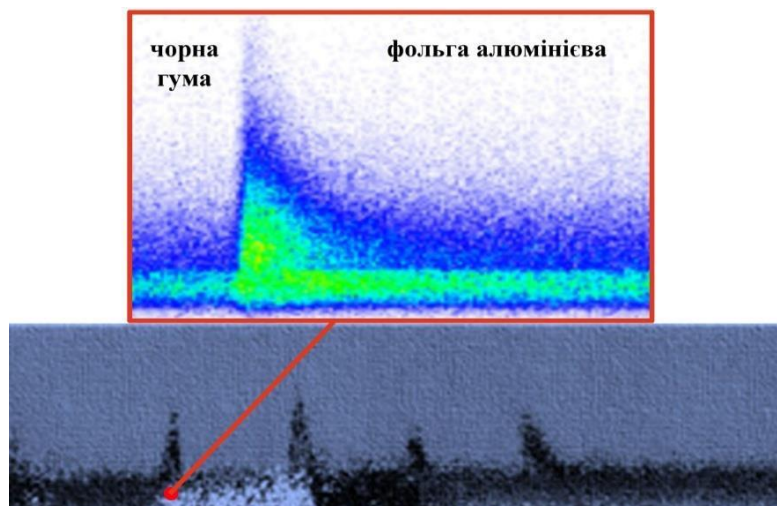


Рис. 2.15 Сплески на точковій моделі, викликані переходом між поверхнями з різним коефіцієнтом відбиття НЛС Riegl LMS-Z360

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

- вжити 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.

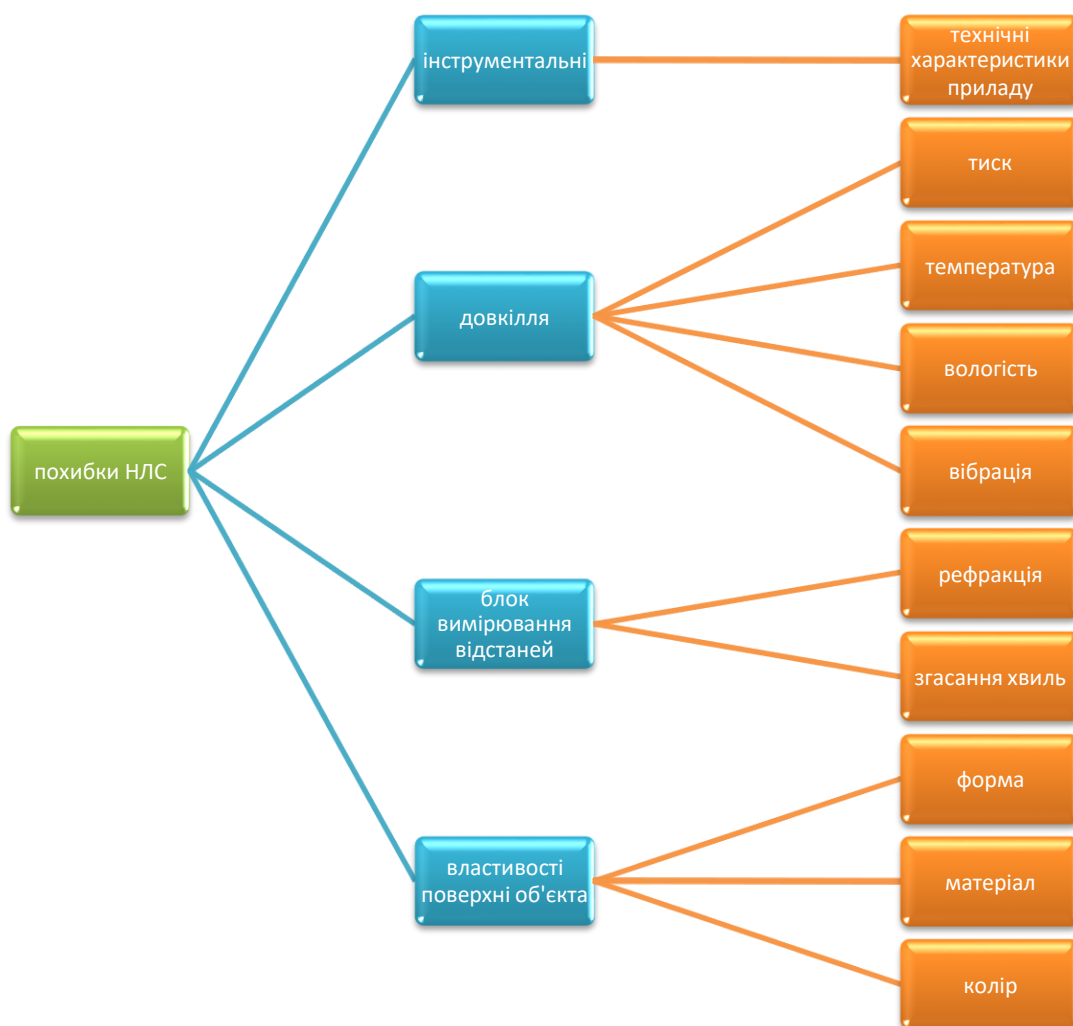


Рис. 2.16 Класифікація похибок НЛС

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 вимірюваних 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):

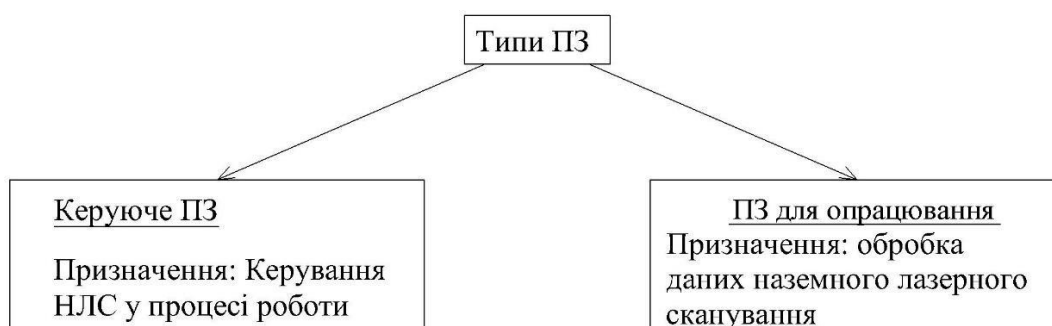


Рис. 2.17 - Типи ПЗ

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 (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>).

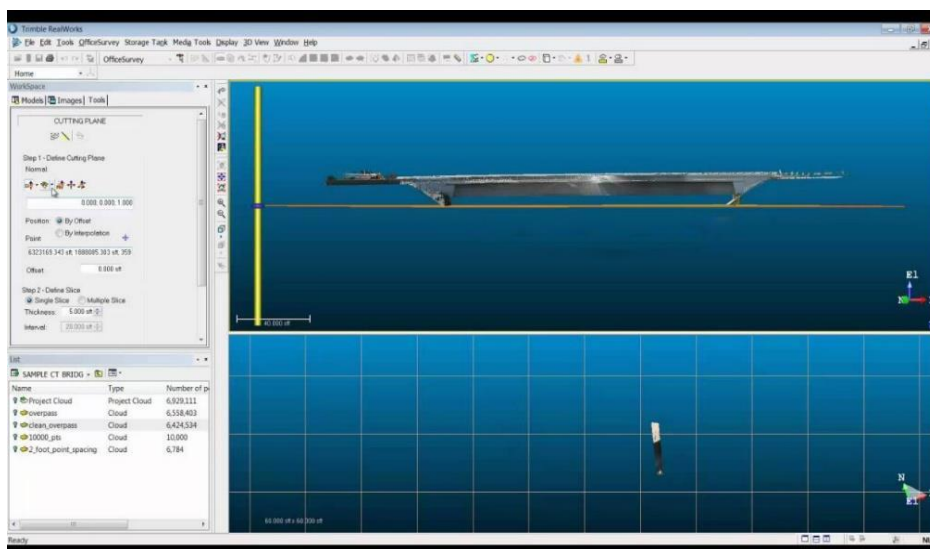


Рис. 2.19 Побудова профілю та перерізу точкової моделі

5) створення ортозображень за моделлю. Функція дає змогу спроектувати фрагмент точкової моделі на задану площину і отримати зображення, кожен піксель якого відповідає виміряній 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 проєктуванні 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 проєктування 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 тріангуляційних мереж. Функції визначення площі поверхні плоских тріангуляційних 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 напіваавтоматичного 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;

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

ж) робота з об'ємними тріангуляційними 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 тріангуляційних 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 тріангуляційних мереж. Функції створення об'ємних тріангуляційних мереж за точковою моделлю;

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

3) текстурування об'ємних тріангуляційних мереж. Можливість накладення зображень на об'ємну тріангуляційну 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 тріангуляції 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 тріангуляційних 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 можливості 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, $K_{\text{еп}}$	Орієнтування, $K_{\text{ор}}$	Робота з точковою моделлю, $K_{\text{зр}}$	Побудова двохвимірних примітивів, $K_{\text{зр}}$	Плоскі триангуляційні мережі, $K_{\text{тр}}$	Твердотільне моделювання, $K_{\text{тр}}$	Об'ємні триангуляційні мережі та NURBS, $K_{\text{тр}}$	Сканування, $K_{\text{тр}}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Trimble 3Dipsos 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

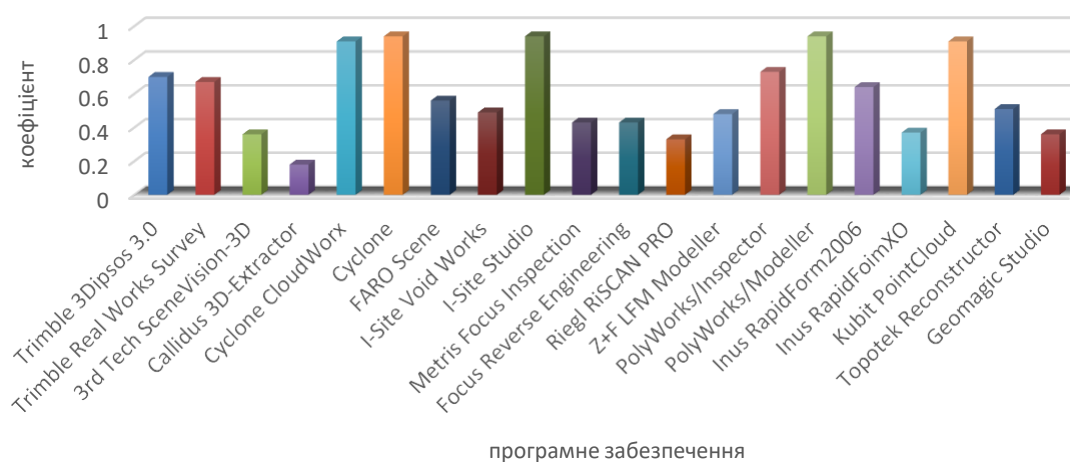


Рис. 2.21 Коефіцієнти функціональності ПЗ F_p для створення ЦТП лінійних споруд

Для створення цифрових тривимірних моделей (ЦТМ) лінійних споруд основна увага повинна приділятися функції твердотільного моделювання, роботі з точковою моделлю, побудові двовимірних примітивів і тріангуляційних 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 тріангуляційними мережами	10
Експорт/імпорт даних	10

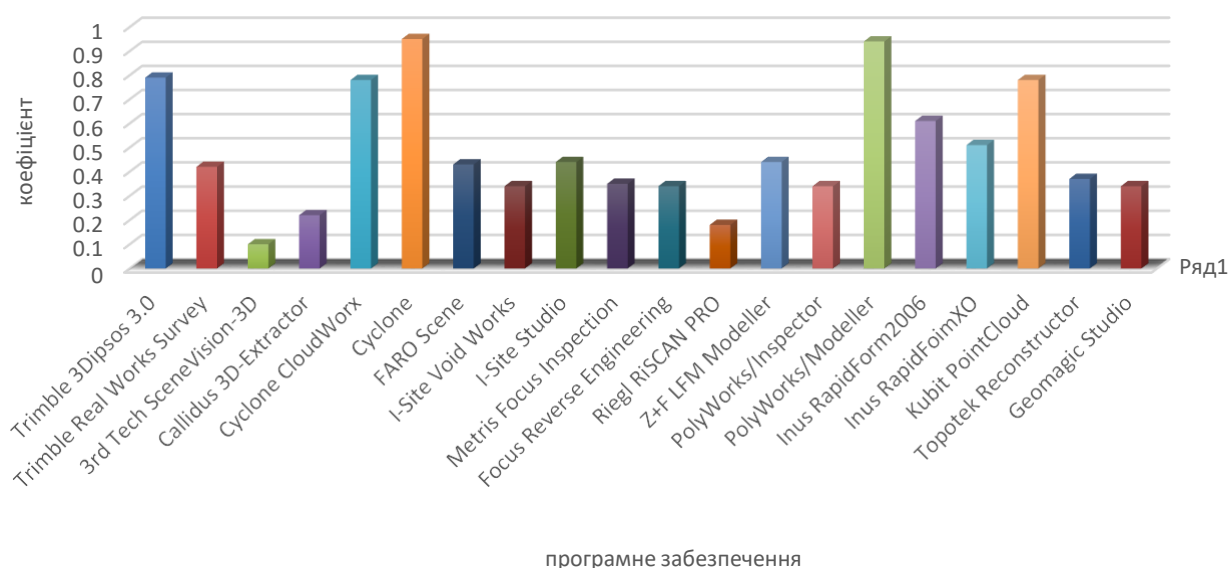


Рис. 2.22 Коефіцієнти функціональності ПЗ F_{3D} для створення ЦТМ лінійних споруд

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.

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 знімками 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 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 рекогносрування, 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.

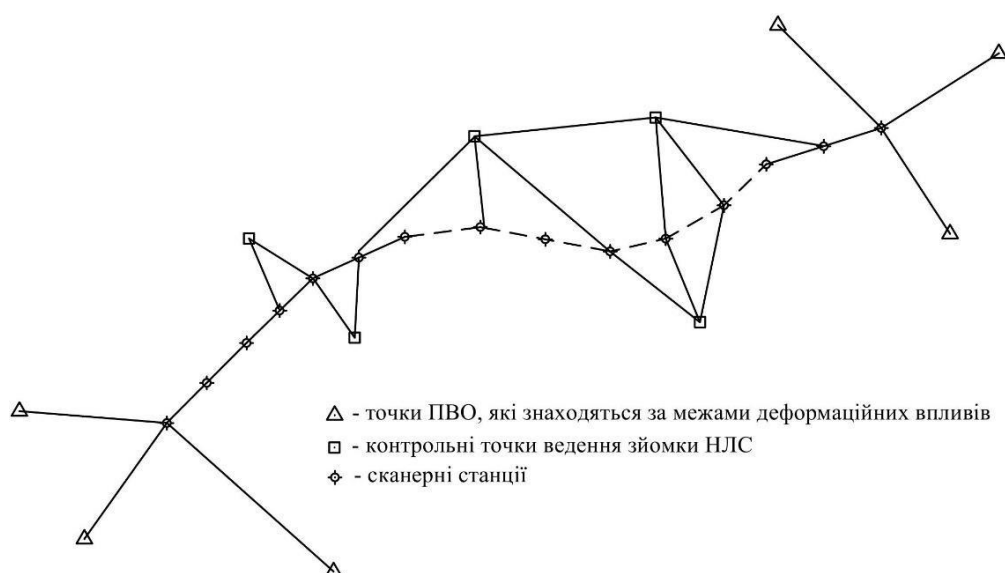


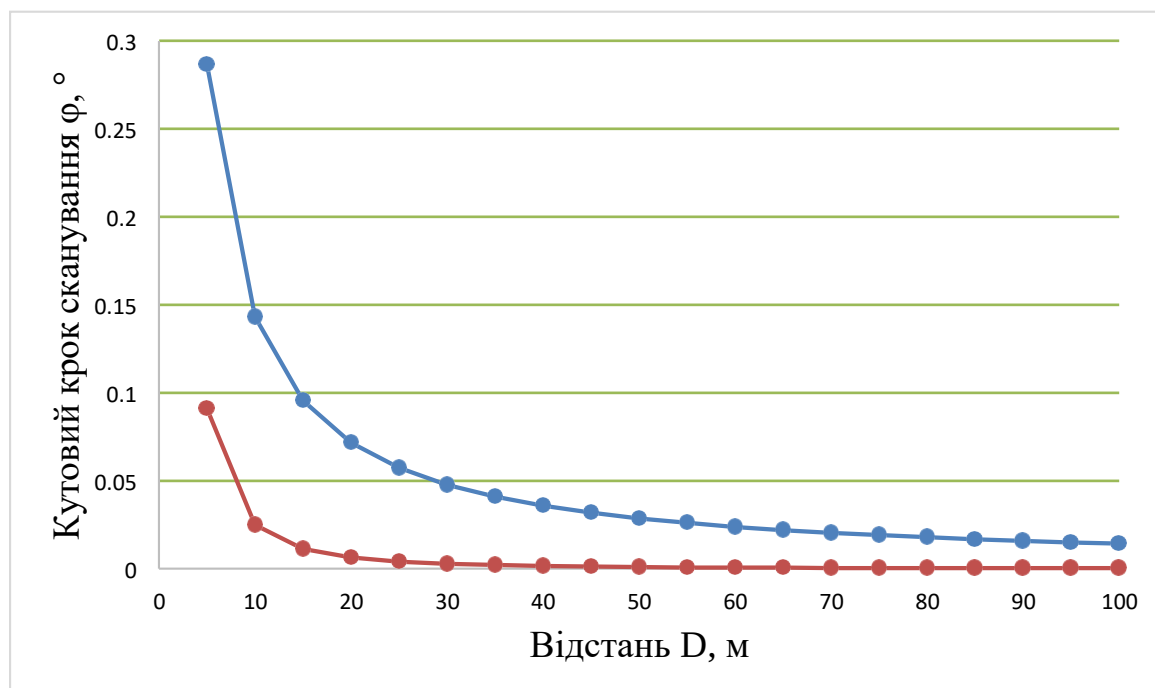
Рис. 3.1 Типова схема розвитку ПВО при зйомці лінійних інженерних споруд

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 φ 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 φ за формулою:

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

При великих відстанях необхідно зменшувати кутовий крок сканування φ , 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 φ 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 φ буде приблизно рівним $0,024^\circ$.

Слід мати на увазі, що лазерний промінь розходитьсся і потрапляє на об'єкт прямою 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]:

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

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

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

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

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 φ рівним 2.6" або 0,0072°. Порівняння результатів математичного обчислення з урахуванням кута нахилу і без наведені на рисунку 3.2.

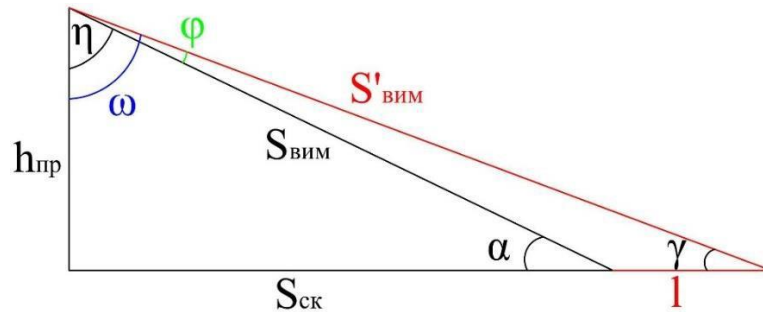


Рис. 3.3 Схема падіння променя на похилий об'єкт

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 тіньових 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).

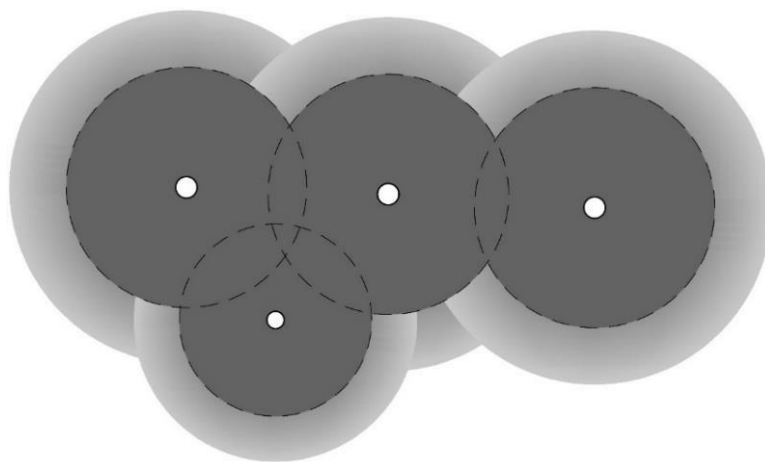


Рис 3.4 Перекриття точкових моделей, отриманих з різних сканерних станцій.

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.

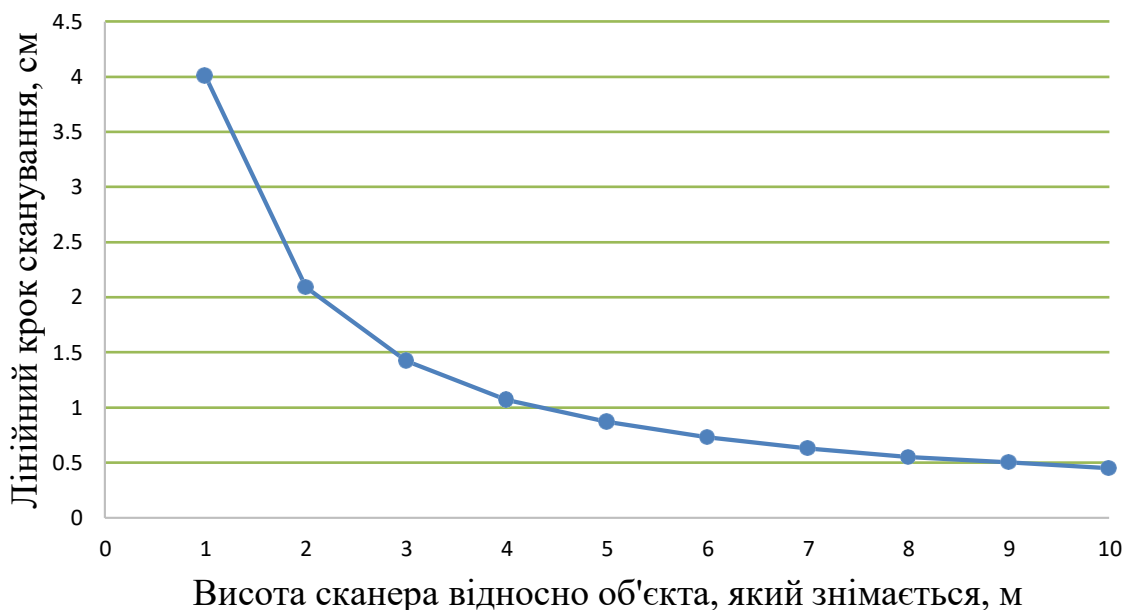


Рис. 3.5 Зміна кроку сканування в залежності від висоти сканера, відносно об'єкту

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.

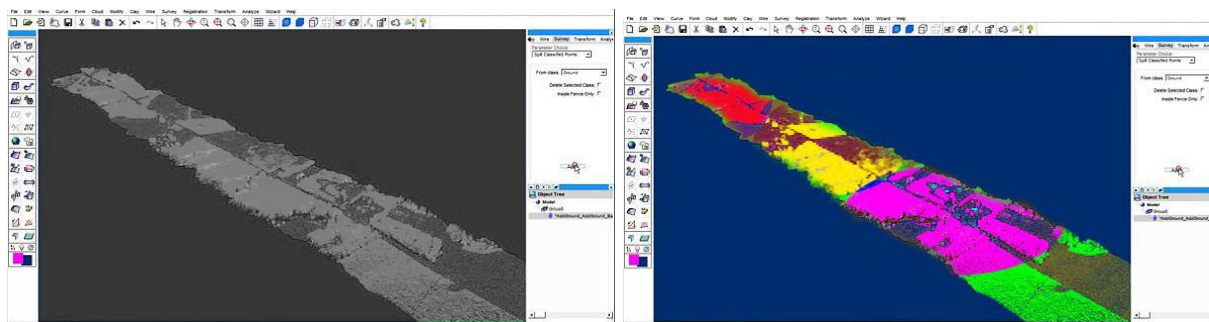
Основні етапи. Пропонована методика створення ЦП на основі даних наземного лазерного сканування включає наступні етапи:

- 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 ХУ системи координат, а побудова лінійних майданних 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 виміряних 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» (рисунк 3.6) [102].

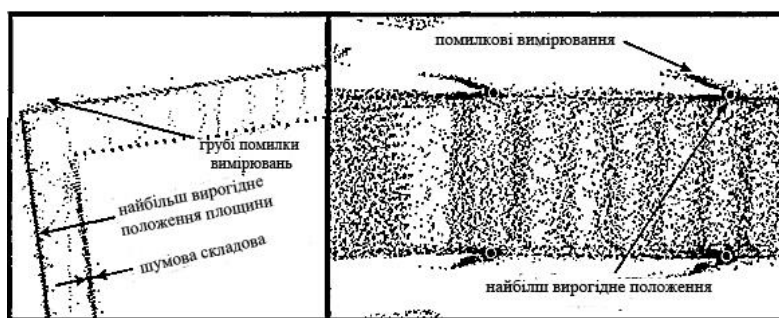


Рис 3.6 Шуми у вимірах, які викликані властивостями поверхонь

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.

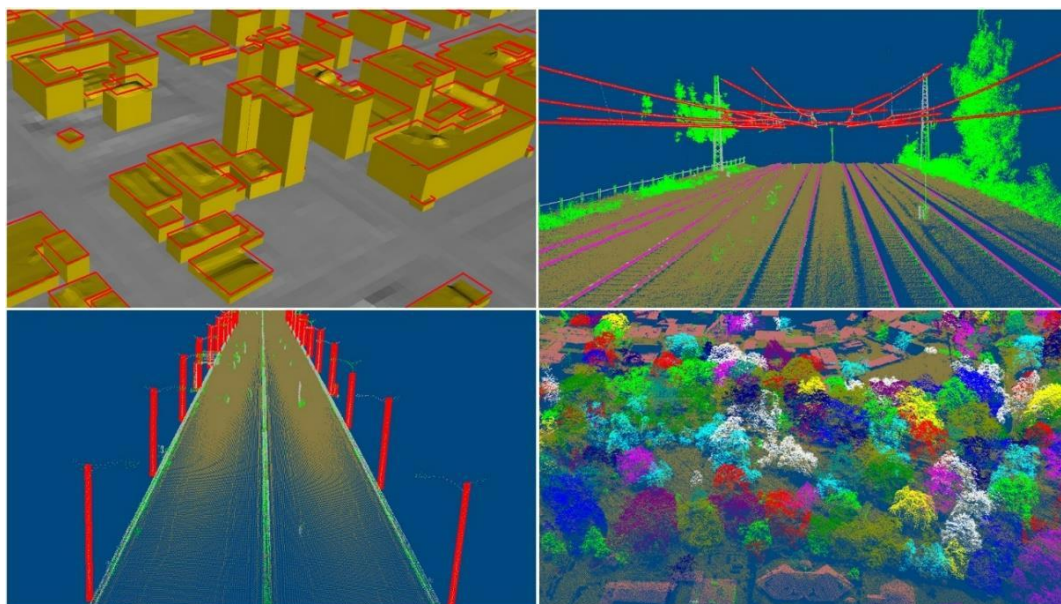


Рис. 3.7 Приклади складання різних об'єктів за даними лазерного сканування.

Висотні характеристики лінійного об'єкту з даних сканування. Висотна складова є невід'ємною частиною ЦП. Отримана в результаті векторизації пласка 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 роботі 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 вибіркового

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 тріангуляційних мереж для опису поверхонь складної форми.

ЦМР створюється у вигляді пласкої тріангуляційної 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 CAD, такі, наприклад, як dxf. ПО Leica Cyclone, наприклад, підтримує прямий експорт тривимірної моделі в формат таких поширених CAD, 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.

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 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° ; 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. 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.
6. ДСТУ Б В.2.1-30:2014. Ґрунти. Методи вимірювання деформацій основ будинків і споруд. –Мінрегіон України 2015, 33 с.
7. 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.
8. 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
9. 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).
10. 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.
11. 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.
12. 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

13. 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

14. 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

15. 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.

16. 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

17. Laser Safety Fact Sheet [Электронный ресурс]. – сайт University of Kentucky. - Режим доступа: http://ehs.uky.edu/radiation/laser_fs.html.

18. 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.

19. Laser safety [Электронный ресурс]. – сайт Encyclopedia of laser physic and technology. – Режим доступа: http://www.ф-photonics.com/laser_safety.html

20. An Overview of the LED and Laser Classification System in EN 0825-1and IEC 60825-1 [Электронный ресурс]. – сайт Lasernet ltd. – Режим доступа: http://www.lasennet.com/resources/classification_overview.htm.

21. Laser Classification [Электронный ресурс]. – сайт Physical & Theoretical Chemistry Laboratory. University of Oxford. – Режим доступа: http://ptcl.chem.ox.ac.uk/MSDS/laser_classification.html.

22. An Overview of the LED and Laser Classification System in EN 0825-1 and IEC 60825-1 [Электронный ресурс]. – сайт Lasetmet ltd. Режим доступа: <http://www.lasernet.com/laser-standards.php>

23. 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.

24. 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.

25. 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.

26. 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.ІІ. – С.71 –75

27. . Voebier, M. Bordas Vicent, A. Marbs Анализ точности лазерных сканирующих систем. Доклад на XIX симпозиуме СІРА, 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>

28. 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

29. 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.

30. 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

31. 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

32. Balzani, M. 3D laser scanner: Accuracy tests / M. Balzani, A. Pellegrinelli, N. Perfetti, F. Uccelli // – Proc. 18th Int. Symp. CIPA 2001, pp. 445-453

33. 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.

34. 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=2226>

35. MS-Z360 Laser mirror scanner. Technical documentation and users instructions. - Horn: Riegl Laser measurement systems, 2003. - 92 p.

36. Stahlberg C. / Eine vektorielle Darstellung des Einflusses von Zielund Kippachsenfehler auf die Winkelmessung / C. Stahlberg // Zeitschrift für Vermessungswesen 122 (5), pp. 225-235.

37. Deumlich F. / Instrumentenkunde der Vermessungstechnik / F. Deumlich, R. Staiger / 9 vullig neu bearbeitete und erweiterte auflage // Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg, 2002.

38. Neitzel F. / Investgation of axes errors of terrestrial laser scanners / F. Neitzel // Fifth International Symposium Turkish-German Joint Geodetic Days, Berlin, 2006.

39. 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.

40. Tsakiri M. Terrestrial laser scanning for deformation monitoring 3rd IAG / M. Tsakiri, D. Lichti, N. Pfeifer // – 12th FIG Symposium, Baden, May 22-24, 2006

41. Luhmann T. Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik / T. Luhmann // – Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2003. Wichmann Verlag, Heidelberg.

42. 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.

43. 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.
44. 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.
45. 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]
46. 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

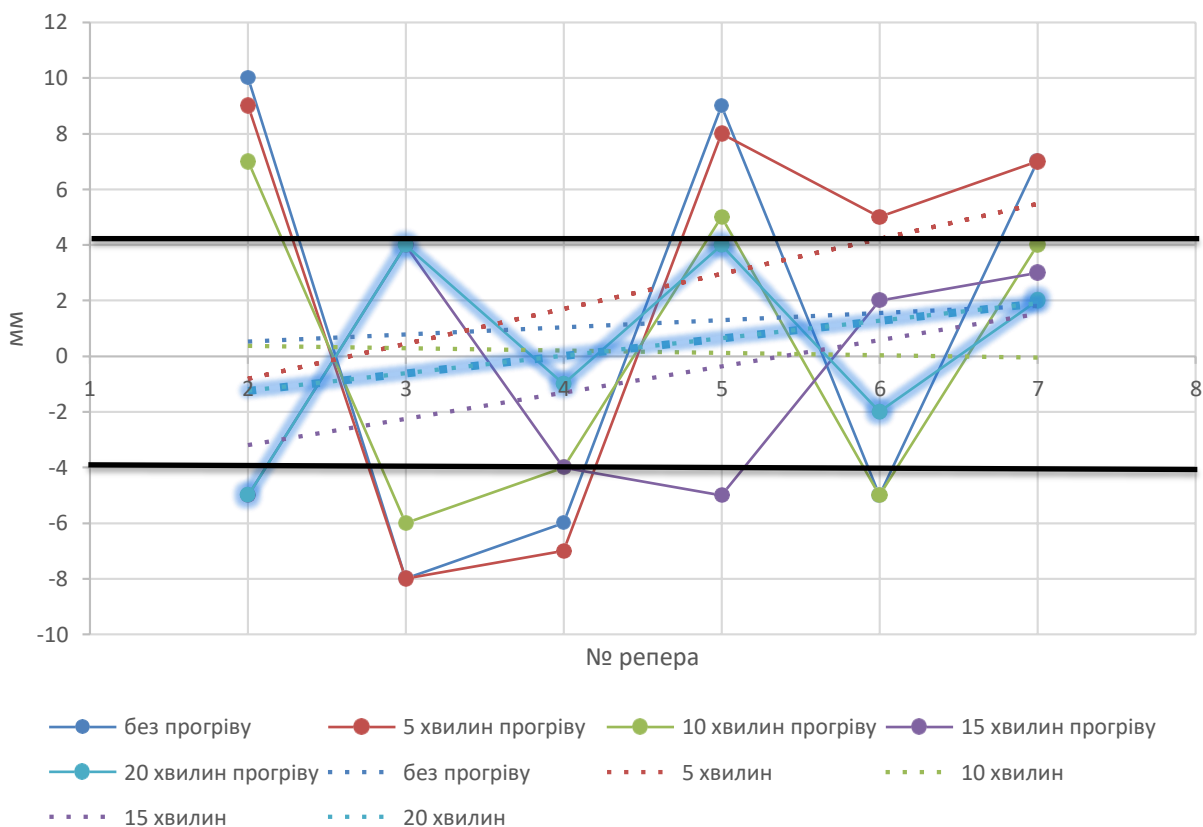


Рис. А.1 Відхилення реперів по профільній лінії «11 метрів» по осі Н

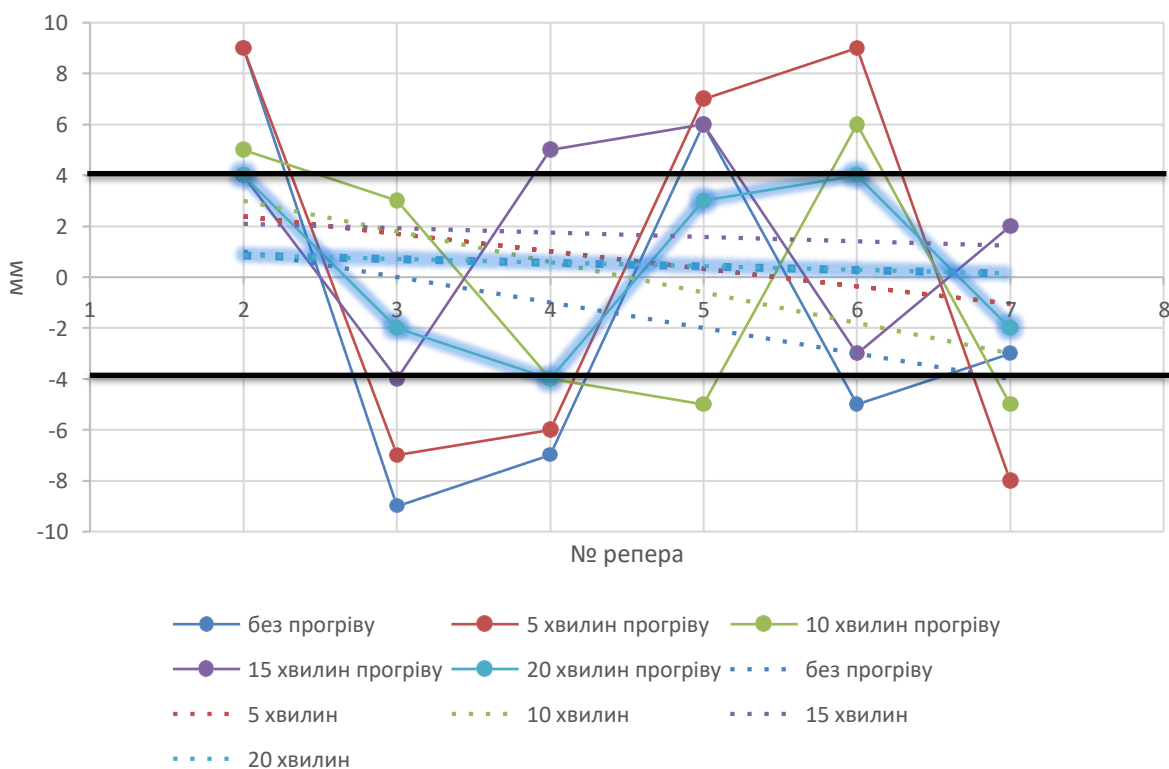


Рис. А.2 Відхилення реперів по профільній лінії «11 метрів» по осі Х

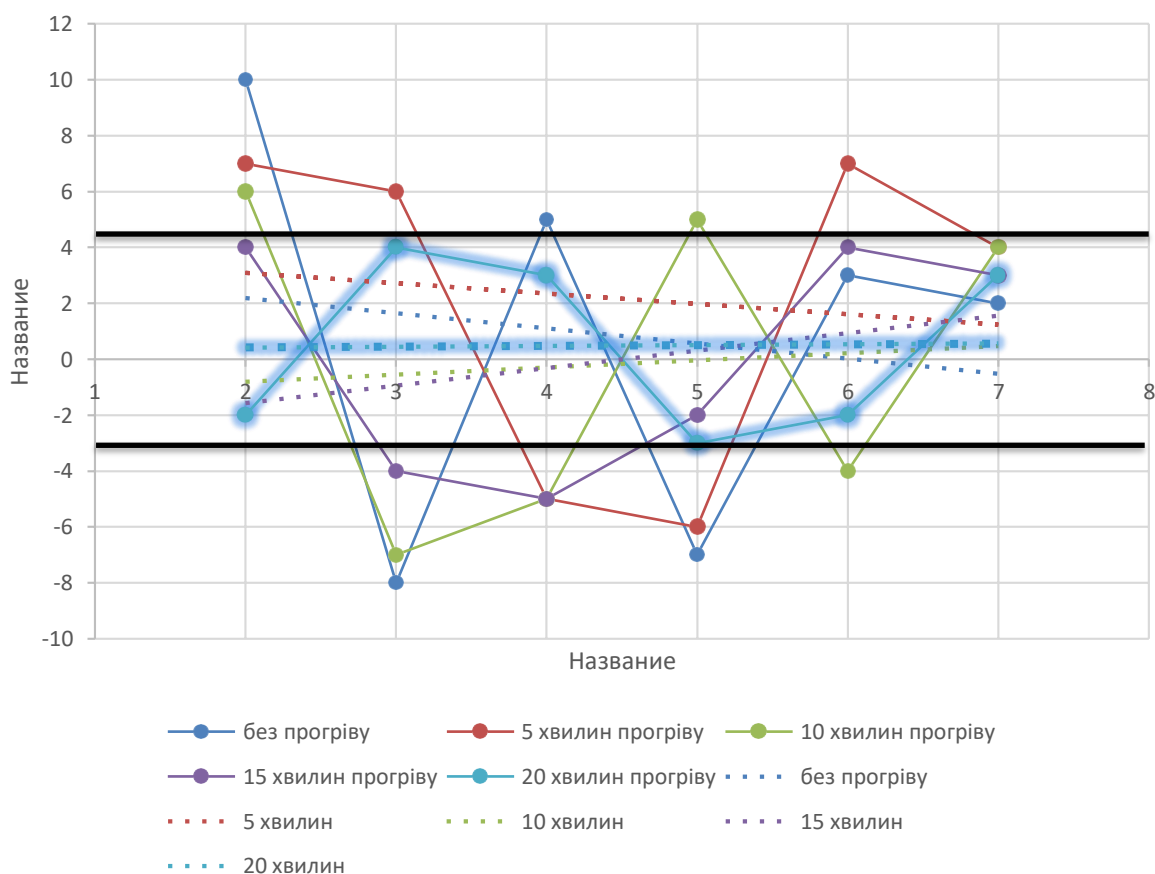


Рис. А.3 Відхилення реперів по профільній лінії «11 метрів» по осі У

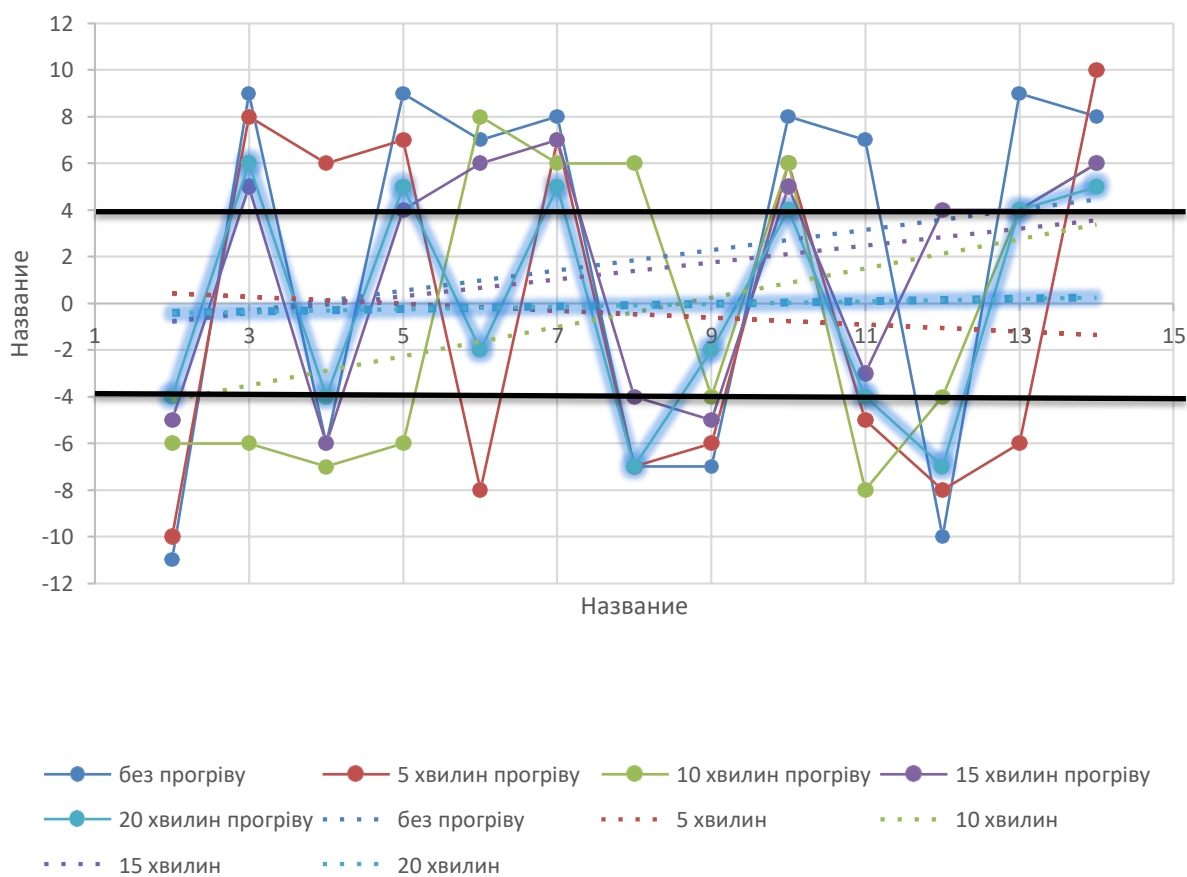


Рис. А.4 Відхилення реперів по профільній лінії «5 метрів» по осі Н

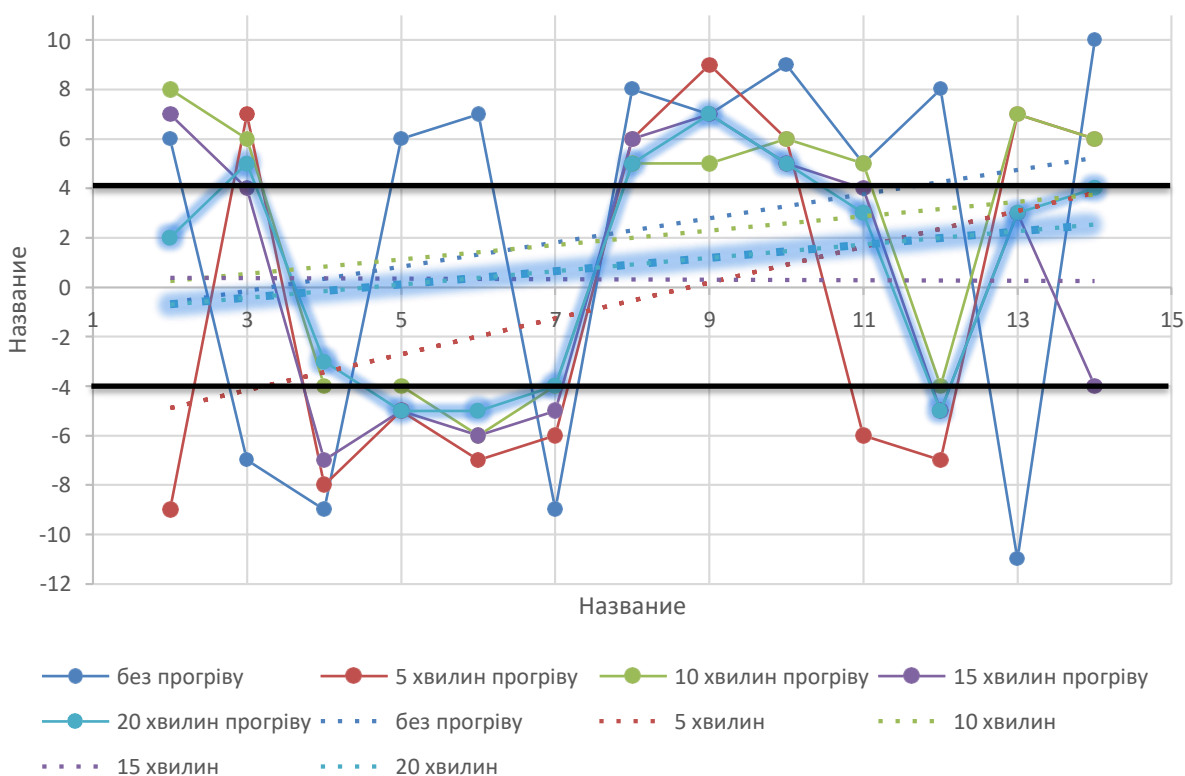


Рис. А.5 Відхилення реперів по профільній лінії «5 метрів» по осі X

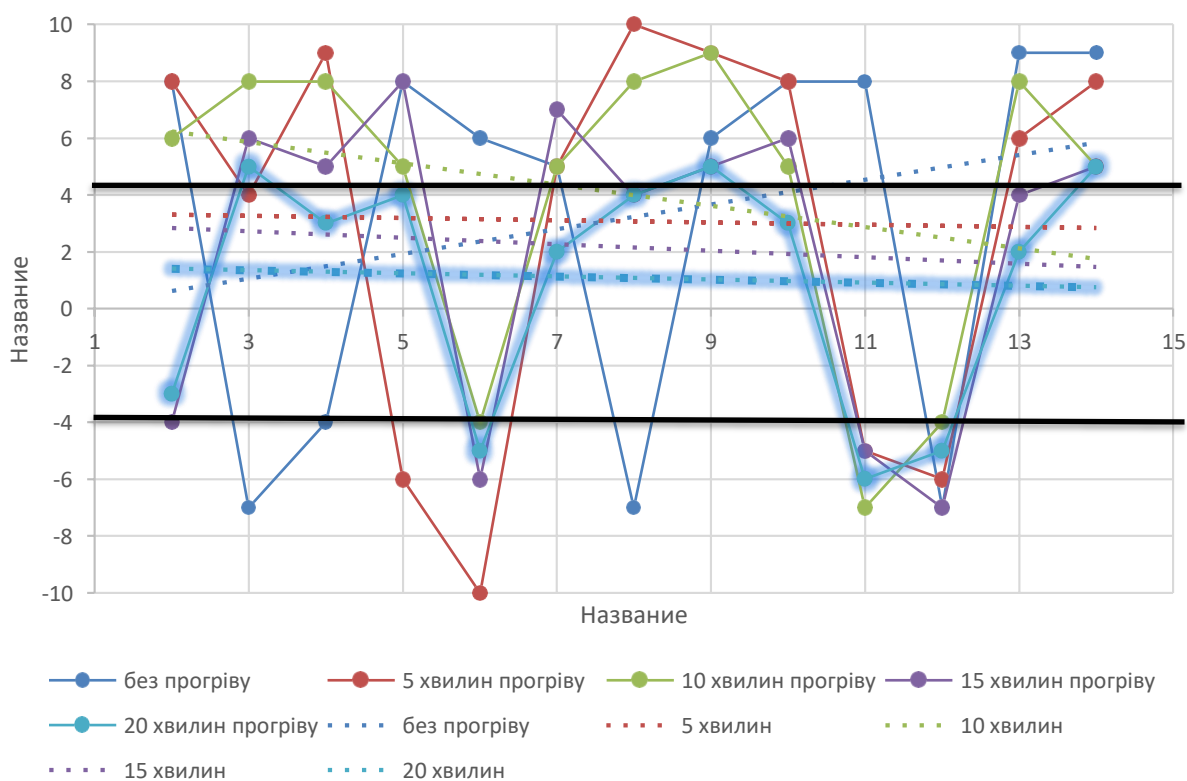


Рис. А.6 Відхилення реперів по профільній лінії «5 метрів» по осі У

ДОДАТОК Б

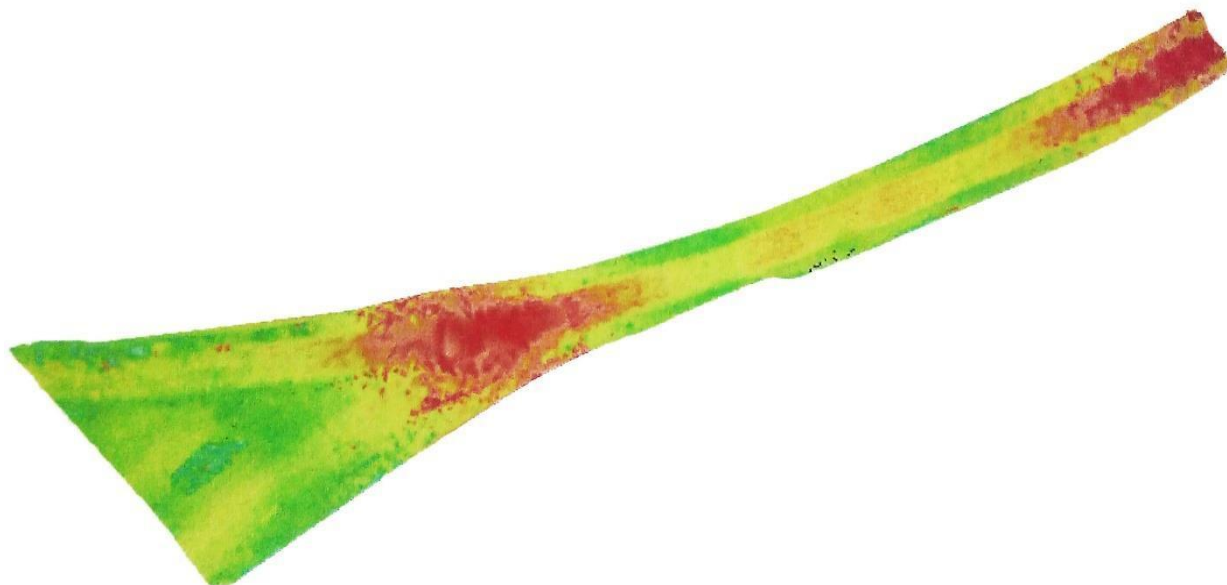
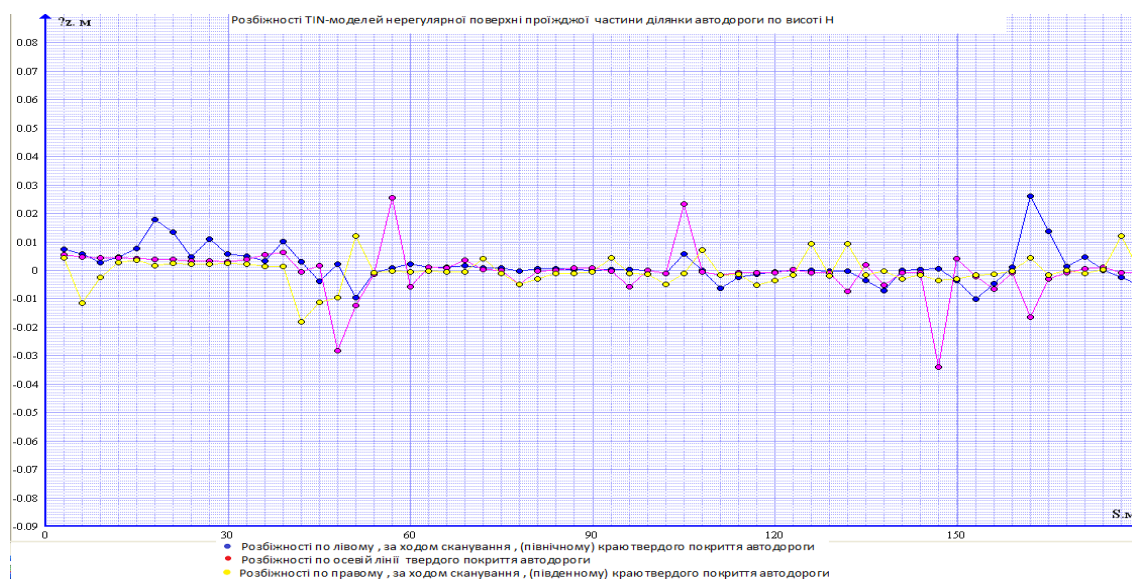
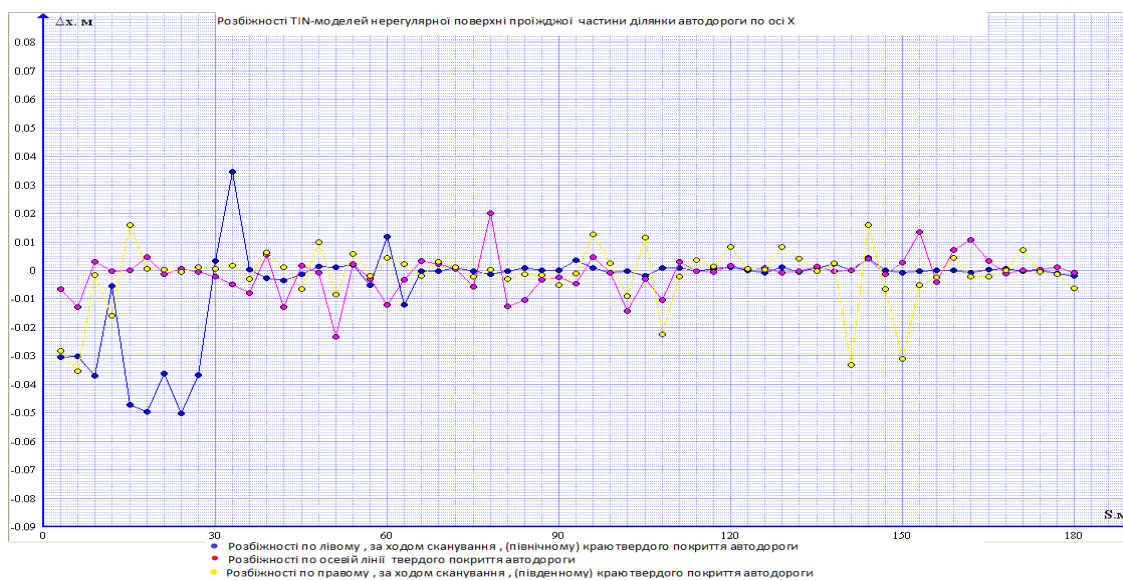


Рис. Б.1 Абрис накладених TIN-моделей нерегулярної поверхні проїжджої частини з двох останніх сканувань на першому відрізку

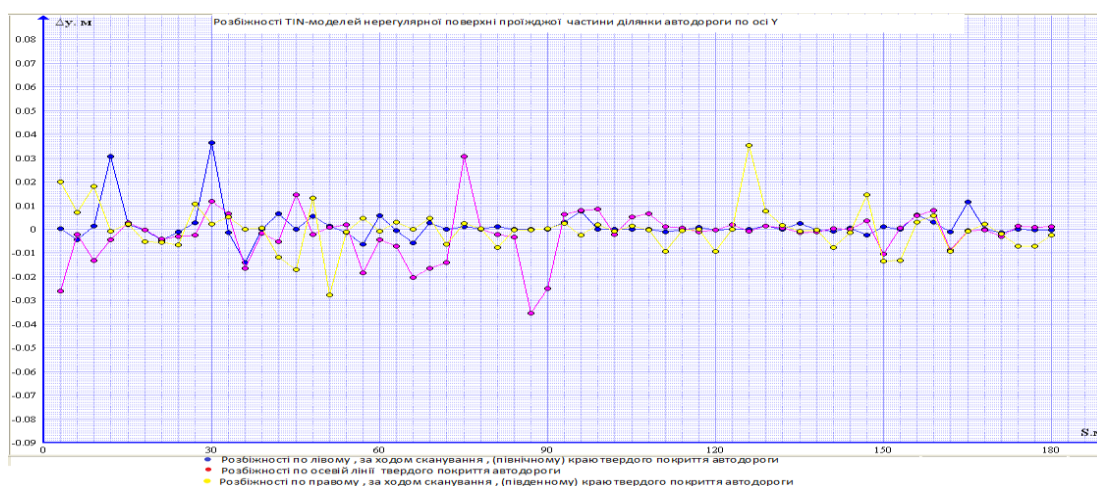
Графік розбіжностей TIN-моделей нерегулярної поверхні ділянки автодороги по осях координат X, Y і по висоті H на першому відрізку наведені на рисунку Б.2.



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 відрізка наведений на рисунку Б.3.

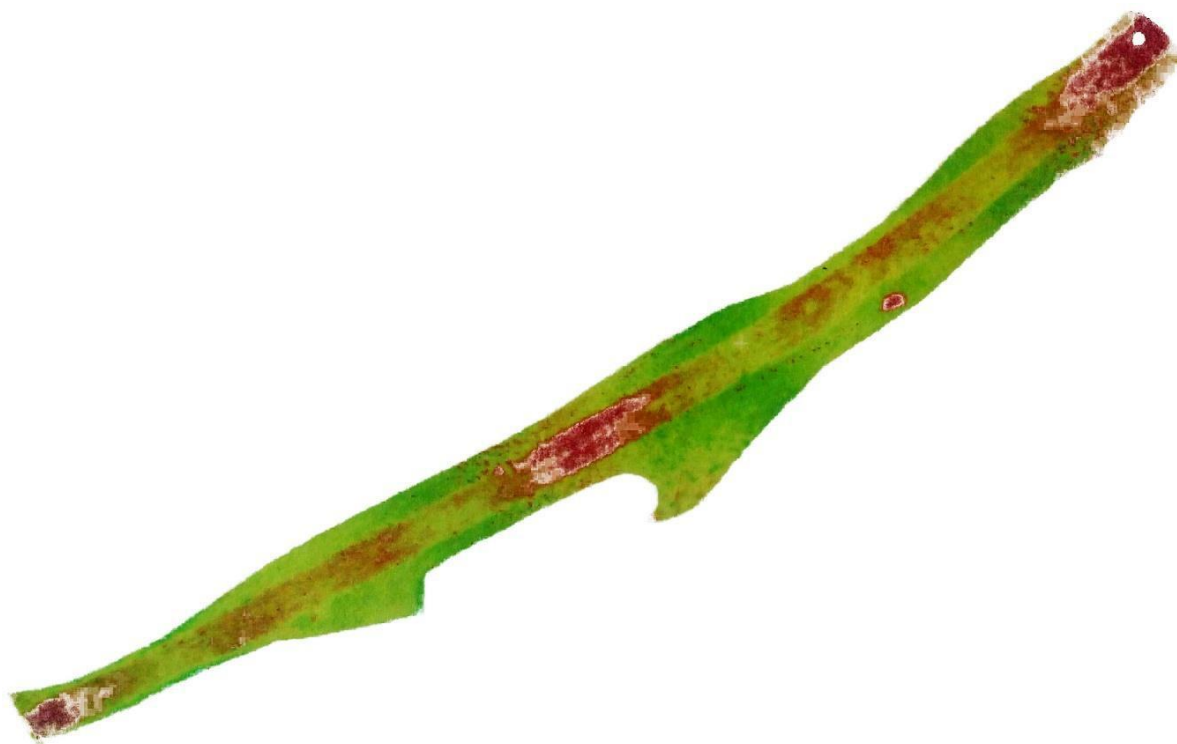
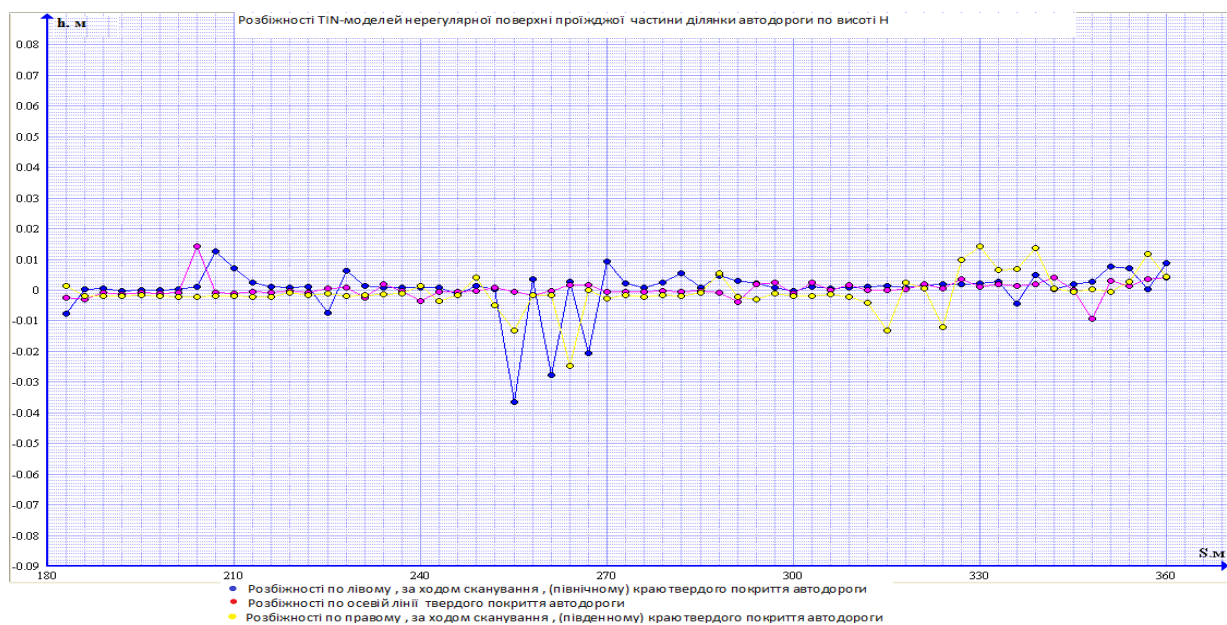
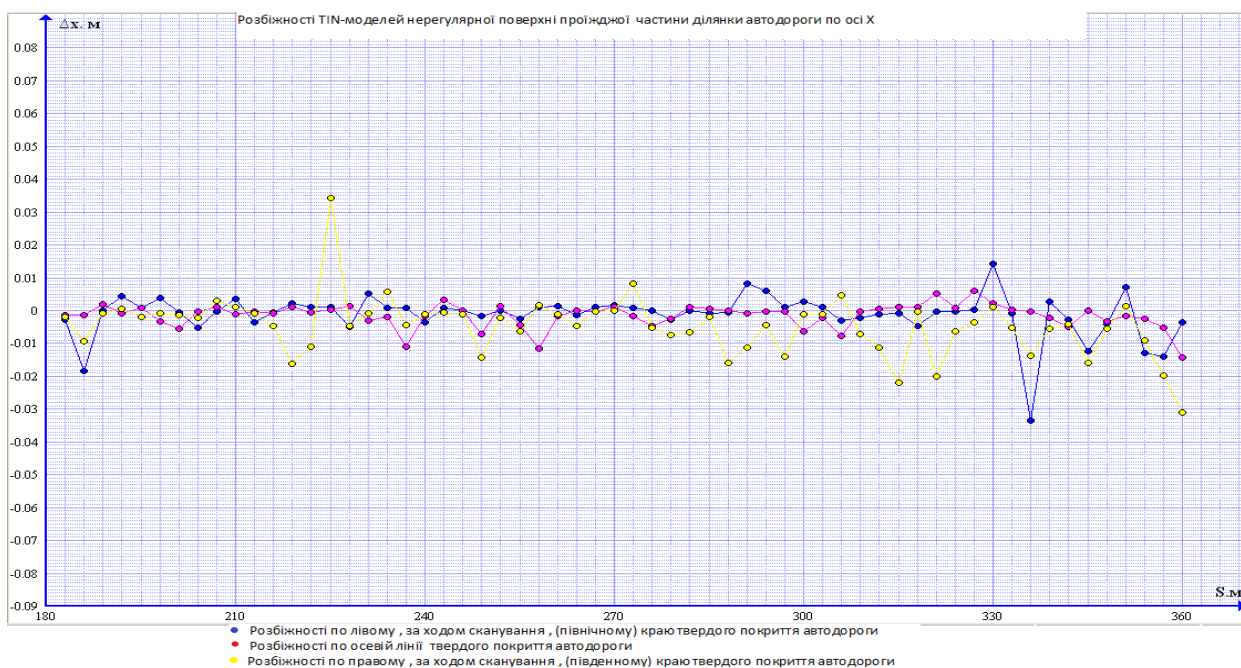


Рис. Б.3 Абрис накладених TIN-моделей нерегулярної поверхні проїжджої частини з двох останніх сканувань на другому відрізку

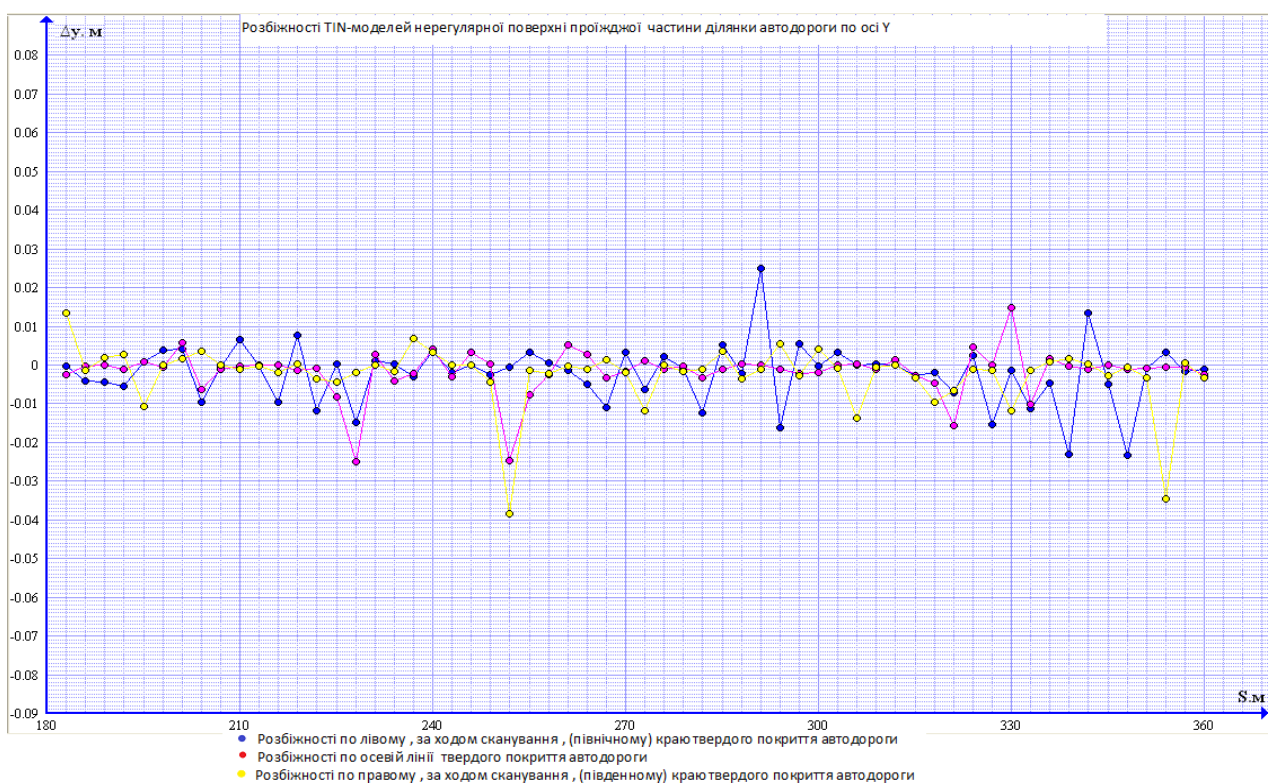
Графік розбіжностей TIN-моделей нерегулярної поверхні ділянки автодороги по осях координат X, Y і по висоті H на другому відрізку наведені на рисунку Б.4.



ПО ВИСОТІ



по осі X



по осі Y

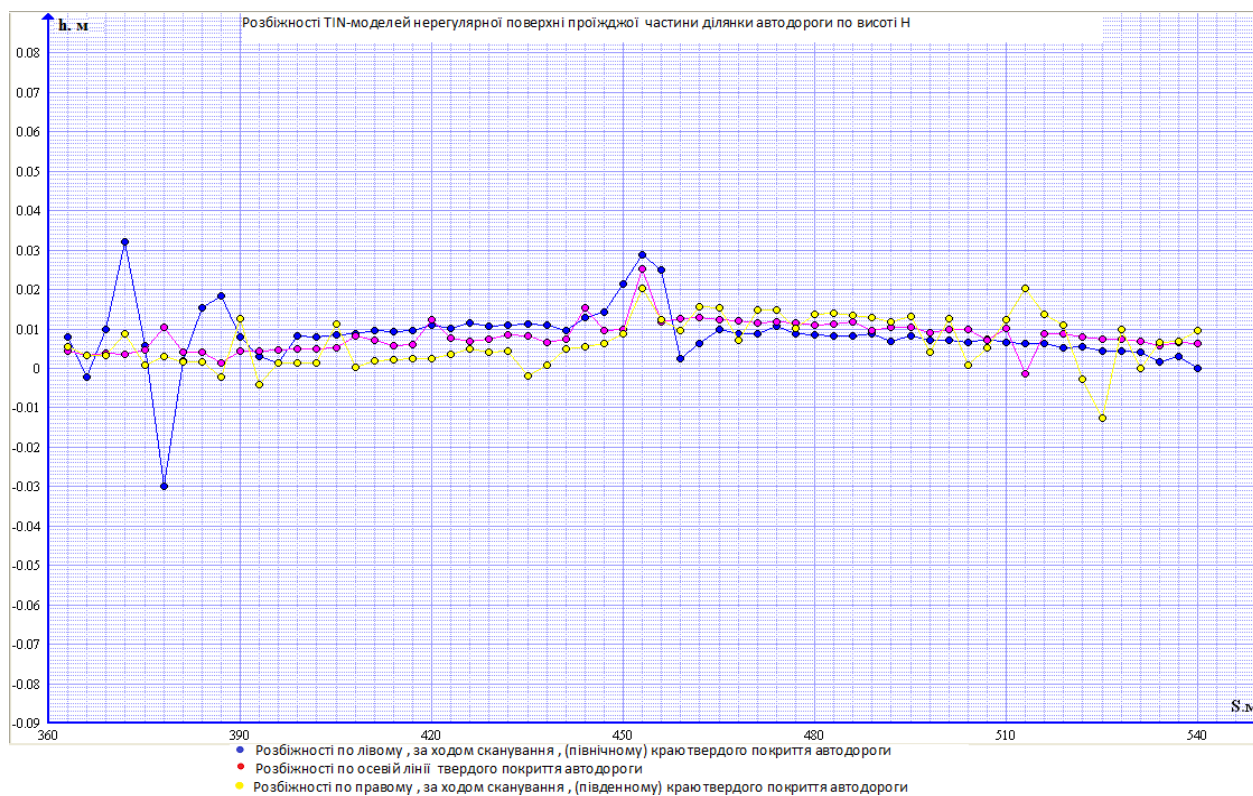
Рис. Б.4 Графік розбіжностей TIN-моделей на другому відрізку

Абрис накладених одна на одну TIN-моделей нерегулярної поверхні проїжджої частини 3-го відрізка наведений на рисунку Б.5.

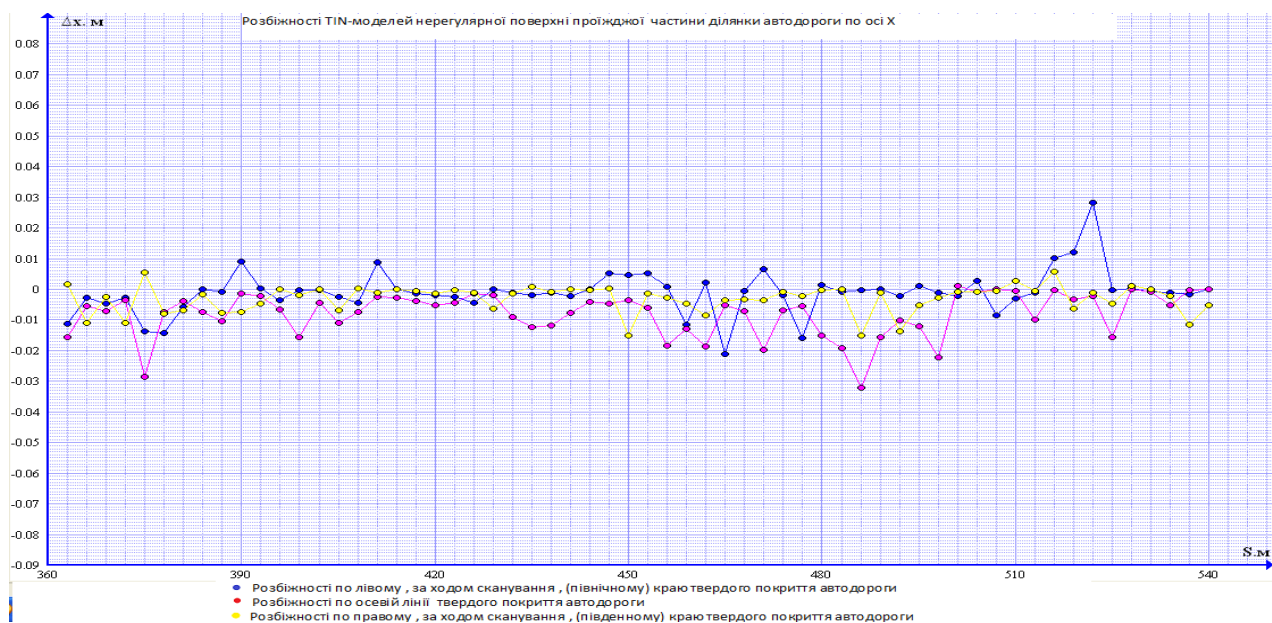


Рис. Б.5 Абрис накладених TIN-моделей нерегулярної поверхні проїжджої частини з двох останніх сканувань на третьому відрізку

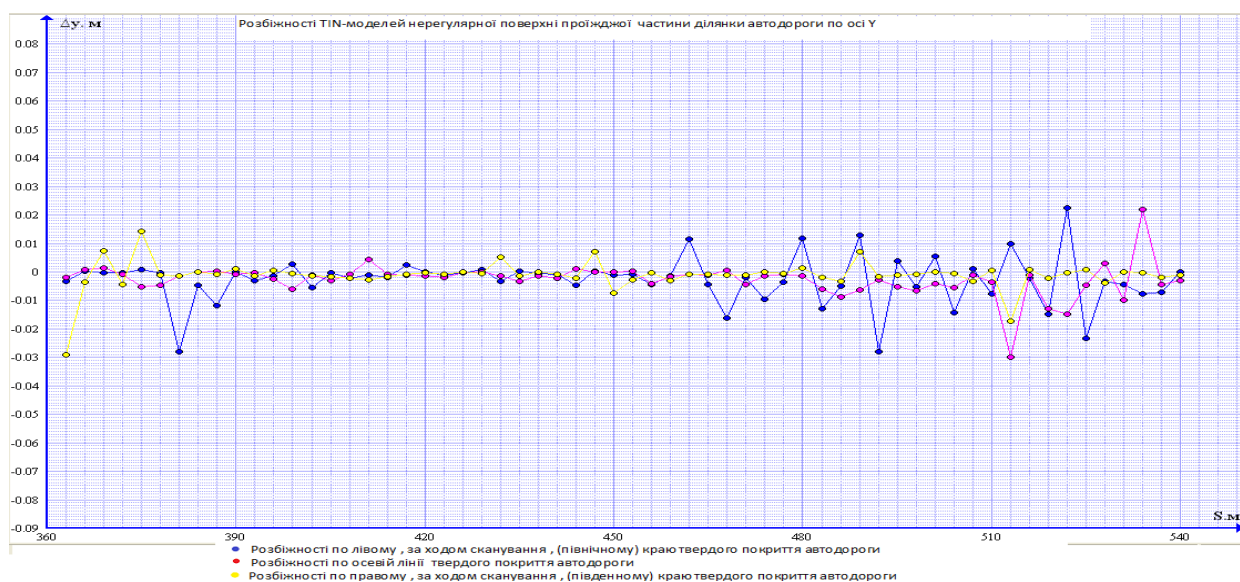
Графік розбіжностей TIN-моделей нерегулярної поверхні ділянки автодороги по осях координат X, Y і по висоті H на третьому відрізку наведені на рисунку Б.6.



по висоті



по осі X



по осі Y

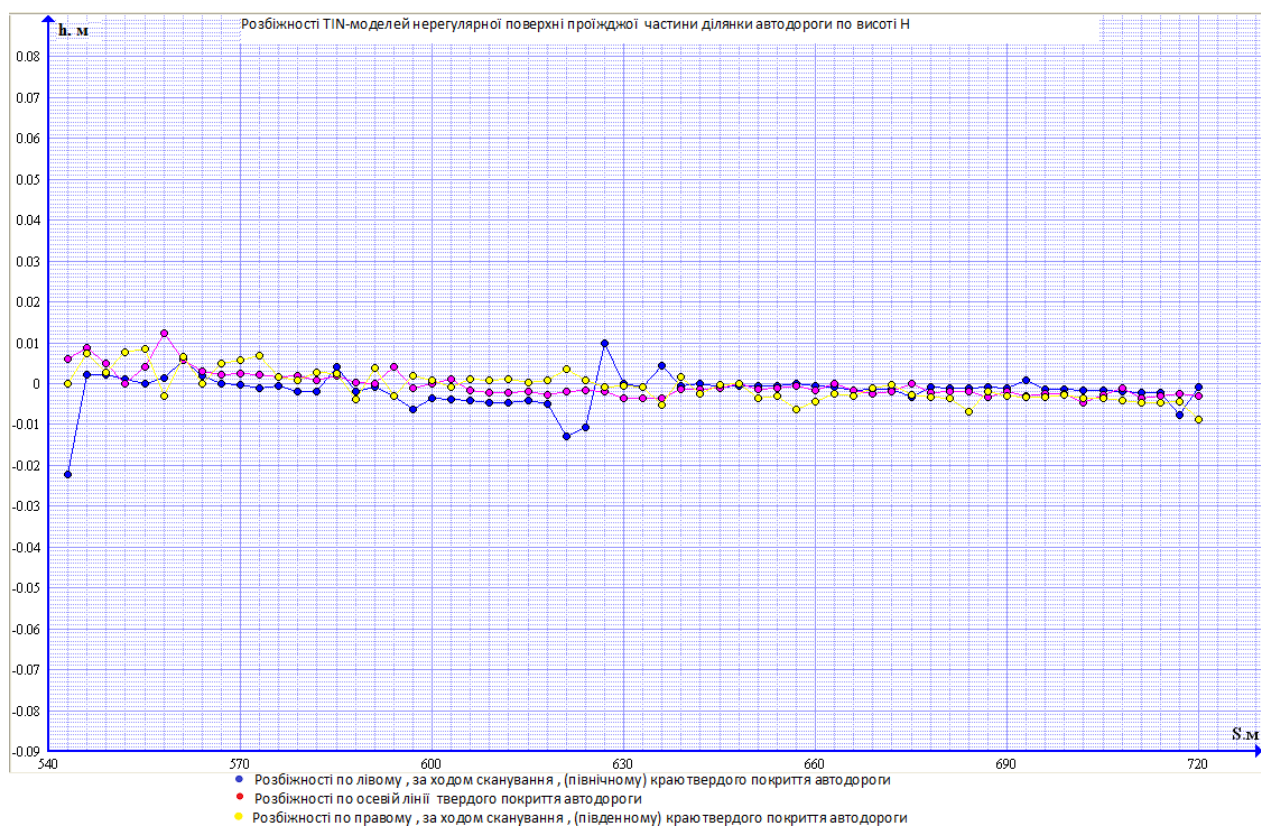
Рис. Б.6 Графік розбіжностей TIN-моделей на третьому відрізку

Абрис накладених одна на одну TIN-моделей нерегулярної поверхні проїжджої частини 4-го відрізка наведений на рисунку 4.37.

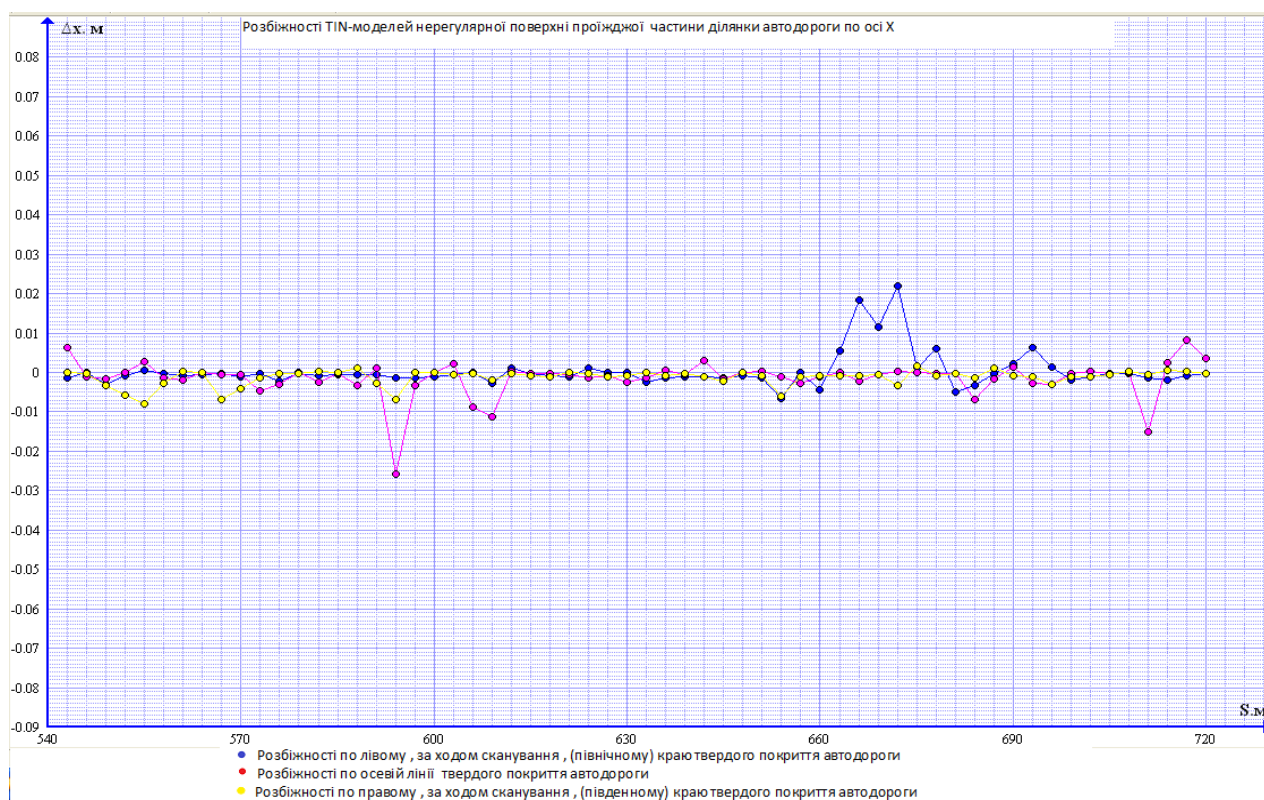


Рис. Б.7 Абрис накладених TIN-моделей нерегулярної поверхні проїжджої частини з двох останніх сканувань на четвертому відрізку

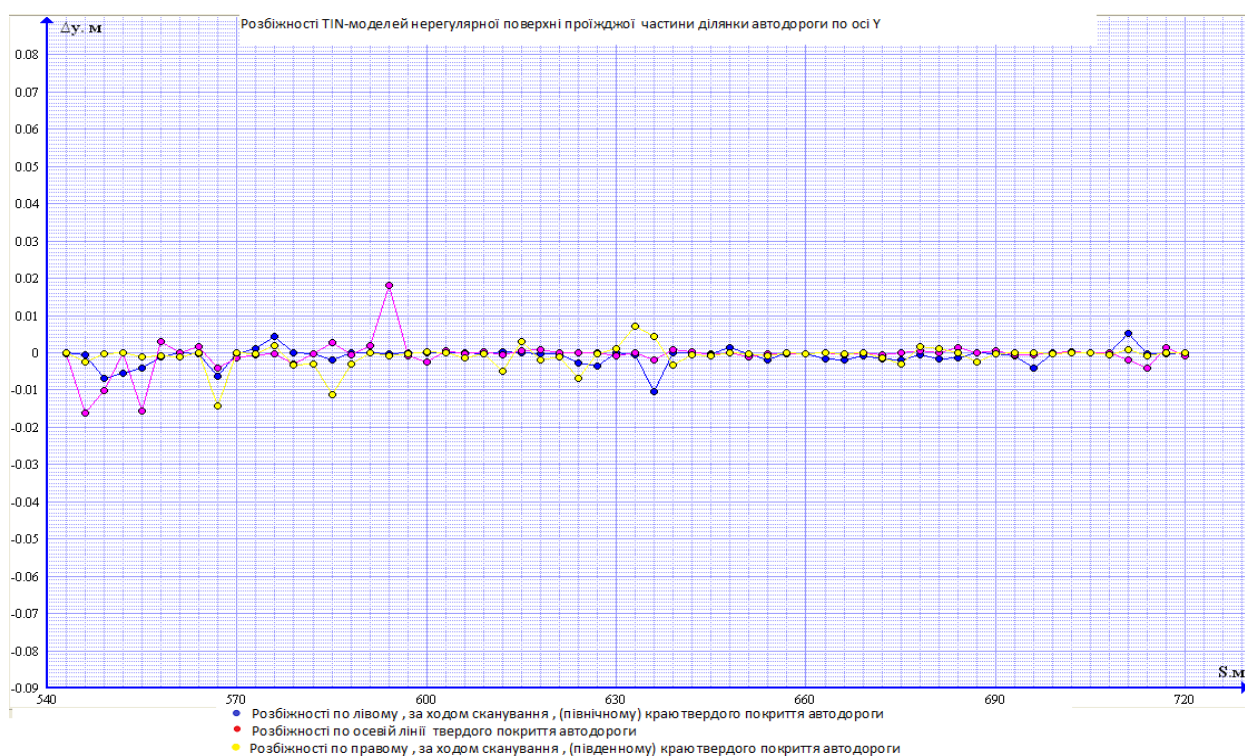
Графік розбіжностей TIN-моделей нерегулярної поверхні ділянки автодороги по осях координат X , Y і по висоті H на четвертому відрізку наведені на рисунку 4.38.



ПО ВИСОТІ



по осі X



по осі Y

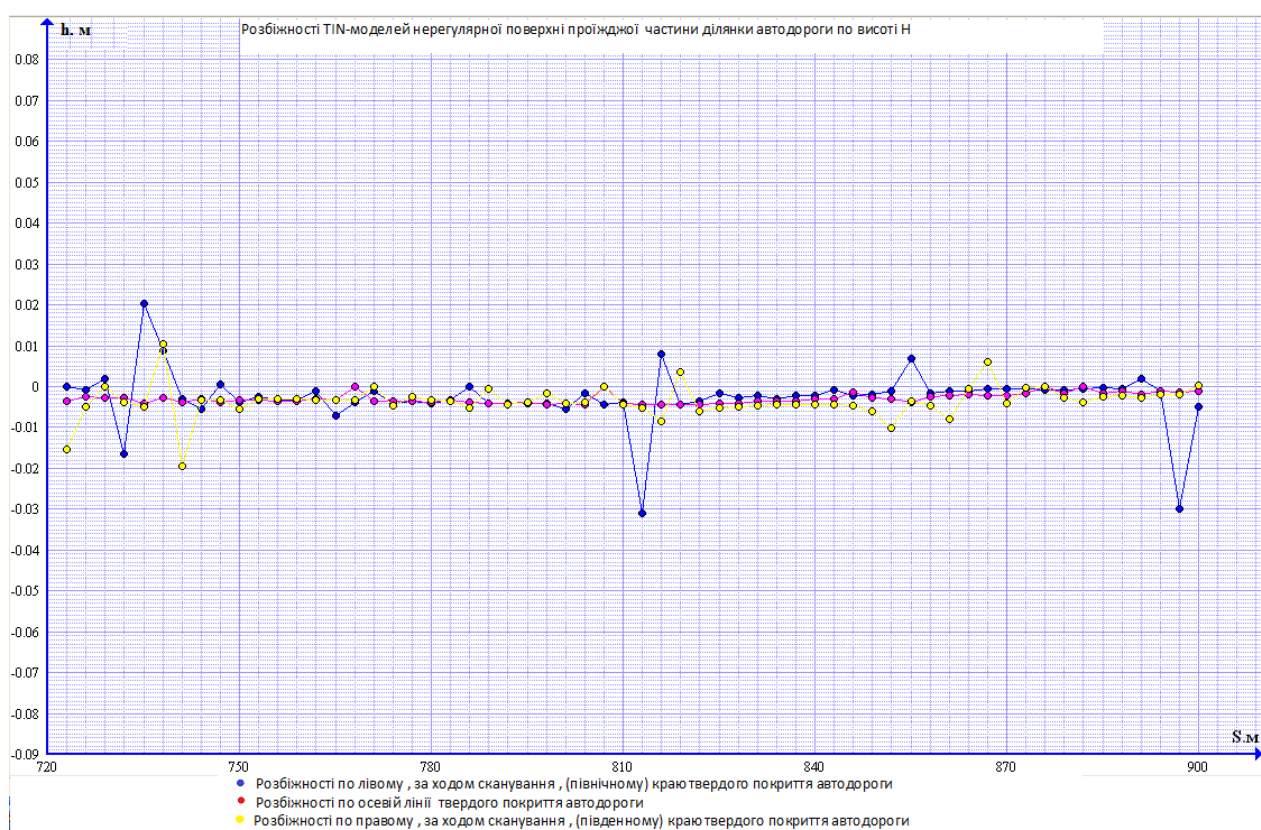
Рис. Б.8 Графік розбіжностей TIN-моделей на четвертому відрізку

Абрис накладених одна на одну TIN-моделей нерегулярної поверхні проїжджої частини 5-го відрізка наведений на рисунку Б.9.

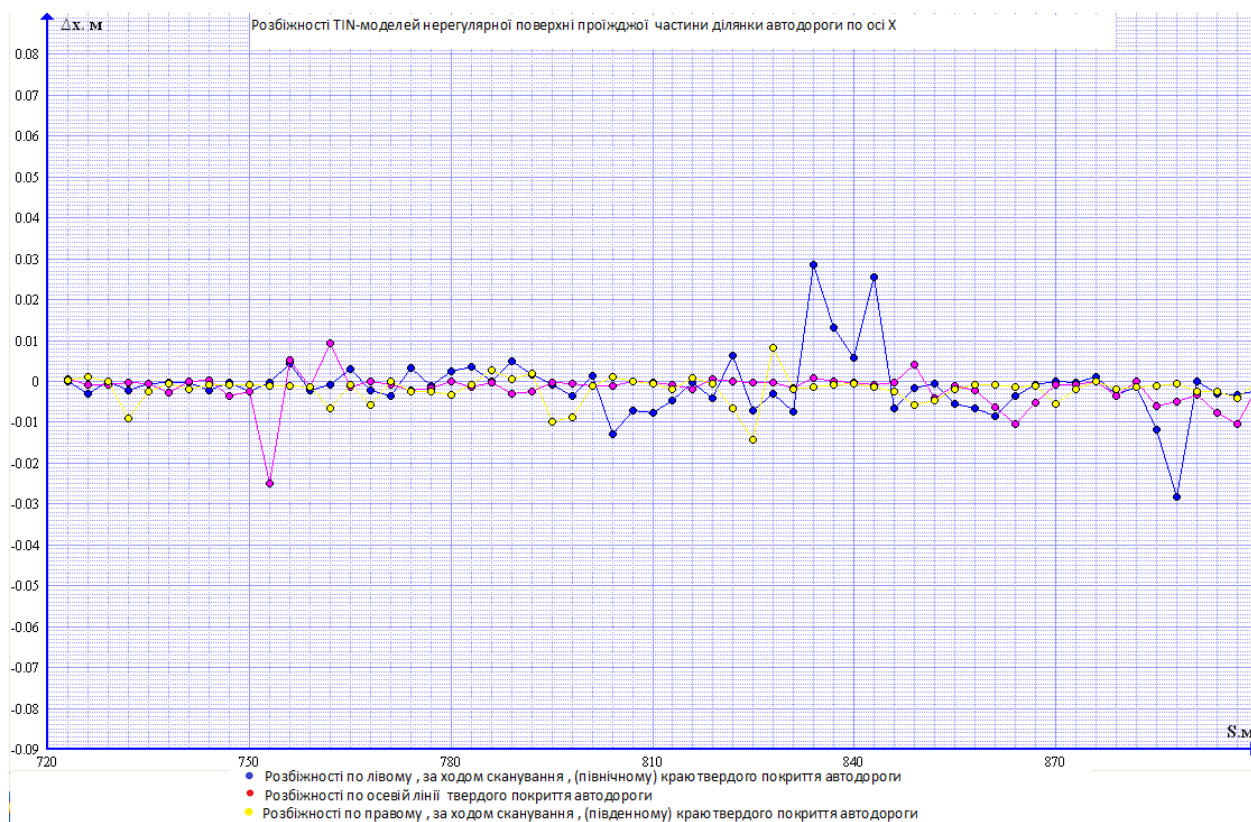


Рис. Б.9 Абрис накладених TIN-моделей нерегулярної поверхні проїжджої частини з двох останніх сканувань на п'ятому відрізку

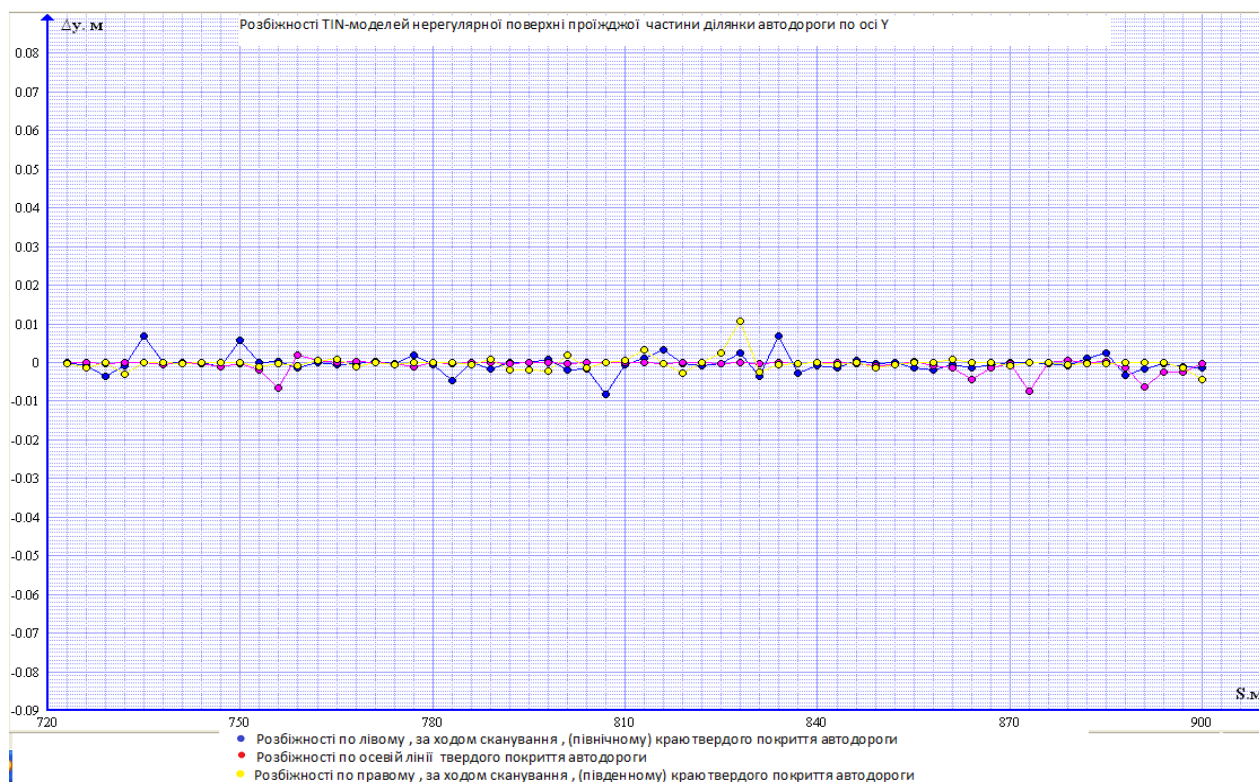
Графік розбіжностей TIN-моделей нерегулярної поверхні ділянки автодороги по осях координат X, Y і по висоті H на п'ятому відрізку наведені на рисунку Б.10.



по висоті



по осі X



по осі Y

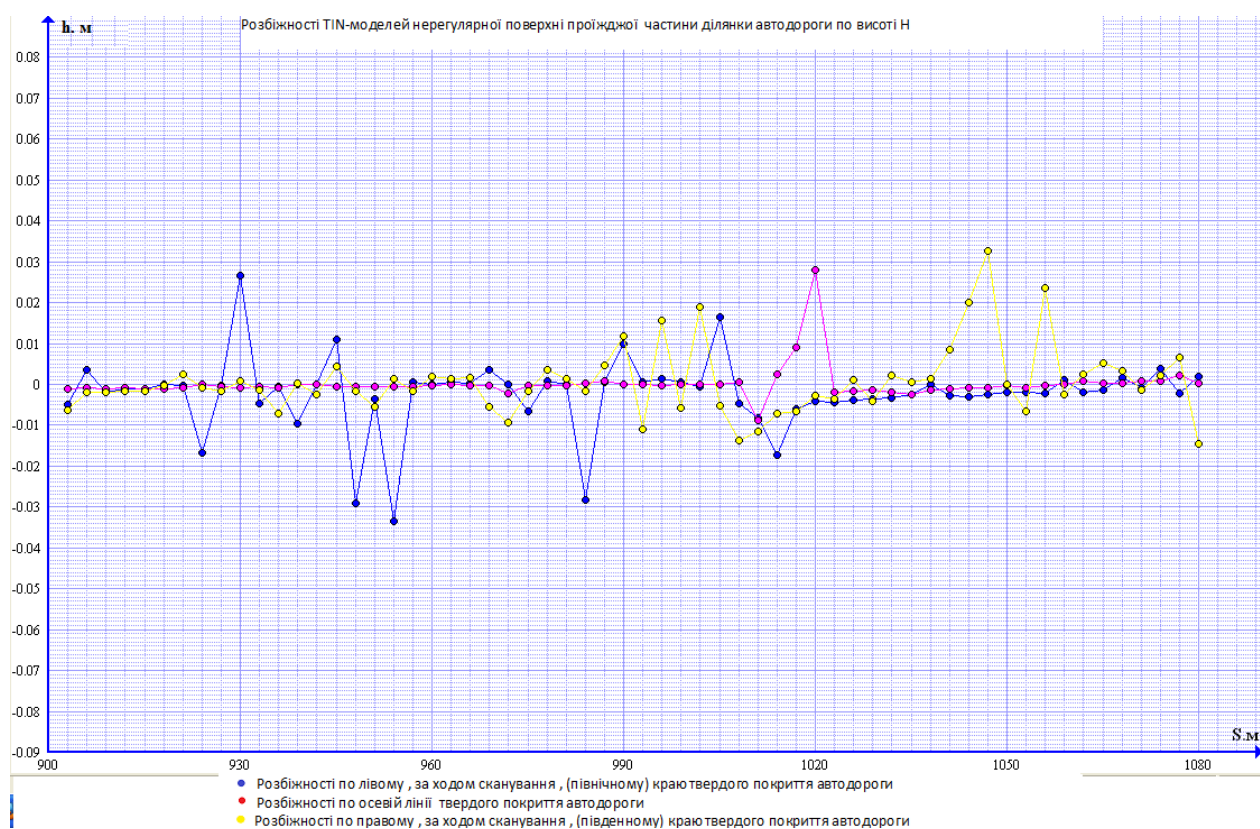
Рис. Б.10 Графік розбіжностей TIN-моделей на п'ятому відрізку

Абрис накладених одна на одну TIN-моделей нерегулярної поверхні проїжджої частини 6-го відрізка наведений на рисунку Б.11.

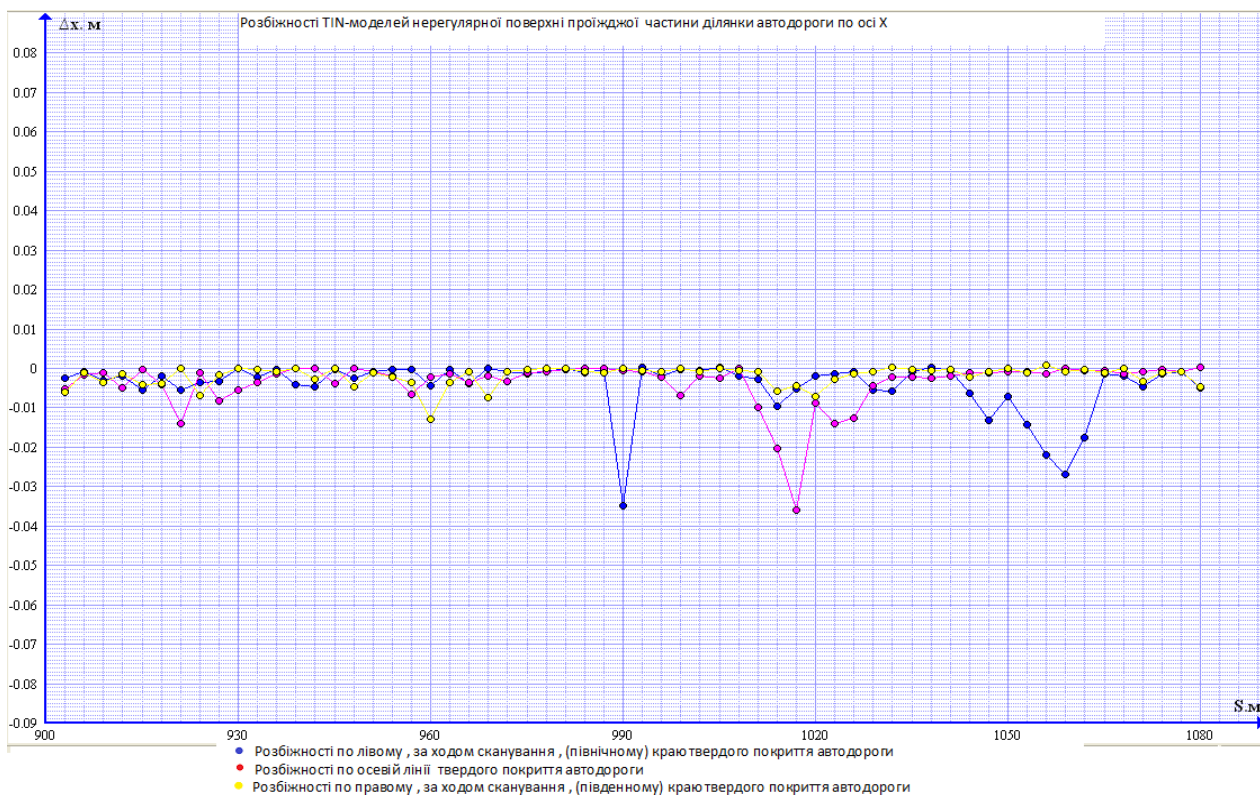


Рис. Б.11 Абрис накладених TIN-моделей нерегулярної поверхні
проїжджої частини з двох останніх сканувань на шостому відрізку

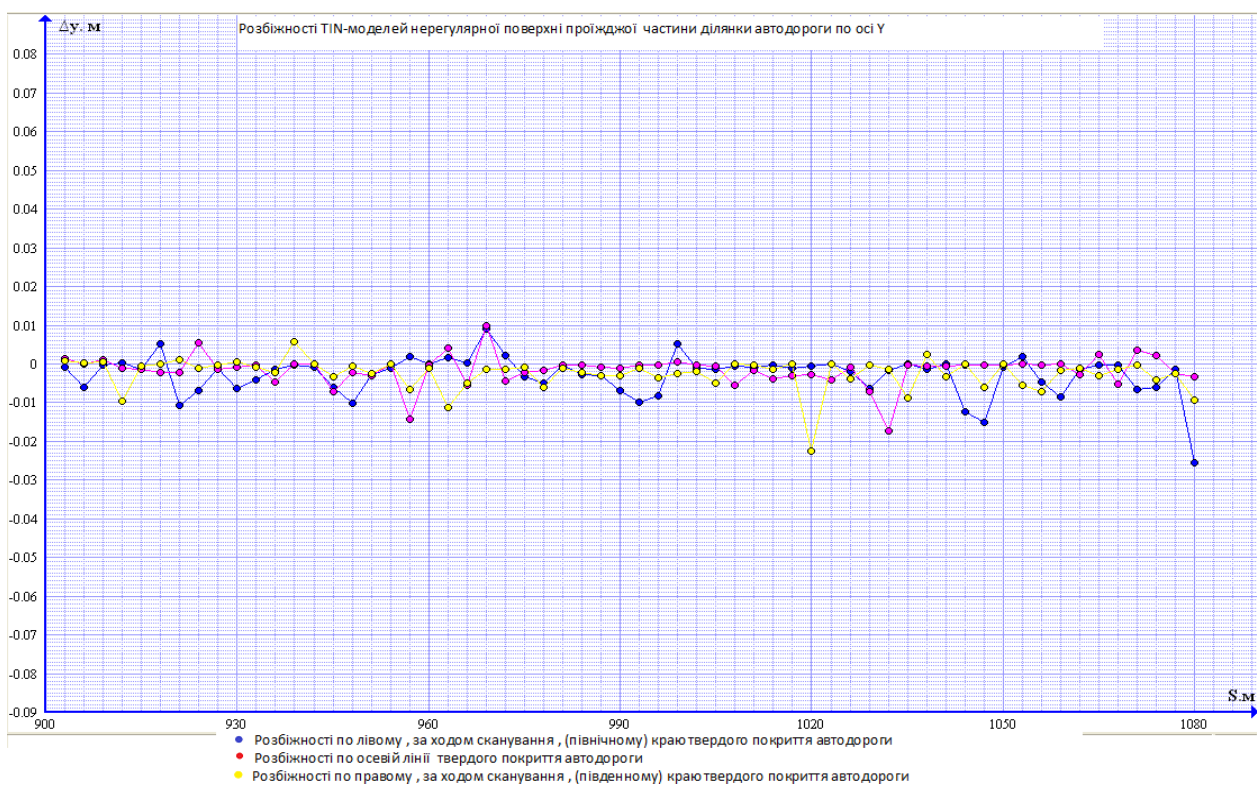
Графік розбіжностей TIN-моделей нерегулярної поверхні ділянки автодороги
по осях координат X, Y і по висоті H на шостому відрізку наведені на рисунку Б.12.



по висоті



по осі X



по осі Y

Рис. Б.12 Графік розбіжностей TIN-моделей на шостому відрізку