

**МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

13.05 – КМР. 2109 “С” 2023.11.13. 036 ПЗ

**ІЛЛЯШОВ ІЛЛЯ АНАТОЛІЙОВИЧ**

**2024р.**

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ  
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ  
Факультет землевпорядкування**

УДК 528.8.042:711.168

**ПОГОДЖЕНО**  
Декан факультету  
землевпорядкування

\_\_\_\_\_ д.е.н. ЄВСЮКОВ Т.О.  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2024 р.

**ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ**  
В. о. завідувача кафедри  
геоінформатики і аерокосмічних  
досліджень Землі

\_\_\_\_\_ к.т.н. МОСКАЛЕНКО А.А. .  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2024 р.

**МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА  
на тему:  
«Використання даних лазерного сканування для фіксації  
зруйнованої інфраструктури»**

Спеціальність - 193 «Геодезія та землеустрій»  
Освітня програма – Геодезія та землеустрій  
Орієнтація освітньої програми – освітньо-професійна

**Гарант освітньої програми**

доктор економічних наук, професор \_\_\_\_\_ **МАРТИН А.Г.**  
(підпис)

**Керівник магістерської  
кваліфікаційної роботи**

старший викладач \_\_\_\_\_ **ДЕНИСЮК Б. І.**  
(підпис)

**Консультант магістерської  
кваліфікаційної роботи**

доктор економічних наук, доцент \_\_\_\_\_ **КОШЕЛЬ А. О.**  
(підпис)

**Виконав**

\_\_\_\_\_ **ІЛЛЯШОВ І. А.**  
(підпис)

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ  
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**  
**Факультет землевпорядкування**

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. завідувача кафедри  
геоінформатики і аерокосмічних  
досліджень Землі

\_\_\_\_\_ к.т.н. Москаленко А.А.  
«\_» \_2023 р.

**ЗАВДАННЯ**

до виконання магістерської кваліфікаційної роботи студенту  
Ілляшову Іллі Анатолійовичу

Спеціальність 193. Геодезія та землеустрій

Тема випускної магістерської роботи: «Використання даних лазерного сканування для фіксації зруйнованої інфраструктури» затверджена наказом ректора НУБіП України від «13» листопада 2023р. № 2109 «С»

Термін подання слухачем завершеної роботи на кафедру 20.11.2024 р.

Вихідні дані до виконання роботи: дані наземного лазерного сканування електропідстанції.

Перелік питань, що підлягають дослідженню:

1. Аналіз теоретичних та методологічних засад наземного лазерного сканування.
2. Описати практику використання даних лазерного сканування для фіксації зруйнованої інфраструктури.
3. Обґрунтувати ефективність лазерного сканування та його даних для аналізу зруйнованої інфраструктури.

Перелік графічного матеріалу (за потреби) \_\_\_\_\_

---

Дата видачі завдання “ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2023 р.

**Керівник магістерської  
кваліфікаційної роботи**

( підпис ) ( прізвище та ініціали )

\_\_\_\_\_ Богдан ДЕНИСЮК

**Завдання прийняв  
до виконання**

( підпис ) ( прізвище та ініціали )

\_\_\_\_\_ Ілля ІЛЛЯШОВ

## РЕФЕРАТ МАГІСТЕРСЬКОЇ РОБОТИ

Магістерська кваліфікаційна робота має наступну структуру: вступ, три розділи, висновки та список використаних джерел. Магістерська кваліфікаційна робота складається з 66 сторінок і вміщує у собі: 24 рисунків, 5 таблиць та 14 використаних джерел.

В першому розділі розглянуто теоретичні засади наземного лазерного сканування. Проаналізовано сутність лазерного сканування. Описано класифікацію, сфери застосування лазерних 3D сканерів. Досліджено переваги лазерного сканування над традиційними методами та використання наземного лазерного 3D сканування в умовах війни.

В другому розділі дана характеристика процесу наземного лазерного сканування. Наведено аналіз прикладів проектів сканування інфраструктури за допомогою наземних лазерних сканерів.

В третьому розділі проаналізовано процес виконання наземного лазерного 3D сканування. Наведено опис наземного лазерного 3D сканера Leica ScanStation C10. Проведено аналіз двних отриманих після лазерного сканування, які можна використати для фіксації зруйнованої інфраструктури.

Ключові слова: геодезія, лазерне сканування, хмара точок, інфраструктура, дані наземного лазерного 3D сканування.

## Зміст

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	6
ВСТУП .....	7
Розділ 1. Теоретичні засади наземного лазерного сканування. ....	9
1. Теорія 3D моделювання. ....	9
2. Сутність наземного лазерного сканування. ....	10
3. Класифікація наземних лазерних сканерів. ....	13
4. Сфери застосування лазерного сканування .....	21
5. Переваги наземного лазерного 3D-сканування над традиційними методами топографо-геодезичних робіт та інженерно-геодезичних вишукувань .....	26
6. Використання наземного лазерного 3D сканування в умовах війни. ....	29
Розділ 2. Практика використання даних наземного лазерного 3D сканування для фіксації руйнувань інфраструктури. ....	31
1. Технічні особливості наземного сканування. ....	31
2. Сутність зовнішнього орієнтування сканів.....	34
3. Приклади проектів сканування інфраструктури за допомогою наземних лазерних сканерів. ....	39
Розділ 3. Процес наземного лазерного 3D сканування зруйнованої інфраструктури. ....	49
1. Опис наземного лазерного 3D сканера Leica ScanStation C10.....	49
2. Виконання наземного лазерного 3D сканування.....	51
3. Аналіз даних для фіксації зруйнувань електропідстанції. ....	57
Висновки .....	64
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....	66

## **ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ**

НЛС – наземний лазерний сканер.

ЦММ – цифрова модель місцевості.

ВІМ - інформаційне моделювання будівель.

ГІС – геоінформаційні системи.

## ВСТУП

**Актуальність роботи.** Ми проживаємо в період технічного прогресу, на жаль не тільки наукового, а й воєнного, тому сучасні конфлікти країн виходять на новий рівень. Кожна війна не обходиться без тяжких руйнувань, в першу чергу найбільше страждає інфраструктура міст. Саме тому, фіксація зруйнувань інфраструктури є доволі актуальною в нашій час.

Фіксація зруйнувань інфраструктури це складний процес, який потребує сучасних технологій та рішень, яким є лазерне сканування. Лазерне сканування полягає у використанні лазерного проміню, об'єкти відбивають лазерне випромінювання, яке повертається до сканера, де збираються дані та відображуються у вигляді хмари точок. Ключовими перевагами є те що лазерне сканування забезпечує високу точність та деталізацію зображення об'єктів, що скануються. Це дозволяє отримувати точні дані про стан будівель, мостів, доріг та інших елементів інфраструктури. Сканування може швидко збирати великий обсяг даних. Це особливо важливо в екстрених ситуаціях, таких як надзвичайні події чи катастрофи, коли потрібно оперативно отримати інформацію для прийняття рішень. Отримані дані можуть використовуватися для ефективного планування відновлення зруйнованої інфраструктури. Вони дозволяють розробляти точні плани відновлення та визначати пріоритетні напрямки робіт.

Саме тому, лазерне сканування є найсучаснішим методом отримання даних для фіксації зруйнувань інфраструктури та має купу переваг над класичними методами.

**Мета і завдання роботи.** Метою даної магістерської роботи є обґрунтування ефективності наземного лазерного сканування як сучасного методу фіксації зруйнованої інфраструктури.

Для вирішення цього питання було поставлено завдання:

- Аналіз теоретичних та методологічних засад наземного лазерного сканування.
- Описати практику використання даних лазерного сканування для фіксації зруйнованої інфраструктури.
- Обґрунтувати ефективність лазерного сканування та його даних для аналізу зруйнованої інфраструктури.

**Об'єктом дослідження** є технологія тривимірного наземного лазерного сканування у вирішенні завдань збору інформації для виготовлення планів будинків та споруд.

**Предметом дослідження** є хмари точок будівель і споруд отримані в результаті наземного лазерного сканування.

**Наукова новизна результатів дослідження.** Запропоновано інтегрований підхід до лазерного сканування, що дозволяє отримувати високо деталізовані тривимірні моделі зруйнованої інфраструктури з урахуванням складності форми об'єктів, неоднорідності руйнувань і особливостей навколишнього середовища.

**Практичне значення.** У процесі виконання магістерської роботи було досліджено технологію тривимірного наземного лазерного сканування та обґрунтовано його ефективність для фіксації зруйнованої інфраструктури.

**Структура магістерської кваліфікаційної роботи.** Наукова робота складається із вступу, трьох розділів, висновків та списку використаної літератури.

## **Розділ 1. Теоретичні засади наземного лазерного сканування.**

### **1. Теорія 3D моделювання.**

Точки, лінії та поверхні є математичними абстракціями. У них хоча б один розмір приймається рівним нулю. Реальні об'єкти мають всі розміри відмінні від нуля і займають деякий кінечний об'єм у просторі. Для геометричного моделювання предметів, які займають кінечний об'єм, у математиці використовують об'єкти, названі твердими тілами або просто тілами. Спосіб їх опису відрізняється від способу опису кривих і поверхонь. При моделюванні тіл будують поверхні, які відокремлюють займану ними частину простору від іншої частини простору. Існує декілька підходів до опису тіл.

Безліч предметів можна змодельовати з використанням тільки плоских поверхонь. Таке представлення тіл називають плоскогранним (Faceted representation або Faceted). У плоскогранному описі криволінійну поверхню апроксимують деякою кількістю пластин трикутної або чотирикутної форми. Використання плоских поверхонь значно спрощує виконання операцій над тілами. Плоскогранне представлення широко застосовують у будівництві і комп'ютерній графіці для одержання тонових зображень[1].

Деякі поверхні можна описати рівняннями в координатній формі (представити поверхні неявно). До них відносять поверхні другого порядку, поверхню тору та інші. Використовуючи для моделювання тіл такі поверхні, приходять до конструктивної твердотільної геометрії (Constructive Solid Geometry або CSG). Конструктивна твердотільна геометрія оперує примітивами, до яких, як правило, відносять прямокутну призму, трикутну призму, сферу, циліндр, конус і тор. Над примітивами і отриманими з них тілами виконують різні операції (у першу чергу Булеві операції). Поверхні з конструктивною твердотільною геометрією (сферична, циліндрична, конічна, поверхня тору і площина) ділять простір на дві частини і для них можна вказати, з якого боку поверхні знаходиться внутрішній

об'єм тіла. Неявне представлення поверхонь дає можливість одержати лінії їх перетину в аналітичній формі. Конструктивна твердотільна геометрія дозволяє моделювати більшість промислових виробів.

Найбільш загальний підхід до опису тіл полягає у представленні тіла сукупністю оболонок, які обмежують його об'єм, а грані і ребра яких задані параметрично. Кожну оболонку будують з набору поверхонь довільної форми, що стикаються між собою та містять повну інформацію про свої межі і зв'язки з сусідами. Такий опис тіл називають представленням за допомогою меж (Bounded representation або B-rep). Воно дає можливість виконувати над тілами багато різних операцій, зберігаючи при цьому єдиний спосіб їх «внутрішнього упорядкування» [2].

Представлення тіл за допомогою меж дозволяє моделювати об'єкти довільної форми і складності. Всі зазначені підходи до опису тіл використовують топологічні об'єкти та задовольняють умовам зв'язності, орієнтовності і замкнутості. Способи моделювання деталей часто повторюють технологічний процес їх виробництва. Один зі способів моделювання тіл полягає у тому, що беруть деяку заготовку тіла і потім шляхом видалення та додавання в певних місцях додаткового об'єму (матеріалу) одержують тіло необхідної форми. В якості заготовки можуть приймати тіла найпростішої форми: прямокутну призму, циліндр, конус, кулю, тор і інші. Найпростіші тіла складаються з однієї оболонки, побудованої за загальними правилами.

## **2. Сутність наземного лазерного сканування.**

Тенденції автоматизації всіх сфер виробничої діяльності обумовлені, передусім, бурхливим розвитком мікропроцесорної техніки і цифрових технологій. Розробка комп'ютерних систем прийняття рішень дозволила значною мірою скоротити вплив людського фактора на обсяги та якість продукції, що випускається. У цій ситуації мікропроцесорна техніка зіграла роль інтегруючої ланки між окремими етапами та технологіями виробничих процесів.

Зокрема, інтеграція цифрової техніки збору даних, геодезичних та фотограмметричних технологій призвела до появи принципово нових приладів для збирання просторової інформації про місцевість – систем наземної лазерної локації (наземних лазерних сканерів).

Сутність наземного лазерного сканування полягає у вимірі з високою швидкістю відстаней від сканера до точок об'єкта та реєстрації відповідних напрямків (вертикальних та горизонтальних кутів), отже, вимірювані величини при наземному лазерному скануванні є аналогічними, як і при роботі з електронними тахеометрами. Проте принцип тотальної зйомки об'єкта, а чи не окремих точок, характеризує НЛС як знімальну систему, результатом роботи якої є тривимірне зображення, так званий скан[5].

Система для наземного лазерного сканування складається з НЛС та польового персонального комп'ютера зі спеціалізованим програмним забезпеченням. НЛС складається з лазерного далекоміра, адаптованого до роботи з високою частотою, і блоку розгортки лазерного променя (рис. 1.1).

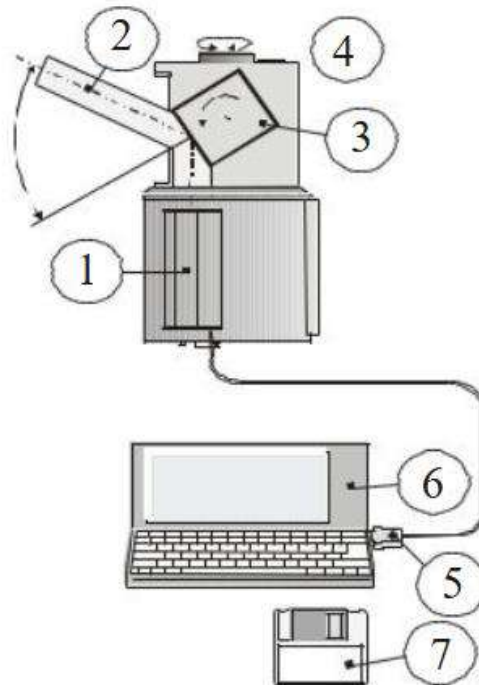


Рис. 1.1 Склад та принципова схема наземної скануючої системи: 1 - лазерний далекомір; 2 - прийомопередавальний тракт далекоміра; 3 - дзеркало, що сканує (призму); 4 - скануюча головка сканера; 5 - кабель, що з'єднує лазерний сканер із польовим комп'ютером; 6 – польовий комп'ютер (промисловий ноутбук) зі спеціалізованим програмним забезпеченням; 7 - носій інформації.

В основу роботи лазерних далекомірів, що використовуються в НЛС, покладено імпульсний і фазовий методи вимірювання відстаней, а також метод прямої кутової засічки.

Як блок розгортки в НЛС виступають сервопривід і полігональне дзеркало або призма. Сервопривід відхиляє промінь на задану величину горизонтальній площині, при цьому повертається вся верхня частина сканера, яка називається головкою. Розгортка у вертикальній площині здійснюється за рахунок обертання чи хитання дзеркала.

У процесі сканування фіксуються напрямок поширення лазерного променя та відстань до точок об'єкта.

Результатом роботи НЛС є растрове зображення - скан (рис. 2), значення пікселів якого є елементами вектора з наступними компонентами: вимірною відстанню, інтенсивністю відбитого сигналу і RGB-складової, що характеризує реальний колір точки. Положення (рядок та стовпець) кожного елемента (пікселя) отриманого растру відображає значення вимірних вертикального та горизонтального кутів. Більшість моделей НЛС характеристика реального кольору кожної точки виходить з допомогою неметричної цифрової камери.

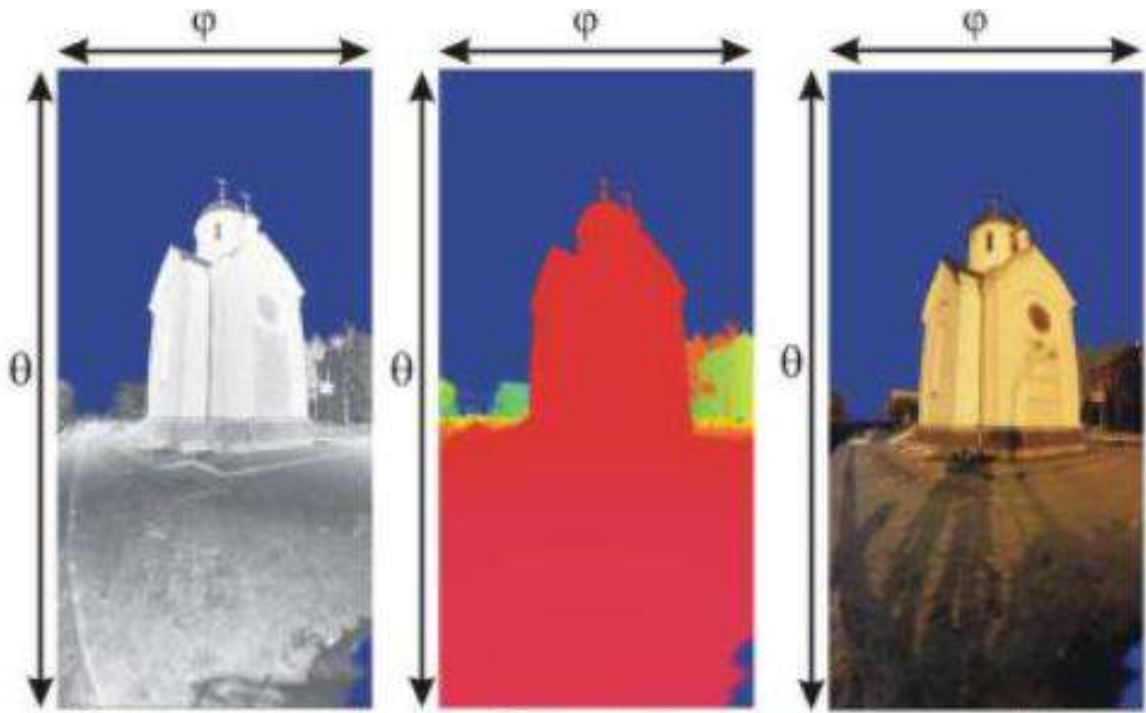


Рис. 1.2 Різновиди растрового зображення.

### 3. Класифікація наземних лазерних сканерів.

У сучасний період лазерні сканери виготовляють фірми геодезичного приладобудування, а саме: Leica Geosystems, Topcon, Trimble, Zoller + Froehlich, RIEGL. (рис. 1).



Рис. 1.3 Різновиди наземних лазерних сканерів.

Всі вони намагаються максимально задовольнити вимоги користувачів щодо технічних можливостей лазерних сканерів, і уважно стежать за тенденціями розвитку геодезичних потреб. Нині, лазерні сканери за функціональними можливостями доцільно розділити (див. табл. 1.1) на дві групи:

Автономні - це клас лазерних сканерів, у комплектації яких є всі стандартні функції та можливості роботи. До них належать практично всі сучасні лазерні сканери.

Інтегровані - це клас лазерних сканерів, які, крім стандартних функцій, мають додаткові можливості, такі як: інтегрований GPS-приймач, цифрова камера з високою роздільною здатністю та інтернет-браузер.

Таблиця 1.1 Класифікація лазерних сканерів.

<b>Основна класифікація</b>	<b>Моделі лазерних сканерів</b>
АВТОНОМНІ	Leica ScanStation2, Topcon GLS – 1000, Trimble GX
ІНТЕГРОВАНІ	Leica ScanStation C10, Riegl VZ 400
<b>Додаткова класифікація: за принципом виконання вимірювань</b>	<b>Моделі лазерних сканерів</b>
ІМПУЛЬСНІ	Riegl VZ 400, Trimble GX
ФАЗОВІ	IMAGER 5600
<b>За сферою застосування</b>	<b>Моделі лазерних сканерів</b>
ФАСАДНІ	Leica ScanStation C10
ІНТЕР'ЄРНІ	Leica ScanStation2, Topcon GLS – 1000

Аналізуючи можливості лазерних сканерів, можна зробити висновок, що технічне та програмне забезпечення у приладів різних фірм практично однакове, але можливості та якість виконаної роботи дещо відрізняються. Якщо розглянути детально (див. табл. 1.2), то до основних параметрів лазерних сканерів можна зарахувати: точність вимірювання кутів та віддалей, швидкість сканування, діапазон сканування, поле зору у вертикальній та горизонтальній площинах, передавання даних та обробка отриманих результатів.

Таблиця 1.2 Основні технічні характеристики лазерних сканерів.

## Основні технічні характеристики лазерних сканерів

Марка Технічні характеристики	Leica ScanStation C10	IMAGER 5600	Topcon GLS-1000	Trimble GX	Riegel VZ 400
Діапазон сканування	300 м – 90 % альbedo; 134 м – 18 % альbedo	79 м – 90 % альbedo; 20 м – 18 % альbedo;	330 м – 90 % альbedo; 150 м – 18 % альbedo	350 м – 90 % альbedo; 155 м – 18 % альbedo;	500 м – 90 % альbedo; 160 м – 18 % альbedo;
Точність визначення: віддалі, мм/м кута	4 12"	1 25"	4 6"	4 2"	5 2"
Швидкість сканування: мах. пунктів/с середня пунктів/с	50000 50000	500000 250000	3000 3000	5000 5000	42000 125000
Поле зору: вертик. град. гориз. град.	270 360	310 360	70 360	60 360	100 360
Наявність GPS-системи	так	ні	ні	ні	так

Основною характеристикою лазерних сканерів є тип віддалеміра. За способом визначення відстані сканери поділяють на фазові, імпульсні та триангуляційні. Основна частка наземних лазерних сканерів побудована на імпульсній та фазовій технології визначення відстані. В геодезичних роботах, через малий радіус дії, триангуляційні сканери зазвичай не використовують.

У більшості моделей сканерів використовують імпульсний лазерний віддалемір та конструкцію з двома рухомими дзеркалами для зміщення променя у вертикальній та горизонтальній площинах[6].

Точність вимірювання кутів та ліній є одним із найважливіших параметрів під час оцінки лазерного сканера. За цим параметром лазерні сканери переважно залежать від точності роботи серводвигунів, які переміщують дзеркала, забезпечуючи точність скерування лазерного променя на об'єкт. Якщо точність вимірювання задається великою, то швидкість сканування знижується і навпаки.

Швидкість сканування є важливим параметром, оскільки впливає на час та обсяги роботи.

Сьогодні сканери можуть досягати швидкості до 500000 пунктів/с, крім того, цей параметр можна регулювати залежно від потреби.

Наступним, не менш важливим параметром, є відстань сканування, яка також впливає на терміни виконання роботи і залежить насамперед від поверхні, на яку здійснюється вимірювання, тобто від відношення інтенсивності відбитого сигналу до вихідного - так званого альбедо. Чим темніша поверхня, тим меншою буде інтенсивність відбитого сигналу, і відповідно меншою буде і відстань сканування. Тому варто звертати увагу, за якого альбедо були отримані заявлені максимальні віддалі вимірювання.

Відмінність між імпульсною та фазовою технологіями роботи лазерних сканерів проявляється у точності визначення відстані. Але застосування різних технологій та алгоритмів обчислення координат точок у різних моделях сканерів може цю відмінність нівелювати. Саме тому тип лазерного віддалеміра не є основним параметром під час вибору наземного лазерного сканера.

Імпульсні сканери мають перевагу щодо далекості вимірювань.

Фазові сканери мають перевагу у швидкості (на порядок), але втрачають точність зі зростанням віддалі до об'єкта, тому зазвичай застосовуються для знімання інтер'єрів або замкнутих просторів (тунелів, печер тощо).

Ще одним важливим параметром класифікації сканерів є сфера їх застосування:

- Фасадні сканери мають перевагу в дальності і швидкості вимірювань, але мають обмежену зону сканування. Основна сфера застосування фасадних 3D сканерів - знімання відкритих ділянок місцевості і зовнішньої поверхні великомасштабних об'єктів (фасадів будівель і споруд), яка виконується зазвичай з декількох станцій.

- Інтер'єрні сканери мають максимально широку зону сканування, але поступаються за дальністю вимірювань, тому зазвичай застосовуються для знімання інтер'єрів або невеликих замкнутих просторів (тунелів, печер тощо).

Від параметрів лазера залежить відстань сканування, а також точність вимірювання цієї відстані. Основні характеристики лазера:

- довжина хвилі;
- потужність лазера;
- тип лазера;
- діаметр лазерного променя;
- розходження лазерного променя.

Оскільки усі 3D-сканери виробляються за кордоном, то в технічних характеристиках приладу вказують клас безпеки лазера за міжнародним стандартом ІЕС EN60825-1:2007) [21]. За цим стандартом більшість лазерів 3D сканерів потрапляють у категорію 3R, рівень травматизму від яких мінімальний. Винятком є деякі сканери далекого радіуса дії. Наприклад, Riegl VZ-6000 з максимальним радіусом дії 6 км використовує лазери класу 3B, які є небезпечними у випадку безпосередньої дії на сітківку ока.

Залежно від діаметра лазерного променя на виході, його розходження та кроку сканування, сканер на певній відстані не зможе повноцінно обміряти дрібну деталь навколишнього середовища. Головною причиною цього є збільшення розміру лазерної точки. Тому зі збільшенням радіуса дії сканерів, щоб зберегти точність результатів сканування, діаметр лазерного променя треба зменшити.

Поле зору приладу залежить від його конструкції і в горизонтальній площині становить  $360^\circ$ , а у вертикальній площині варіюється від  $60^\circ$  до  $310^\circ$  (так звані панорамні сканери).

Дальність вимірювань залежить від потужності лазера, чутливості приймального пристрою та властивостей поверхні, яка сканується. Зазвичай виробник вказує дальність вимірювань спільно зі значенням коефіцієнта відбиття.

Коефіцієнт відбиття визначається як відношення потоку випромінювання, що відбивається поверхнею, до потоку випромінювання, що падає на поверхню. Залежно від фізичних властивостей матеріалу, який сканується, змінюватиметься максимальна відстань знімання приладу.

Встановлено, що одні з найвищих показників відбиття мають срібло (95 %), ватман (76–82 %). Одні з найнижчих – червона цегла (8–10 %), необроблена сталь (5–10 %), скло (0,08 %). Значення коефіцієнта відбиття також залежить від відстані, на якій проводиться знімання, та кута попадання світлового променя на поверхню.

Враховуючи значення коефіцієнта відбиття, кожній точці скана присвоюється колір у вибраному діапазоні кольорів.

Швидкість та щільність сканування

Швидкість вимірювання залежить від:

- кількості вимірювань за одиницю часу;
- роздільної здатності вимірювання;
- точності вимірювання;
- відстані вимірювань;
- захоплення реальних кольорів місцевості.

Наземні лазерні сканери можуть розрізнятися й за іншими особливостями будови та користування. Цими параметрами є:

- цифрова камера;
- центрир;
- датчики орієнтування скана;
- передача даних та зв'язок;
- фізичні розміри і маса;
- температурний режим роботи.

Кожен імпульс лазерного віддалеміра містить інформацію не тільки про відстань, але й про колір об'єкта в чорно-білому діапазоні, який виражається коефіцієнтом відбивної здатності поверхні. Але багато замовників не хочуть

працювати в псевдокольорах. Для присвоєння точкам скану реальних кольорів створюється фотопанорама місцевості. Для правильного суміщення фотозображення і хмари точок необхідно, щоб фотокамера перебувала в тій самій точці, що і вимірювальна система приладу. Зробивши фотографії з таким самим колом огляду, як і в сканера, всім точкам скану можна присвоїти відповідні кольори.

Деякі сканери, зазвичай моделі попередніх років, для захоплення кольору місцевості, використовують зовнішні цифрові фотокамери. Перевагою такого способу є можливість налаштувати якість та параметри фотографування. Істотним недоліком – процес суміщення фотографії та хмари точок, який є доволі трудомістким.

В модельному ряді більшість сучасних 3D-сканерів оснащені внутрішньою цифровою фотокамерою, яка спрощує процедуру опрацювання хмар точок. Але через автоматизований процес фотографування реальні кольори об'єктів можуть бути спотворені.

Центрир використовується для встановлення сканера над конкретною точкою. Оскільки не всі сканери оснащені цим пристроєм, то орієнтування сканів іноді може бути ускладненим. До датчиків орієнтування сканів, встановлених у лазерних сканерах, належать альтиметр (висотомір), компас, інклінометр, GPS приймач. Ці сенсори допомагають в автоматичній обробці сканів, надаючи інформацію про висоту сканування, орієнтування на північ, відхилення хмар точок від горизонту, координати місця розташування приладу.

Дані сканування найчастіше записують на внутрішній жорсткий диск чи зовнішній флеш-накопичувач. Також існують рішення запису даних на карту пам'яті стандарту SD. Оскільки у процесі знімання відбувається інтенсивний запис інформації, найкраще використовувати карти пам'яті 10 класу і вище. Вони забезпечують швидкість запису даних не нижче за 10 мб/с.

Зберігання даних здійснюється безпосередньо на прилад або через вбудований інтерфейс на ноутбук. У новітніх приладах для передавання даних використовується безпроводна технологія Wi-Fi та/або стандартний роз'єм Ethernet.

Інтегровані лазерні сканери укомплектовані цифровою камерою, завдяки чому можна попередньо візуалізувати об'єкт, що сканується, для спрощення вибору області сканування та подальшої обробки й моделювання.

Живлення приладу здійснюється від акумуляторної батареї або безпосередньо від мережі 220 В. При останньому способі можуть виникати проблеми з доступом до електричної мережі.

Робочі параметри роботи сканерів коливаються від 0°C - до +40°C, проте існують лазерні сканери, такі як Leica HDS 4400, що можуть працювати за екстремально низких температур - до - 40°C.

Єдиними недоліками лазерних сканерів є вага понад 10 кг та обмеження можливостей проведення робіт погодними умовами.

Загалом весь процес сканування є максимально автоматизованим. Дані вимірювань у реальному часі накопичуються у спеціальній базі даних на вбудованому чи зовнішньому на-копичувачі. На швидкість ведення робіт істотно впливає кваліфікація оператора, оскільки від неї залежить кількість станцій та правильний вибір щільності (кроку) сканування.

#### **4. Сфери застосування лазерного сканування**

Наземне лазерне сканування як спосіб відображення місцевості і реальної поверхні об'єктів у вигляді їхнього тривимірного зображення разом із електронними тахеометрами та системами GPS успішно використовують у таких сферах:

Інженерна геодезія: знімання промислових об'єктів з великою кількістю комунікацій, атомні, теплові, гідроелектростанції, знімання автомобільних і залізничних шляхів, мостів, знімання та профілювання тунелів та іншій гірській

промисловості; визначення об'ємів гірських порід, які видобуто у результаті вибуху або запасів сировини, 3D-модельовання відкритих кар'єрів та підземних шахт, маркшейдерський супровід бурових робіт та будівництво і проектування родовищ корисних копалин. Лазерне сканування забезпечує принципово нові можливості для визначення об'ємів гірських порід. За рахунок високої густини точок та точності визначення просторових координат поверхні гірських порід точність визначення об'ємів становить 0,5%. Час роботи порівняно з традиційними методами зменшується в десятки разів.

Архітектура: архітектурні обміри, геодезичне забезпечення проектування і монтажу фасадних конструкцій; контроль деформацій; 3D-модельовання будівель, вулиць і кварталів; складання детальних планів і 2D-креслень; моніторинг фасадів; створення та відновлення виконавчої документації та створення робочих креслень[7].



Рис. 1.4 Використання наземного лазерного сканера для сканування фасаду будівлі.

Будівництво та експлуатація споруд: 3D-модельовання; коригування проекту в процесі будівництва; оптимальне планування і контроль переміщення, встановлення і видалення великих частин споруд або обладнання; монтажні роботи; моніторинг стану об'єкта під час експлуатації; відновлення втрачених креслень[8].



Рис. 1.5 Використання наземного лазерного сканера на будівництві.

Управління дорогами: знімання дорожнього полотна, створення 3D-моделі рельєфу; проектування, реконструкція і будівництво об'єктів інфраструктури; діагностика стану рейкової колії, будівництво під'їзних шляхів, контроль граничних величин відхилень, контроль верхнього стану автодоріг.

Енергетика: знімання об'єктів (кабелі, опорні конструкції), створення 3D-моделей, монтажні роботи; моніторинг стану об'єкта, контроль деформацій, складання планів і креслень.



Рис. 1.6 Використання наземного лазерного сканера для сканування мостів.

Охорона та реставрація культурної спадщини: Для збереження культурної спадщини 3D-сканування дозволяє фіксувати об'єкти з мікронною точністю, що стає особливо корисним у разі пошкодження або руйнування. Застосовується в музеях, історичних пам'ятках і археологічних розкопках для створення детальних цифрових копій артефактів та архітектурних пам'яток. У випадках реставрації об'єктів архітектурної спадщини ці моделі служать точними орієнтирами для майбутніх відновлювальних робіт. Збережені цифрові дані можуть бути використані для відновлення об'єктів, створення реплік, а також для навчання та наукових досліджень.

Промисловість та виробництво: У промисловості наземне лазерне 3D-сканування застосовується для точного аналізу відповідності обладнання та деталей проектам. Це допомагає ідентифікувати виробничі дефекти, оцінювати знос устаткування та перевіряти збірку складних промислових установок. У гірничодобувній галузі сканування дозволяє стежити за рівнем запасів у кар'єрах,

оцінювати стан зсувів, проводити моніторинг відкритих розробок і гарантувати техніку безпеки працівників.

Охорона навколишнього середовища: У природоохоронних заходах 3D-сканування застосовується для моніторингу екосистем і рельєфу територій, де відбуваються природні процеси: ерозія берегів, утворення яруг, повені або зсуви. Сканування дозволяє точно оцінити і виміряти масштаби цих явищ, що необхідно для моделювання ризиків і запобігання стихійним лихам. У лісництві та водному господарстві дані 3D-сканування використовують для створення моделей лісових масивів, моніторингу обсягів запасів деревини, контролю за станом водойм та річок, а також для прогнозування їх змін.

Медицина та біомеханіка: У медицині 3D-сканування застосовується для створення детальних моделей тіла пацієнтів. Це дуже корисно в ортопедії, де потрібно виготовляти індивідуальні протези чи інші медичні імплантати з високою точністю, враховуючи анатомічні особливості конкретного пацієнта. У стоматології сканування допомагає створювати точні моделі зубів, а в пластичній хірургії дозволяє планувати процедури, симулюючи результати операцій. У біомеханіці 3D-сканування допомагає вивчати особливості руху та структуру кісток, суглобів і м'язів для спортивної медицини та досліджень.

Судова експертиза та криміналістика: У судовій експертизі 3D-сканування дозволяє точно зафіксувати місця злочинів або аварій, створюючи віртуальні моделі з місця події. Ці моделі дають можливість зберегти всі деталі та координати предметів, що може допомогти в реконструкції подій та є доказовим матеріалом у судах. Завдяки 3D-моделям можна аналізувати траєкторії руху об'єктів, положення тіл, місце розташування куль та інші важливі деталі, що слугує суттєвим підґрунтям для судових розглядів.

Військові та оборонні цілі: У військових цілях наземне 3D-сканування допомагає створювати точні моделі місцевості для аналізу і планування військових операцій. Це полегшує розгортання військової техніки, визначення оптимальних

маршрутів для пересування військових колон, а також пошук укриттів на місцевості. Під час або після бойових дій сканування може бути використане для оцінки стану споруд, обстеження руйнувань і документування воєнних злочинів. Такі дані слугують об'єктивною основою для розслідувань і відновлення інфраструктури.

Наукові дослідження: У багатьох наукових дисциплінах наземне 3D-сканування застосовується для точного аналізу об'єктів та структур. Наприклад, у археології сканування допомагає фіксувати положення та деталі артефактів, створюючи точні цифрові копії розкопок. У палеонтології 3D-сканування використовується для створення моделей скам'янілостей і дослідження особливостей будови древніх організмів. У геології та геоморфології сканування дозволяє вивчати особливості карстових систем, печер і скельних формувань, допомагаючи моделювати процеси їхнього утворення та руйнування.

## **5. Переваги наземного лазерного 3D-сканування над традиційними методами топографо-геодезичних робіт та інженерно-геодезичних вишукувань**

Перевагою лазерного сканування над традиційним зніманням є кількість вимірювань. Щоб досягнути відтворення реального стану об'єкта у вигляді точок за найкоротший час, лазерний сканер повинен досить швидко проводити вимірювання. Це головний параметр сканера, від якого залежить кількість часу, витраченого на польові роботи.

Наземне лазерне 3D-сканування пропонує точний, швидкий, безпечний і ефективний підхід до збору геодезичних даних, роблячи його ідеальним вибором для сучасних топографо-геодезичних та інженерних досліджень та має багато переваг над традиційними методами топографо-геодезичних робіт та інженерно-геодезичних вишукувань, а саме:

### **Висока точність та деталізація**

Лазерний 3D-сканер працює за принципом відбиття лазерного променя від поверхні об'єкта. Сканер випромінює лазерний імпульс, який відбивається від об'єкта і повертається до сканера. Час, за який повертається імпульс, дозволяє визначити точну відстань до кожної точки поверхні. Завдяки цьому 3D-сканери можуть фіксувати мільйони точок у вигляді хмари точок з дуже високою точністю (до 1-2 мм). Така точність є особливо корисною в інженерних дослідженнях, де навіть невеликі помилки можуть призвести до дорогих виправлень.

### **Швидкість збору даних**

Традиційні методи топографічних вишукувань, наприклад, тахеометрія або геодезичні виміри за допомогою нівеліра, можуть бути дуже трудомісткими. Геодезістам потрібно проводити виміри з кожної точки вручну, що займає багато часу. У випадку з лазерним сканером, достатньо встановити обладнання в потрібному місці, і воно автоматично збере тисячі точок на секунду. Таким чином, для збору даних великої площі або складних об'єктів потрібно набагато менше часу. Швидкість сканування є особливо важливою для великих територій або в умовах обмеженого часу.

### **Повна та всебічна картина об'єкта**

При лазерному скануванні створюється детальна 3D-модель об'єкта у вигляді хмари точок, яка відображає усі елементи та особливості поверхні. Ця модель є надзвичайно корисною, оскільки дозволяє отримувати зображення об'єкта з різних точок огляду, вимірювати об'єкт у 3D-просторі і відображати точну форму, розміри, кривизну та інші особливості. Традиційні методи зазвичай не дають такої цілісної картини: зняті дані, як правило, мають обмежений обсяг і потребують додаткових вимірювань або обробки для заповнення прогалін.

### **Безпека проведення робіт**

Наземне лазерне 3D-сканування дозволяє геодезістам працювати на безпечній відстані від небезпечних зон (наприклад, на об'єктах із складним

рельєфом, крутих схилах, виробничих або промислових зонах тощо). Геодезисти можуть збирати дані, не підходячи до небезпечних об'єктів, що знижує ризик для їхнього здоров'я та безпеки. Це є вагомою перевагою в умовах, де використання традиційного обладнання потребувало б фізичного доступу до кожної точки.

### **Мінімізація людського фактора**

У процесі наземного лазерного сканування роль людини зводиться переважно до налаштування і запуску обладнання. Це зменшує ризик людських помилок, таких як неточні виміри або неправильно встановлене обладнання. Лазерний сканер автоматично фіксує та збирає дані, що дозволяє отримувати об'єктивну інформацію. Крім того, програмне забезпечення для аналізу даних лазерного сканування дозволяє швидко перевіряти отримані результати та виявляти можливі неточності на ранніх стадіях.

### **Можливість використання даних для BIM та ГІС**

Дані з лазерного 3D-сканування добре інтегруються з програмами для інформаційного моделювання будівель (BIM) і геоінформаційних систем (ГІС). 3D-модель, отримана з хмари точок, може використовуватись для точного проектування, архітектурного аналізу, управління інфраструктурою та планування будівництва. У випадку традиційних методів зйомки, такі дані доводиться вручну переводити у формат, який підходить для ГІС або BIM-систем, що вимагає додаткового часу і ресурсів.

### **Економічна ефективність на довгостроковій основі**

Хоча наземне лазерне сканування потребує інвестицій у дороге обладнання та програмне забезпечення, воно виправдовує себе на довгостроковій основі завдяки зменшенню витрат на переробки та виправлення помилок. Точність та повнота даних дозволяють краще планувати проєкт, виявляти проблеми на ранніх етапах і мінімізувати можливість неточностей, що може значно зекономити кошти на стадії будівництва або управління об'єктом.

## **6. Використання наземного лазерного 3D сканування в умовах війни.**

В умовах війни наземне лазерне 3D-сканування може відігравати важливу роль у різних аспектах військових операцій, відновлення інфраструктури, безпеки цивільних та документування руйнувань. Після атак важливо швидко і точно оцінити ступінь пошкоджень будівель, доріг, мостів та інших об'єктів. Лазерне 3D-сканування дозволяє отримати детальну модель об'єкта з точністю до кількох міліметрів, що дозволяє швидко встановити, які елементи конструкцій зберегли свою міцність, а які зазнали критичних пошкоджень. Такі дані дозволяють прийняти обґрунтовані рішення щодо ремонту, реконструкції чи демонтажу. Це пришвидшує процес відновлення інфраструктури, оскільки 3D-моделі також можна використовувати для проектування нових конструкцій, що базуються на залишках старих.

У зоні бойових дій або після обстрілів існує багато небезпек, таких як заміновані ділянки, нерозірвані боєприпаси чи руїни з загрозою обвалу. Лазерне сканування дозволяє дистанційно обстежити ці зони та створити 3D-модель, яка точно відображає місцезнаходження і розміри об'єктів, які можуть бути небезпечними. Це знижує ризик для саперів і військових, які мають забезпечити розмінування території, оскільки за допомогою моделі вони можуть визначити найкращі шляхи підходу до небезпечних об'єктів і уникнути зайвого ризику.

Використання 3D-сканування для створення цифрових моделей місцевості допомагає військовим ефективніше планувати операції. Модель місцевості дозволяє бачити деталі рельєфу: пагорби, яри, схили, що може впливати на розміщення техніки, визначення безпечних маршрутів та укриттів для солдатів. Замість традиційних карт військові можуть користуватися цифровою моделлю, яка є точнішою і дозволяє швидко визначати вигідні позиції для оборони або наступу, а також краще орієнтуватися в умовах поганої видимості чи важкого рельєфу.

Точні 3D-моделі руйнувань слугують беззаперечними доказами для документування воєнних злочинів. Лазерне сканування дозволяє зафіксувати

руйнування в деталях, що стане надійним джерелом доказів для судів і міжнародних організацій. Завдяки високій точності сканування, дані неможливо підробити, що допомагає об'єктивно встановити масштаби збитків. Цифрові моделі можуть також використовуватися як історичні записи, зберігаючи інформацію для майбутніх розслідувань, а також для медіа та громадськості.

Під час війни будівлі часто використовуються як укриття або тимчасові штаби, тому важливо знати, чи не загрожують вони життю людей. Лазерне сканування може швидко виявити дефекти в конструкції: тріщини, деформації, нахили стін чи перекриттів, які вказують на можливе обвалення. Використання 3D-моделей з виявленими пошкодженнями дозволяє визначити, які споруди можна використовувати як укриття, а які потрібно залишити через небезпеку. Це забезпечує безпеку і для цивільних, і для військових, знижуючи ризик травмування або загибелі.

У багатьох містах під час війни руйнуються історичні пам'ятки, які мають велику культурну цінність. Лазерне 3D-сканування дозволяє створити точну цифрову копію таких об'єктів до або після їх пошкодження. Ці дані можуть бути збережені для подальшої реставрації та відновлення зруйнованих пам'яток. Крім того, така документація є важливою для збереження історичної спадщини в цифровому форматі, навіть якщо самі об'єкти не підлягають відновленню. Дані можуть використовуватись для судових розглядів та для оцінки збитків культурній спадщині.

Лазерне сканування допомагає швидко оцінити стан інфраструктури на великих територіях і визначити маршрути, які залишилися безпечними для пересування. 3D-моделі доріг і прилеглих об'єктів дозволяють ефективно організувати евакуаційні шляхи для цивільного населення, визначити альтернативні маршрути для постачання гуманітарної допомоги та військової техніки. Маючи такі дані, можна запобігти пробкам, уникнути небезпечних ділянок і забезпечити швидкий та безпечний рух колон транспорту.

Таким чином, лазерне 3D-сканування в умовах війни надає багато можливостей для підтримки безпеки, збереження спадщини та відновлення інфраструктури, а також слугує важливим інструментом для воєнного планування і розслідування руйнувань.



Рис. 1.7 Сканування зруйнованого об'єкту для його відновлення.

## **Розділ 2. Практика використання даних наземного лазерного 3D сканування для фіксації руйнувань інфраструктури.**

### **1. Технічні особливості наземного сканування.**

На сьогоднішній день немає чіткої технології виконання робіт з наземного лазерного знімання з метою побудови тривимірних моделей місцевості та створення топографічних планів і двовимірних креслень ділянок сканування.

Розглянемо сутність і особливості виконання кожного процесу наземної лазерної зйомки.

Складання технічного проекту. На етапі складання технічного проекту регламентуються необхідна точність побудови тривимірної моделі місцевості (об'єкта) або цифрового плану, зміст і деталізація їх, необхідний формат (розширення) готової продукції, використовуване обладнання, вартість проведення робіт. При необхідності уточнюються питання про додаткову інформацію на кожний об'єкт.

Рекогносцировка місцевості. З урахуванням конкретних умов місцевості вибирається раціональний спосіб створення і згущення знімальної основи. Також під час рекогносцировки намічаються точки розташування сканера, місця розміщення спеціальних марок, уточнюються терміни проведення робіт і т. п.

Кількість і розташування сканерних станцій проектується, виходячи з вимог забезпечення необхідної точності створення продукції по сканам, продуктивності та економічності робіт.

Технологія побудови тривимірних моделей місцевості і створення цифрових топографічних планів за даними наземного лазерного сканування

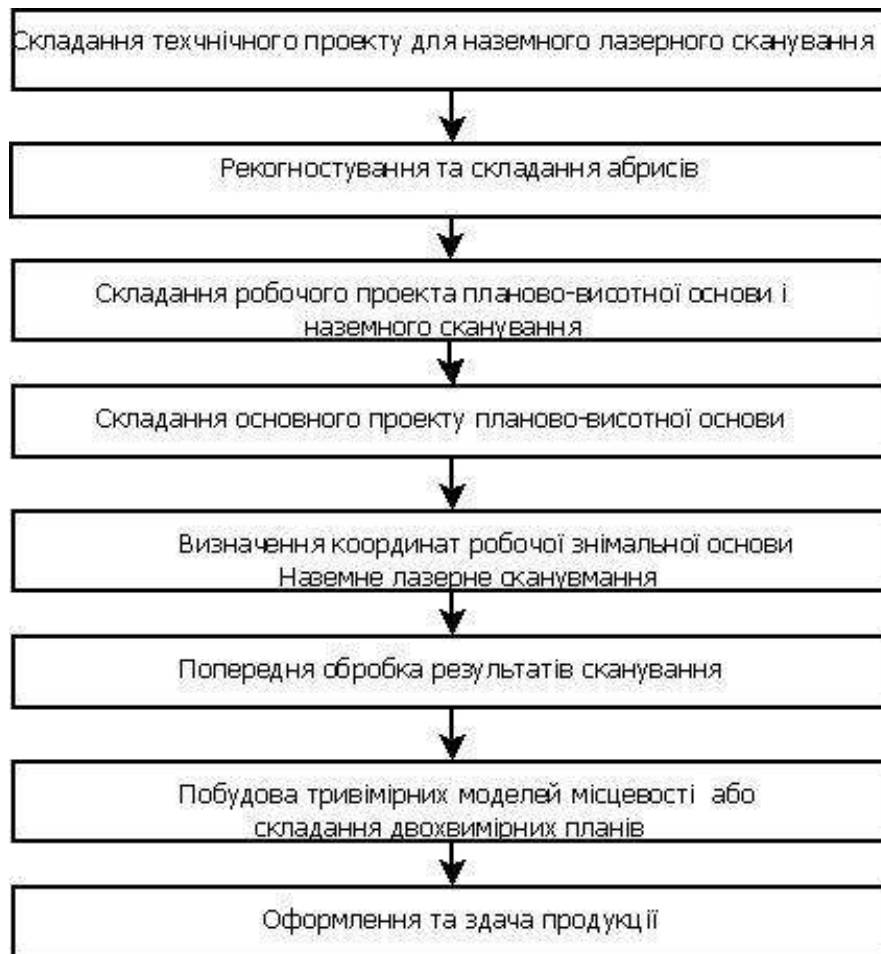


Рис 2.1 Схема технології виконання робіт із наземного лазерного сканування.

Вибір сканерних станцій повинен забезпечувати відображення на одному скані максимальної площі знімається території. У зв'язку з цим сканер необхідно розташовувати приблизно на висоті 30м відносно знімається території, але таке розміщення приладу вимагає додаткових дорогих пристроїв.

Відстань між сканерними станціями один від одного при зйомці об'єктів з метою створення тривимірних моделей, як правило, становить 20-30 м, а в деяких випадках і менше в залежності від складності об'єкта.

По завершенні рекогносцировки складають абрис назнімається територію. Від повноти абрисів залежить достовірність подальшого розпізнавання об'єктів зйомки при дешифруванні точкової моделі камеральних умовах.

При зйомці малозастроєних територій абрис краще складати по точкової моделі об'єкта (отриманої після наземного лазерного сканування), роздрукованою

на папері в ортогональній проекції, аналогічно тому, як виконується польове дешифрування об'єктів по фотоплане. Такий підхід дозволяє спростити процес складання абрисів, так як на сканебудуть відображені всі об'єкти в єдиному масштабі, і його необхідно доповнити тільки семантичною інформацією.

Підготовка планово-висотного обґрунтування скану зйомки. Визначення координат точок планово-висотного обґрунтування необхідно для створення тривимірних моделей і великомасштабних планів місцевості в заданій системі координат і включає наступні процеси:

- складання проекту мережі основного і робочого планово-висотного обґрунтування;
- закріплення точок основного планово-висотного обґрунтування;
- польові виміри по планово-висотній прив'язки точок основного обґрунтування;
- камеральна обробка, що включає наступні етапи: зрівняння результатів польових вимірювань і складання каталогу координат точок основного планово-висотного обґрунтування;
- оцінка точності створення основного знімальної основи;
- створення робочого планово-висотного обґрунтування.

З урахуванням конкретних умов місцевості вибирається раціональний спосіб створення основного і робочого знімального обґрунтування.

## **2. Сутність зовнішнього орієнтування сканів**

Одним з важливих етапів в технології наземного лазерного сканування є зовнішнє орієнтування сканів. Від точності виконання цього процесу залежать остаточна точність побудови цифрової моделі ситуації і рельєфу, якість дешифрування точкової моделі і можливість автоматизації процесу побудови ЦММ.

У випадку завдання перетворення координат точок з однієї системи координат в іншу виконується за допомогою відомої в математиці формули (2.1):

$$\begin{bmatrix} X_{\text{вн}} \\ Y_{\text{вн}} \\ Z_{\text{вн}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} + A \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

де  $X_{\text{вн}}$ ,  $Y_{\text{вн}}$ ,  $Z_{\text{вн}}$  - координати точок скана у зовнішній системі координат, яка може бути геодезичної або умовно заданої в залежності від розв'язуваної задачі;

$X$ ,  $Y$ ,  $Z$ , - координати точок скана в системі координат сканера;

$X_0$ ,  $Y_0$ ,  $Z_0$ , - координати початку системи координат  $OXYZ$  скана у зовнішній системі  $OХвн$ ,  $Y_{\text{вн}}$ ,  $Z_{\text{вн}}$ ;

$A$  - матриця напрямних косинусів, що визначають орієнтацію системи координат  $OXYZ$  щодо  $OХвн$ ,  $Y_{\text{вн}}$ ,  $Z_{\text{вн}}$ .

У системах наземного лазерного сканування в даний час реалізуються обидва методи зовнішнього орієнтування сканів: прямий і аналітичний[8].

Прямий метод визначення елементів зовнішнього орієнтування сканів передбачає використання додаткових пристроїв і приладів і може бути реалізований у двох варіантах.

У першому варіанті лінійні елементи зовнішнього орієнтування сканів  $X_0$ ,  $Y_0$ ,  $Z_0$  визначаються в результаті центрування сканера за допомогою схилу над точкою, координати якої відомі у зовнішній системі координат після попереднього горизонтирования приладу і вимірювання його висоти. У сучасних апаратних засобах для центрування зазвичай застосовується лазерний схил. Середня похибка центрування, а, отже, і визначення елементів  $X_0$ ,  $Y_0$  за допомогою лазерного схилу становить від 1,5 до 2 мм, а середня помилка визначення величини  $Z_0$ - від 3 до 5 мм.

Координати точок стояння сканера можуть бути визначені процесі робіт з наземного лазерного сканування на основі геодезичних побудов або за допомогою

супутникової геодезичної апаратури. Точність просторових координат точок місцевості супутниковими методами приведена в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 Похибки визначення просторових координат точок супутниковими методами

Метод	Похибка координат	
	Фазові вимірювання	Кодові вимірювання
Абсолютний	Рішення з точними ефемеридами 0,6-4 см	- PPS 2-18 м; - SPS без режиму SA 4-40 м; - SPS з режимом SA 12-100 м
Диференційний	Статика (фіксоване рішення) (0,1 - 1) $4 - D 10^{-7}$ см; Статика (плаваюче рішення) 7-50 см; - Кінематика RTK, VRS 0,6-5 см	DGPS по коду, згладженому фазою 0,2-1 м; DGPS 0,6-5 м

Кутові елементи зовнішнього орієнтування скана можна задати в процесі горизонтування сканера, коли вертикальна вісь приладу встановлюється в прямовисне положення (паралельно осі  $Z$  зовнішньої системи координат). Внаслідок цього поздовжній  $\varepsilon$  і поперечний  $\eta$  кути нахилу скана будуть рівні нулю. Кут розвороту скана навколо осі  $Z$  щодо зовнішньої системи координат визначається при орієнтуванні лазерного сканера по заданому напрямку.

У наземних лазерних сканерах також, як і в сучасних геодезичних приладах, наприклад електронних тахеометрах, для точного горизонтирования

використовуються двовісні компенсатори, точність роботи яких в даний час коливається від 1 до 5 ". Орієнтування приладу по початкового напрямку виконується з похибкою, як вимірювання горизонтальних кутів. Для НЛС ця величина варіюється від 3 до 10 ".

У тому випадку, якщо сканери не мають пристроїв для горизонтування, то кутові елементи зовнішнього орієнтування сканів можна визначити за допомогою інклінометров і інерціальних геодезичних систем.

Другий варіант прямого методу зовнішнього орієнтування сканів заснований на визначенні елементів  $X_0, Y_0, Z_0, \varepsilon, \eta, \xi$  безпосередньо в процесі сканування об'єкту за допомогою рухомої наземної скануючої системи, що включає носій, на якому розміщені і жорстко пов'язані між собою лазерний сканер, супутниковий і інерціальні системи і службачасу.

У табл. 2.2 наведено переваги та недоліки інструментального і аналітичного методів зовнішнього орієнтування сканів.

Таблиця 2.2 Переваги і недоліки методів зовнішнього орієнтування сканів

Назва	Переваги	Недоліки
Аналітичний	Можливість нахилу вертикальної осі обертання сканера в діапазоні від 0 до 180 °, що дозволяє оптимізувати процес організації лазерного сканування; Менш жорсткі вимоги до розміщення сусідніх сканерних станцій, що дозволяє більш просто	- Необхідна наявність електронного тахеометра або інших інструментів для визначення координат центрів спеціальних марок; - Більш складне програмне забезпечення для визначення елементів зовнішнього орієнтування сканів; - Значно важче вага

	<p>виключити «мертві зони» при зйомці об'єкта;</p> <p>- Простіше виконується проектування сканерних станцій (немає необхідності забезпечення оптимальної відстані і видимості між сусідніми станціями)</p>	<p>комплекту обладнання для сканера зйомки (НЛС, акумулятор, комплект спеціальних марок, електронний тахеометр, два штативи і при необхідності ноутбук). В середньому комплект обладнання важче на 13-18 кг, ніж при прямому методі</p>
Інструментальний	<p>- Скорочення часу роботи на сканера станції;</p> <p>- Немає необхідності використання допоміжного обладнання та додаткових геодезичних інструментів (електронного тахеометра і спеціальних марок);</p> <p>- Легше комплект обладнання для сканера зйомки (НЛС, акумулятор, штатив і при необхідності ноутбук)</p>	<p>- Труднощі розміщення НЛС при зйомці складних технологічних і висотних конструкцій;</p> <p>- Неможлива оцінка точності визначення елементів поза</p>

Аналіз даних, наведених у табл. 2.2, дозволяє зробити висновок, що для визначення елементів зовнішнього орієнтування сканів в сканерних системах

повинні бути реалізовані обидва методи, що дає можливість оптимальніше проводити сканерну зйомку.

### **3. Приклади проектів сканування інфраструктури за допомогою наземних лазерних сканерів.**

#### Сканування Олександрівської ГЕС

Об'єктом лазерного сканування була Олександрівська ГЕС (укр. Олександрівська ГЕС) - гідроелектростанція, розташована в м Южноукраїнську, Миколаївська область, Україна, на річці Південний Буг. Гребля станції утворює Олександрівське водосховище, яке є, в свою чергу, нижнім водоймищем для Ташлицької ГАЕС. Головне завдання електростанції - підтримка рівня води для Ташлицької гідроакумулюючої станції[12].



Рис. 2.2 Процес знімання Олександрівської ГЕС

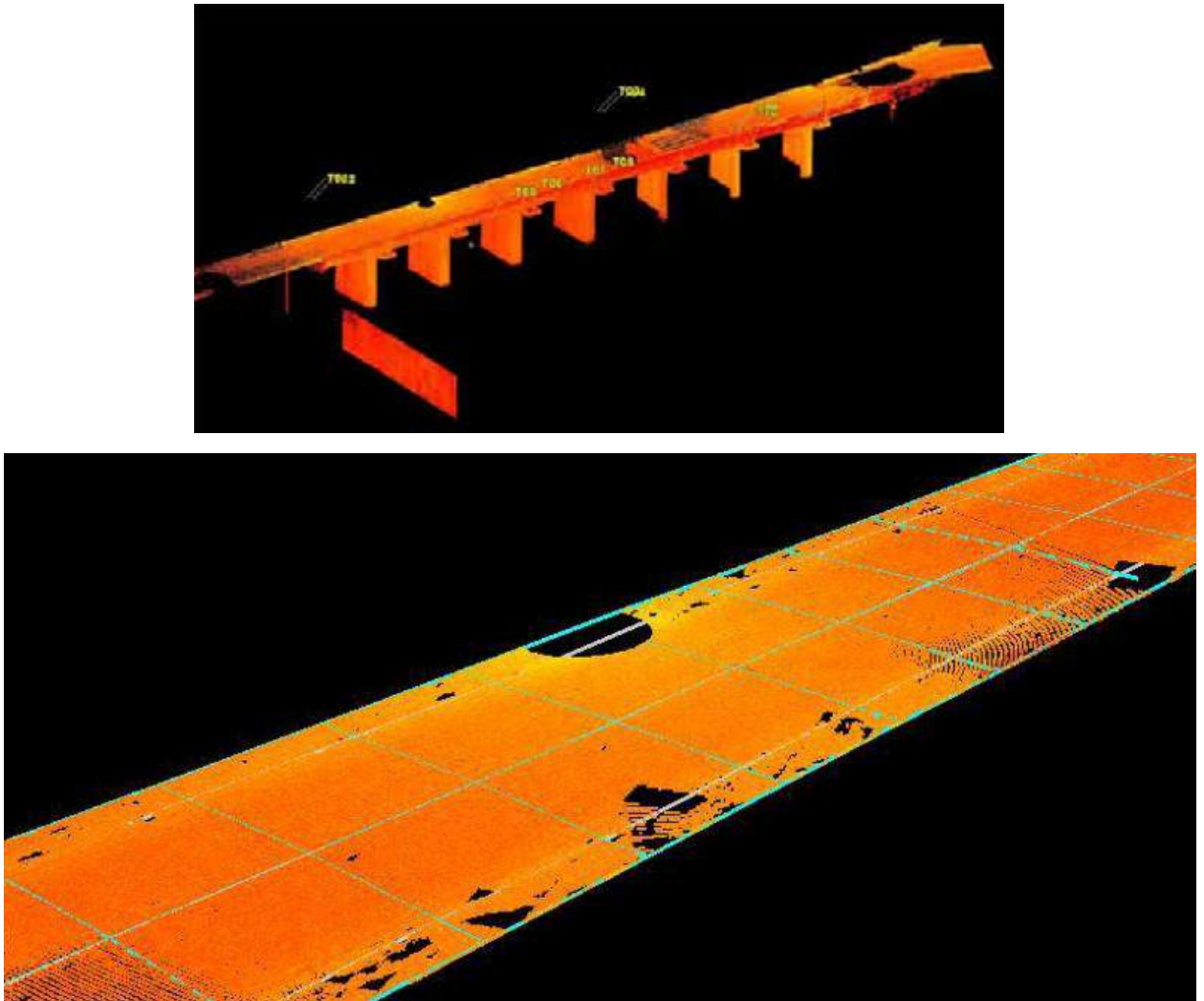


Рис. 2.3 Отримані хмари точок дороги, що проходить над Олександрівською ГЕС

Дорога через Олександрівський гідровузол, на якому належало провести геодезичні вимірювання, сильно завантажена рухомим автотранспортом, а зйомка ГЕС з берегів р. Південний Буг дуже скрутна, що унеможлиблює зробити вимірювання за допомогою стандартних геодезичних інструментів (рейка, тахеометр), не перекриваючи руху автотранспорту і при цьому отримати вичерпну обсяг даних. Тому для проведення геодезичних вимірювань гідровузла був застосований метод наземного лазерного сканування.

Робота проводилася в два етапи. На першому етапі було проведено лазерне сканування. На другому етапі була проведена камеральна обробка даних лазерного сканування.

Польові вимірювання виконувалися шляхом зйомки поверхні ділянок гідровузла зі станцій розташованих на укріплених частинах греблі, знаходяться на оптимальній відстані до гідровузла і, безпосередньо на самому полотні дороги через ГЕС, з областю сканування 50-170 м.

Всього для виконання робіт були зроблені 5 стоянок сканування з них 3 стоянки сканування самого дорожнього полотна і 2 стоянки сканування під шляхопроводом гідровузла.

Крок сканування поверхні полотна дороги по довжині становив 1-3 см, 2-20 мм - під шляхопроводом гідровузла. При скануванні Олександрівського гідровузла було отримано більше 76-ти мільйонів координатних точок.

Камеральна обробка результатів вимірювань повинна забезпечити необхідну повноту даних і технологічність для подальшого практичного використання в системах автоматичного проектування. У процесі проведення камеральної обробки були виконані роботи по зшивання окремих сканів в єдине хмара точок гідровузла і по прив'язці хмари точок до географічних координат за допомогою модуля Cyclone-REGISTER. Максимальна похибка при зшивці сканів склала 11 мм. В результаті була отримана об'єктивна модель гідровузла з багатомільйонною кількістю точок.

Кінцевий результат був представлений:

1. Висотними відмітками по водостоках полотна дороги в текстовому вигляді
2. Висотними відмітками поздовжніх поліліній з обох кінців дороги в місцях прокладки бордюрів і полілінії центру дорожнього полотна в текстовому вигляді
3. поперечного перерізу в файлах формату DXF
4. Схемою габаритів проїжджої частини по полотну дороги гідровузла у вигляді креслення в форматі DXF

5. Схемою визначення прогинів силових балок гідровузла без урахування навантаження у вигляді креслення в форматі DXF

6. Загальною схемою гідровузла у вигляді креслення в форматі DXF

У процесі роботи підтверджена коректність використання технології лазерного сканування для даного напрямку геодезичних робіт, так як в процесі зйомки були отримані вичерпні дані про Олександрівському гідровузлі, які неможливо отримати за допомогою електронного тахеометра. Також в кілька разів скорочується сам процес зйомки за рахунок застосування лазерного сканера Leica ScanStation в порівнянні з використанням тахеометра.

Сканування будинку комендатури м.Києва для створення 3D BIM

Компанія НГЦ виконувала роботи по лазерному скануванню на об'єкті майбутньої реконструкції по вул. Мазепи, 1. Даний об'єкт являє собою 3-х поверховий будинок, яке є архітектурною цінністю м.Києва. В даний момент в будівлі розташовується комендатура Києва та департамент військового архіву України. Будівля має дуже велику кількість приміщень і коридорів. Замовником були надані поверхові планові креслення об'єкту, які істотно полегшили навігацію по будівлі[13].



Рис. 2.4 Будинок комендатури

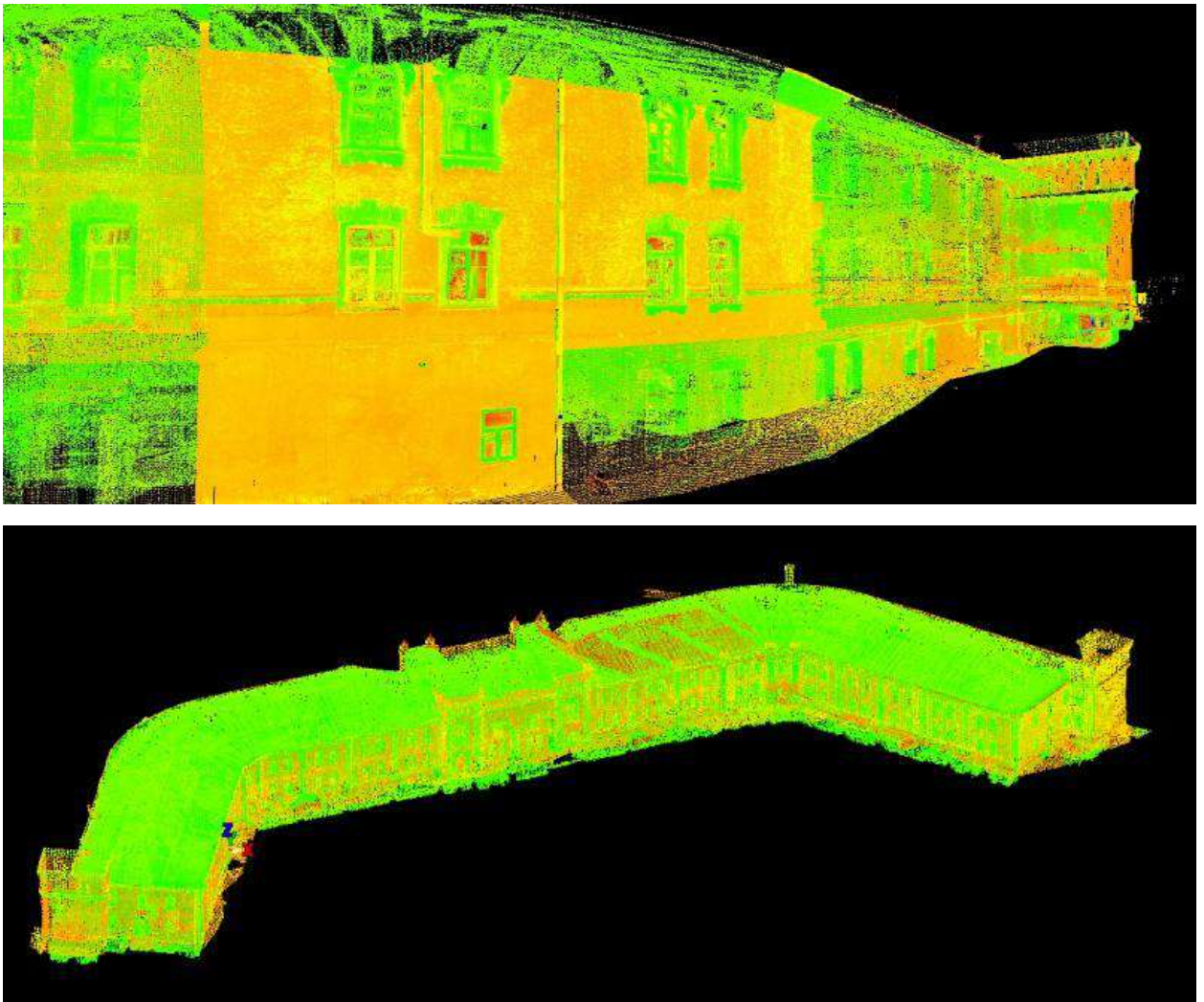


Рис. 2.5 Отримана хмара точок

Одне крило будівлі (приблизно третина) знаходилося в аварійному стані. Додаткове незручність приносив робочий графік архіву, через який доводилося постійно переривати геодезичні роботи на його території, а також неможливість своєчасного доступу до деяких приміщень через відсутність відповідальних за них осіб. Але в цілому всі роботи були здійснені навіть з невеликим випередженням їх графіка виконання.

Геодезичні вимірювання геометрії стін, підлог і стель трьох поверхів і горища даного об'єкта проводилися з використанням лазерного сканера Leica ScanStation, управління процесом сканування проводилося за допомогою програмного забезпечення Cyclone.

Польові вимірювання об'єкта по вул. Мазепи, 1 виконувалися шляхом зйомки геометрії стін, підлог і стель трьох поверхів і горища із заздалегідь підготовлених майданчиків для установки сканера на відстані від 1.5 до 15 метрів від об'єкта зйомки. Крок, що задається при скануванні, становив 20 мм, для максимальної деталізації орендованих об'єктів.

Всього при скануванні внутрішніх приміщень об'єкта було отримано понад 277-ми мільйонів координатних точок з 431-й різної точки стояння сканера.

Результатом ЛЗ внутрішніх приміщень будівлі по вул. Мазепи, 1 є багатомільйонне хмара координатних точок, зшите з хмарию фасаду, отриманим раніше (загальна кількість - понад 300 мільйонів), яке в подальшому було використано для створення креслень фасаду та побудови будівельних розрізів будівлі.

Далі отримане зшите і очищене від шумів хмара точок об'єкта використовувалося як підкладка для створення ВІМ (інформаційної моделі об'єкта) в програмному комплексі Autodesk Revit фахівцями архітектурного бюро «АПТ Дніпро».

Отримані в результаті обробки дані лазерного сканування відіграють важливу роль у збереженні архітектурної пам'ятки м.Києва, а також будуть служити основним матеріалом для реконструкції даного об'єкту. Також ці результати дозволять уберегти аварійну частину від подальшого руйнування.

Сканування старовинної будівлі в самому центрі столиці

Влітку 2013 р компанія НГЦ проводила проект по лазерному скануванню групи нежитлових приміщень першого, другого поверхів, підвалу і тих. поверху, об'єднаних в одне приміщення для розміщення об'єктів торгівлі та громадського харчування по вул. Хрещатик, 48, розташованих в самому центрі Києва[14].

Зовнішній фасад будівлі виходить безпосередньо на проїжджу частину вул. Хрещатик і несе на собі дуже багато об'єктів складної архітектурної форми - колонади, прикраси, ліпнина, старовинна кування на балконах і воротах, та ін.

Також об'єктами сканування були фасади двох сусідніх ліворуч і праворуч будівель, теж мають безлічі об'єктів складної архітектурної форми.

Лазерне сканування фасаду групи проводилося з використанням лазерного сканера Leica ScanStation, управління процесом сканування і пост обробка результатів здійснювалися за допомогою програмного забезпечення Cyclone.



Рис. 2.6 Будівля по вул. Хрещатик

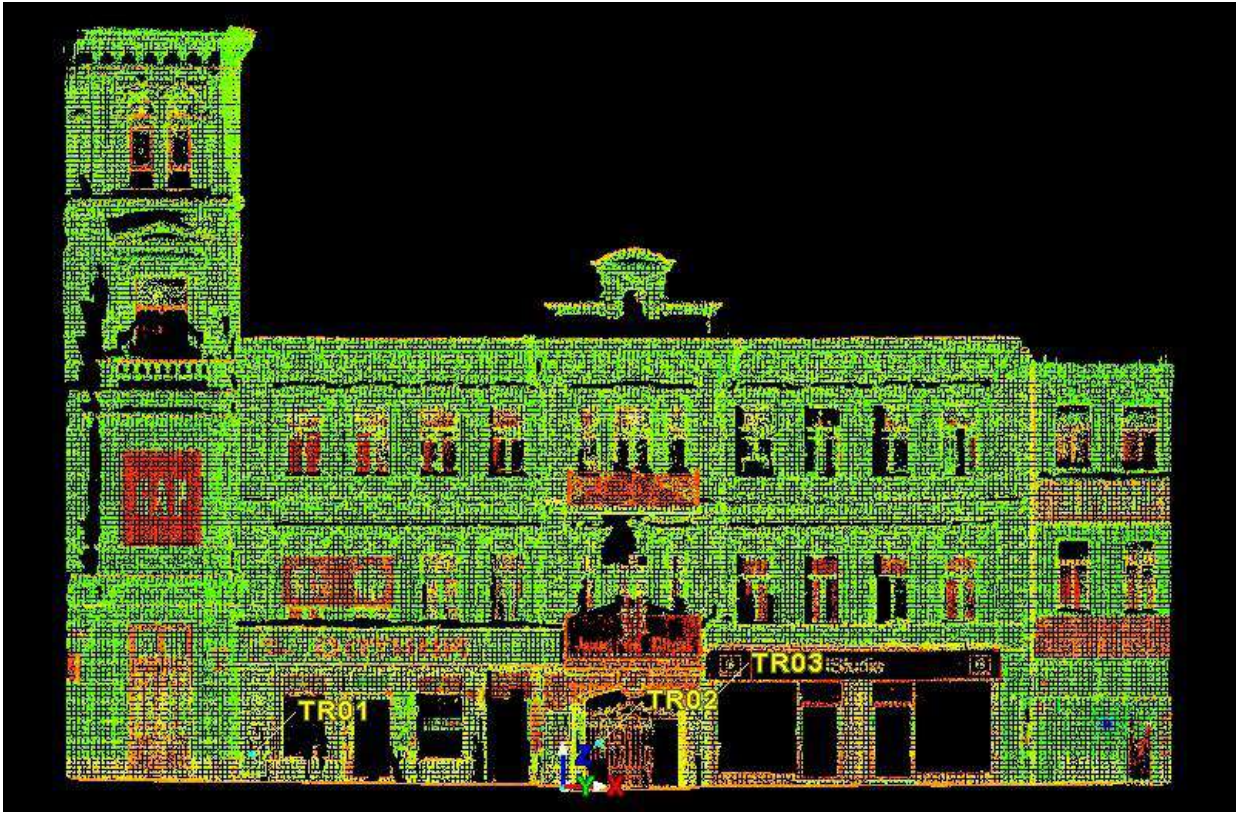


Рис. 2.7 Отримана хмара точок будинку по вул. Хрещатик



Рис. 2.7 Отриманий план фасаду будинку по вул. Хрещатик

Польові вимірювання виконувалися шляхом зйомки поверхні фасаду зі станцій розташованих на укріплених частинах вулиці Хрещатик на відстані 15 - 20 м до фасаду, хоча спочатку передбачалося область сканування 50 - 75 м. В кожен сторону. Але в процесі сканування об'єкта були зроблені коригування області сканування у бік зменшення, викликані насиченістю пішоходів на вулиці, а також наявністю великої кількості припаркованих автомобілів поблизу об'єкта. Крок сканування поверхні фасаду будівель по довжині становив 3 - 5 мм, 1 мм - кутання на балконах. Крайніми межами області сканування фасаду будівель були взяті сегменти прилеглих ліворуч і праворуч будівель шириною 3 м. Всього при виконанні робіт було отримано більше 17-ти мільйонів координатних точок.

У процесі проведення камеральної обробки були виконані роботи по зшивання окремих сканів в єдине хмара точок фасаду, з очищення хмари точок фасадів від перешкод, залишених рухомими пішоходами. В результаті була отримана об'єктивна модель фасадів з багатомільйонною кількістю точок. Векторизація очищеного хмари точок фасаду проводилася в програмному комплексі Autodesk AutoCAD. В результаті був отриманий креслення фасаду будівлі, а також його перетину.

В архітектурних зйомках найголовніше - це створення абсолютно правдоподібного креслення будівлі. У цьому може допомогти лазерне сканування, що дозволяє отримати найбільш достовірні польові дані про складні конструкційних або важкодоступних об'єктах, які неможливо виконати зйомкою традиційними методами - тахеометрами та GPS-приймачами. За рахунок високої швидкості і автоматизації процесу, технологія лазерного сканування призводить до істотного підвищення продуктивності зйомки.

## **Розділ 3. Процес наземного лазерного 3D сканування зруйнованої інфраструктури.**

### **1. Опис наземного лазерного 3D сканера Leica ScanStation C10.**

Leica ScanStation C10 – оптимальне рішення для швидкої лазерної зйомки приміщення – так і далеких відстаней, наприклад, великого промислового об'єкта.

Це імпульсний сканер, з можливістю сканування 50000 вим/сек, з високою дальністю сканування (300 м), підтримкою кутової точності 12".

Висока якість складання робить роботу комфортною в будь-яких складних умовах: захист від пилу та вологи IP54 – не завада для роботи в дощ та в умовах сильної запиленості. А також вам необов'язково постійно перебувати з приладом – керувати сканером можна з Android/iOS смартфона.

Універсальний компактний лазерний сканер Leica ScanStation C10 є одним з найпопулярніших приладів у серії сканерів ScanStation, забезпечуючи найвищу ефективність і продуктивність під час виконання топографічних зйомок. Завдяки новій платформі в одному корпусі тепер об'єднані всі можливі елементи - сканер, панель управління, батареї, відеокамера та жорсткий диск для зберігання даних.

Імпульсна лазерна система гарантує виробництво сканування на відстані до 300 метрів зі швидкістю до 50000 пікселів в секунду, що дозволяє отримувати детальні тривимірні зображення. Поле зору сканера становить 270 по вертикалі і 360 по горизонталі. Вбудована відеокамера високої роздільної здатності забезпечує отримання чітких і детальних реальних зображень, які можна накладати на відскановані хмари точок. Унікальна функція вибору області сканування з відеозображення підвищує зручність сканування[9].

Зазвичай лазерний сканер дозволяє вирішувати лише певне коло завдань і користувачеві доводиться вибирати, працювати на великій відстані на вулиці або сканувати внутрішні приміщення. ScanStation C10 оснащений унікальною оптичною системою з технологією Smart X-Mirror, яка автоматично переводить дзеркало в режим обертання або нахилу в залежності від того, якого розміру область

ви зараз скануєте. Ви легко можете перемикатися з одного режиму в інший, працюючи на великих або малих відстанях. Ця технологія також забезпечує синхронізацію відеокамери з лазерним променем для максимально точного суміщення реального та цифрового зображення[10].

Лазерний сканер Leica ScanStation C10 оснащений великим контрастним екраном із сенсорним керуванням, що позбавляє вас необхідності використовувати в роботі польовий контролер. Найчастіше під час роботи з лазерним сканером результат вимірювань неможливо побачити до прибуття офіс. Лазерний сканер Leica ScanStation C10 дозволяє підключити ноутбук із програмним забезпеченням Cyclone SCAN, завдяки якому ви не тільки можете дистанційно керувати процесом сканування, а й безпосередньо на об'єкті здійснити повноцінний перегляд даних у тривимірному вигляді.



Рис. 3.1 Наземний лазерний сканер Leica ScanStation C10

Таблиця 3.1 Технічні характеристики сканера Leica ScanStation C10

<b>Загальні характеристики:</b>	
Екран	сенсорний
Пам'ять	80 гб (вбудована) + зовнішня USB
<b>Точність:</b>	
Під кутом	12"
Відстань	4 мм
Марки	2 мм, 1 сигма
Моделювання поверхні	2 мм, 1 сигма
<b>Система сканування:</b>	
Швидкість сканування	50 000 пікселів/с
Діапазон вимірів	від 0.1 м до 300 м
<b>Ємність :</b>	
Акумулятор	Внутрішній + зовнішній
<b>Габарити:</b>	
Вага	13 кг
Розміри	23,8 x 35,8 x 39,5 см

## 2. Виконання наземного лазерного 3D сканування.

Об'єктом знімання є електропідстанція, яка на сьогоднішній день є об'єктом критичної інфраструктури, тому в цілях безпеки я не буду описувати місцезнаходження та назву об'єкту.

Можна виділити такі основні етапи наземного лазерного сканування:

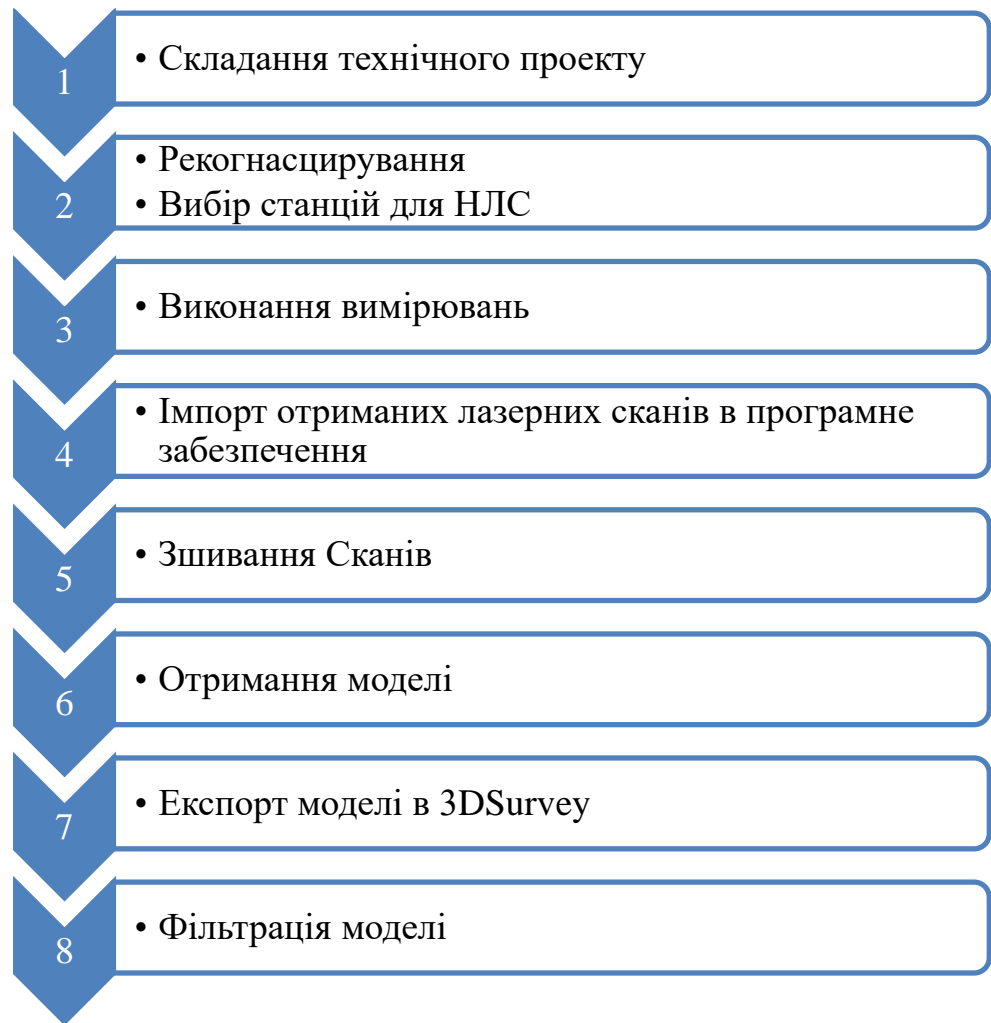


Рис 3.2 Етапи наземного лазерного сканування

Складання технічного проекту являє собою оформлення із замовником договору та технічного завдання на виконання робіт. Договір між виконавцем та замовником є важливим документом, що описує всі аспекти підготовки, виконання та обробки сканування. Його основне завдання — забезпечити ефективність роботи, точність отриманих даних та їх відповідність поставленим цілям. Основні цілі складання технічного проекту

#### 1. Визначення обсягів робіт

- Технічний проект дозволяє точно визначити площу сканування, обсяг необхідних вимірювань та кількість позицій НЛС.

- Це допомагає оцінити витрати часу, ресурсів і матеріалів.

## **2. Планування маршруту сканування**

- Заздалегідь визначаються точки встановлення НЛС, які забезпечують максимальне покриття об'єкта.
- Оптимізація маршрутів зменшує ризик пропуску важливих зон або дублювання робіт.

## **3. Забезпечення точності**

- Технічний проект встановлює вимоги до точності збору даних (наприклад, похибка  $\leq 2$  мм) і роздільної здатності хмари точок.
- Плануються заходи для мінімізації систематичних і випадкових помилок.

## **4. Геоприв'язка та узгодження координат**

- В проекті описується метод визначення контрольних точок та способи їх реєстрації у загальній системі координат (наприклад, використання GNSS-приймачів або тотальної станції).
- Це дозволяє інтегрувати дані НЛС в існуючу геодезичну мережу.

## **5. Безпека виконання робіт**

- Проект враховує всі можливі ризики, пов'язані з роботою на об'єкті (наприклад, нестабільні конструкції, електричні кабелі під напругою).
- Визначаються заходи безпеки, включаючи дистанційне керування НЛС або використання захисного обладнання.

## **6. Економічна ефективність**

- Планування витрат на обладнання, робочий час, транспорт і інші ресурси.
- Забезпечення оптимального співвідношення між затратами та отриманою точністю даних.

## **7. Підготовка до обробки даних**

- Проект визначає формати даних, які будуть отримані, та програмне забезпечення, яке буде використовуватись для обробки.

- Встановлюються вимоги до подальшого моделювання, створення креслень чи звітів.

Перед початком робіт важливо провести рекогносцирування, детально вивчити об'єкт для розробки оптимальної стратегії сканування. Виконується візуальний огляд території для визначення рівня руйнувань. Оглядаються ключові елементи підстанції: трансформатори, розподільчі щити, кабельні лінії. Під час війни на підстанції можуть залишатися боєприпаси, міни, обірвані проводи під напругою. Потрібно отримати дозвіл та пройти інструктаж з техніки безпеки від співробітників підстанції. Визначаються ділянки з можливими тіншовими зонами, де відображення лазера може бути частково блоковане.

Також перед початком знімання потрібно провести планування робіт. Сформувані карту розташування станцій для забезпечення перекриття даних між сканами. Мінімізувати кількість станцій для зменшення часу роботи. Спланувати станції для зон де потрібна висока деталізацією з підвищеною щільністю точок. Заздалегідь враховуються можливі перешкоди для лазерного променя (наприклад, обладнання, дерева, будівлі).

Перед скануванням перевіряється робота лазера, системи зберігання даних та живлення. Виконується калібрування сканера за допомогою вбудованого тестового алгоритму або зовнішніх калібрувальних панелей. Встановлюються параметри сканування: щільність точок, наприклад, для великої ділянки вибирається середня щільність (10–20 точок/см<sup>2</sup>), для детальних зон – висока (50–100 точок/см<sup>2</sup>), роздільна здатність залежить від очікуваної точності (до  $\pm 1-2$  мм).

Проведення сканування.

Особливу увагу потрібно приділити місцю встановлення сканера, його, як правило, встановлюють у місцях, де забезпечується максимальний огляд об'єкта. Уникаються зони з перешкодами (наприклад, дерева, обладнання). Далі прилад фіксується на тринозі, а його положення вирівнюється за допомогою електронного рівня.

Вмикаємо сканер і його базові системи проходять самотестування перевірка лазера, обертального механізму, системи зберігання даних. На екрані з'являється інтерфейс управління, створюємо новий проект, вказуємо потрібні налаштування та можемо починати сканувати. Встановлюється кут огляду, наприклад,  $360^\circ$  по горизонталі,  $270^\circ$  по вертикалі. Щільність точок встановлюється залежно від необхідної деталізації, наприклад, низька щільність для загальної території, висока для деталей. Роздільна здатність задається в межах від 1 мм до кількох сантиметрів, залежно від цілей роботи. Встановлюється необхідність використання кольорових даних у разі потреби активується камера сканера для отримання текстурованих даних.

Після запуску сканера лазерна головка обертається навколо своєї осі, випускаючи імпульси або фазові промені для вимірювання відстані до кожної точки. Лазерний промінь відбивається від об'єкта, і прилад фіксує час польоту. Кожна точка реєструється у вигляді координат (x, y, z) у відносній системі координат НЛС.

Для забезпечення точного вирівнювання хмар точок між різними станціями сканування скануються контрольні точки (маркери, розташовані на об'єкті). Для високої точності використовуються сферичні або плоскі маркери із високим коефіцієнтом відбивання.

По завершенні сканування хмара точок зберігається у внутрішній пам'яті приладу. Файли зазвичай зберігаються у форматах, які підтримують подальшу обробку (.e57, .ptx, .las). Далі можна переміщувати НЛС на наступну станцію, переміщення потрібно виконувати за принципом тахеометричного ходу, щоб забезпечити максимальне перекриття сканів. На новій позиції процес повторюється (встановлення, вирівнювання, сканування).

Після завершення сканування всіх запланованих точок оператор перевіряє чи всі частини об'єкта покриті, а також чи забезпечено достатнє перекриття між сусідніми сканами. Усі дані експортуються на зовнішній носій (USB-диск, SD-

карта) або передаються на комп'ютер через Wi-Fi. Сканер вимикається, і проводиться базова перевірка стану приладу, очищення лазерного блока від пилу, перевірка стану акумулятора.

Процес сканування завершується отриманням детальної хмари точок, яка охоплює весь об'єкт. Дані готові до подальшої обробки, включаючи вирівнювання сканів, фільтрацію, класифікацію та створення тривимірної моделі.

### Обробка даних

Обробка даних після наземного лазерного сканування (НЛС) — це багатоступеневий процес, який перетворює хмару точок, отриману під час сканування, на зрозумілу, інтегровану та корисну інформацію. Цей етап є критично важливим для досягнення точності, структурованості та придатності даних для подальшого використання.

Для обробки даних використовують спеціалізоване програмне забезпечення, наприклад, Leica Cyclone, Trimble RealWorks, Autodesk Recap, Faro Scene. В першу чергу імпортуються хмари точок з кожної станції НЛС в програмне забезпечення. Далі дані з усіх станцій потрібно скомпонувати в одну модель. Зазвичай використовуються такі методи реєстрації:

**Автоматична реєстрація:** Використання природних або штучних маркерів (сферичні мішені, плоскі мітки).

**Ручне вирівнювання:** Використання візуального збігу характерних точок або площин.

**Алгоритми вирівнювання:** Метод "найменших квадратів" для мінімізації похибок між сканами.

Результатом реєстрації є єдина хмара точок.

Далі потрібно провести очищення даних та видалення зайвих точок

Видаляються точки, що виникають через відбиття від пилу, диму, дощу або сонячного світла. Прибираються тимчасові об'єкти (люди, транспорт, тварини).

Далі виконується редукція даних. Потрібно зробити прорідження - зменшення щільності хмари точок у місцях, де висока деталізація не потрібна (наприклад, однорідні площини), та компресія - збереження даних у меншому розмірі без втрати ключової інформації. Виконується сегментація - розділення хмари точок на окремі групи відповідно до об'єктів (наприклад, стіни, опори, кабелі), та класифікація - розподіл точок за категоріями (наприклад, земля, рослинність, конструкції). На основі очищених даних створюється тривимірна модель об'єкта. Проводиться текстурування - застосування кольорових даних для покриття моделі текстурою, що відповідає реальним умовам. Далі експортуємо дані для подальшої інтеграції в інші формати.

Формат подачі результатів замовнику може бути декількох типів:

Хмара точок: Повна хмара точок у загальноприйнятому форматі (.las, .e57).

2D-чертежі: Генерація ортографічних проєкцій (плани, фасади, перерізи).

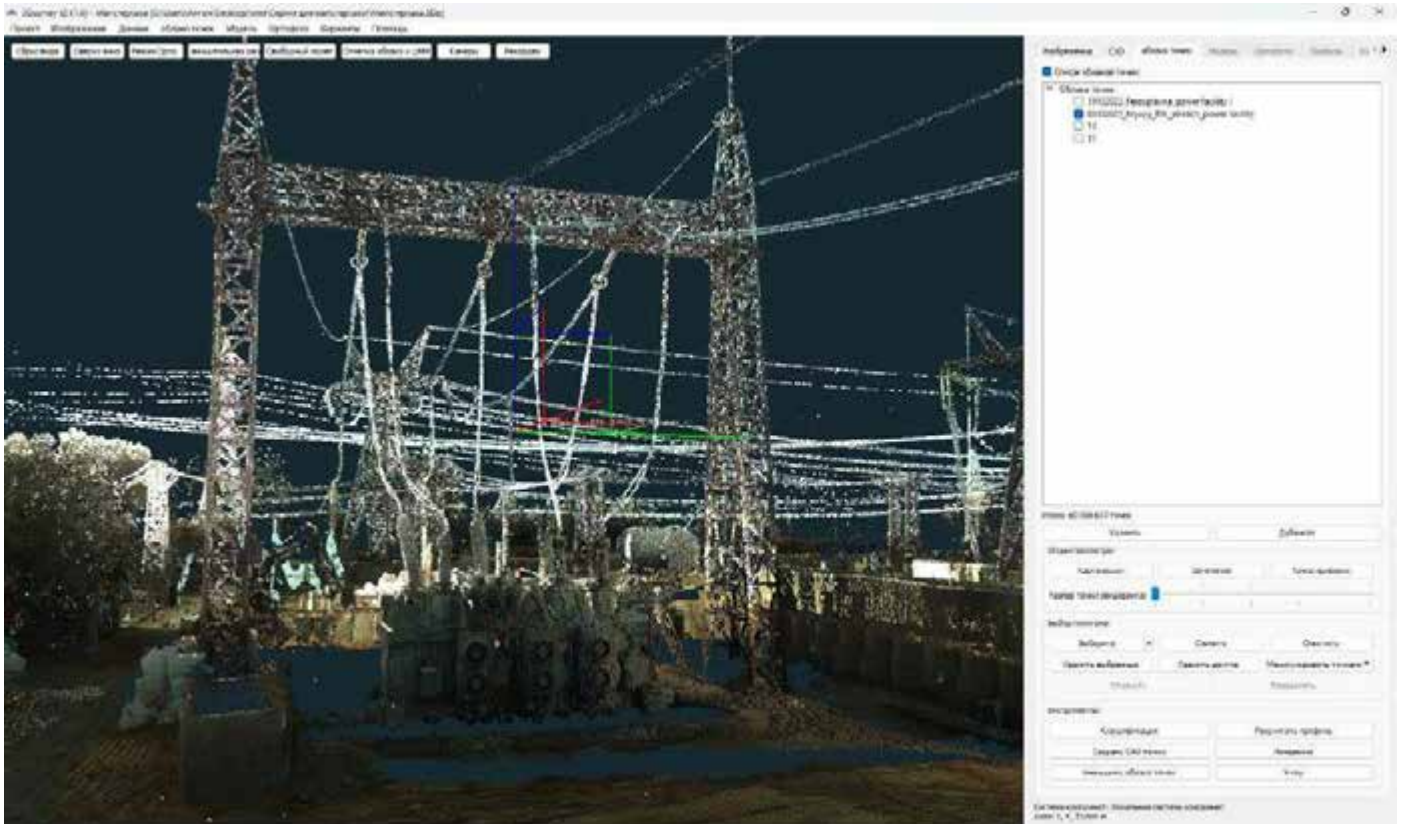
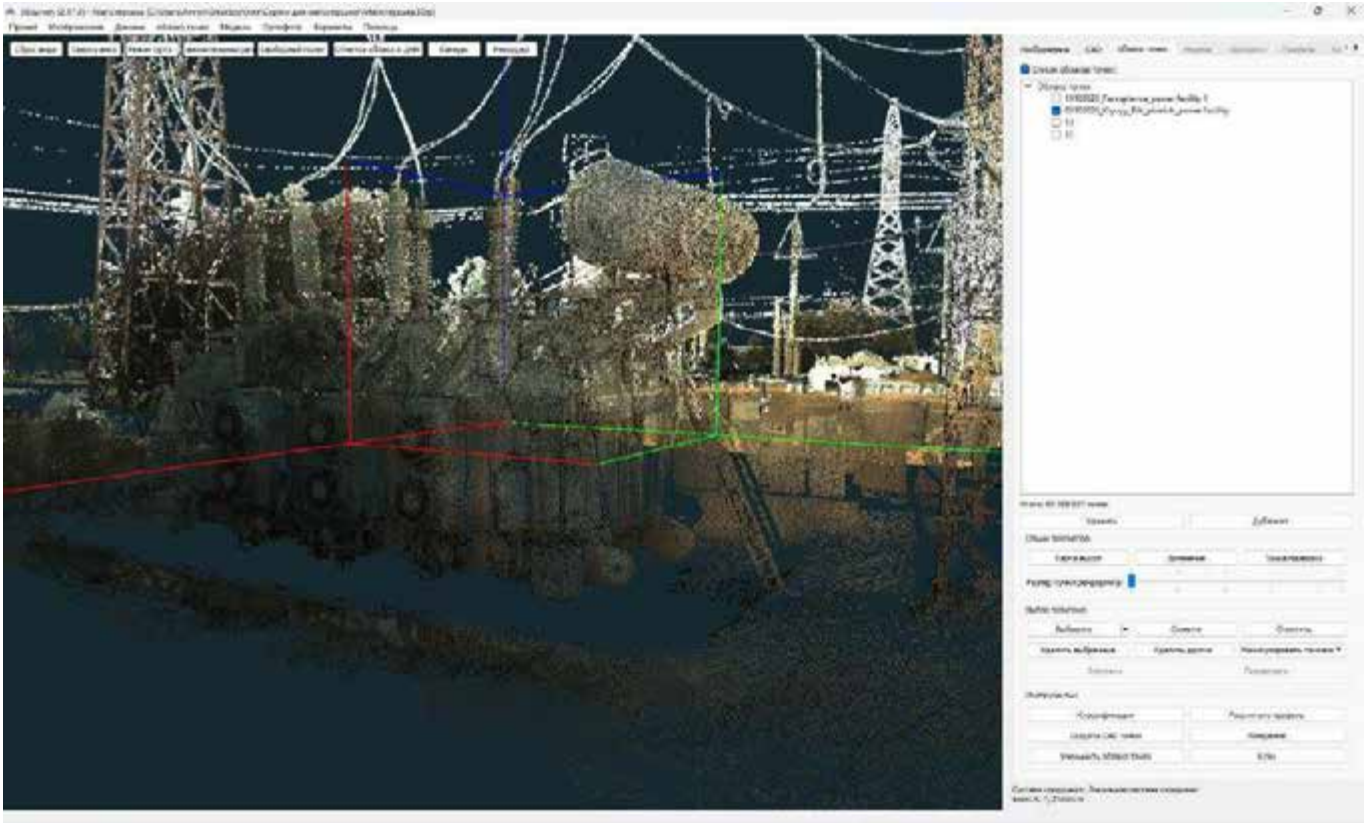
3D-моделі: Для інтеграції в проєктні роботи або віртуальні аналізи.

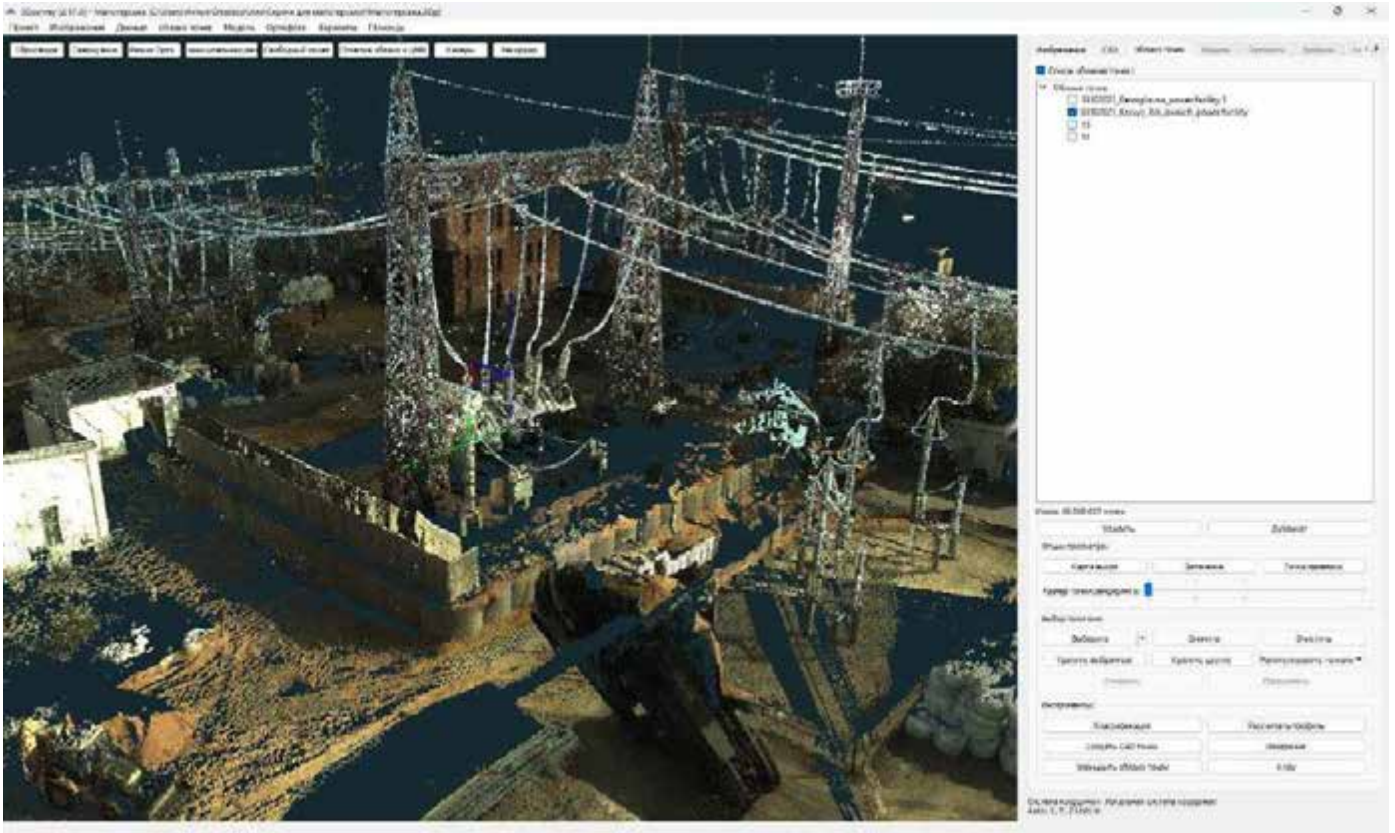
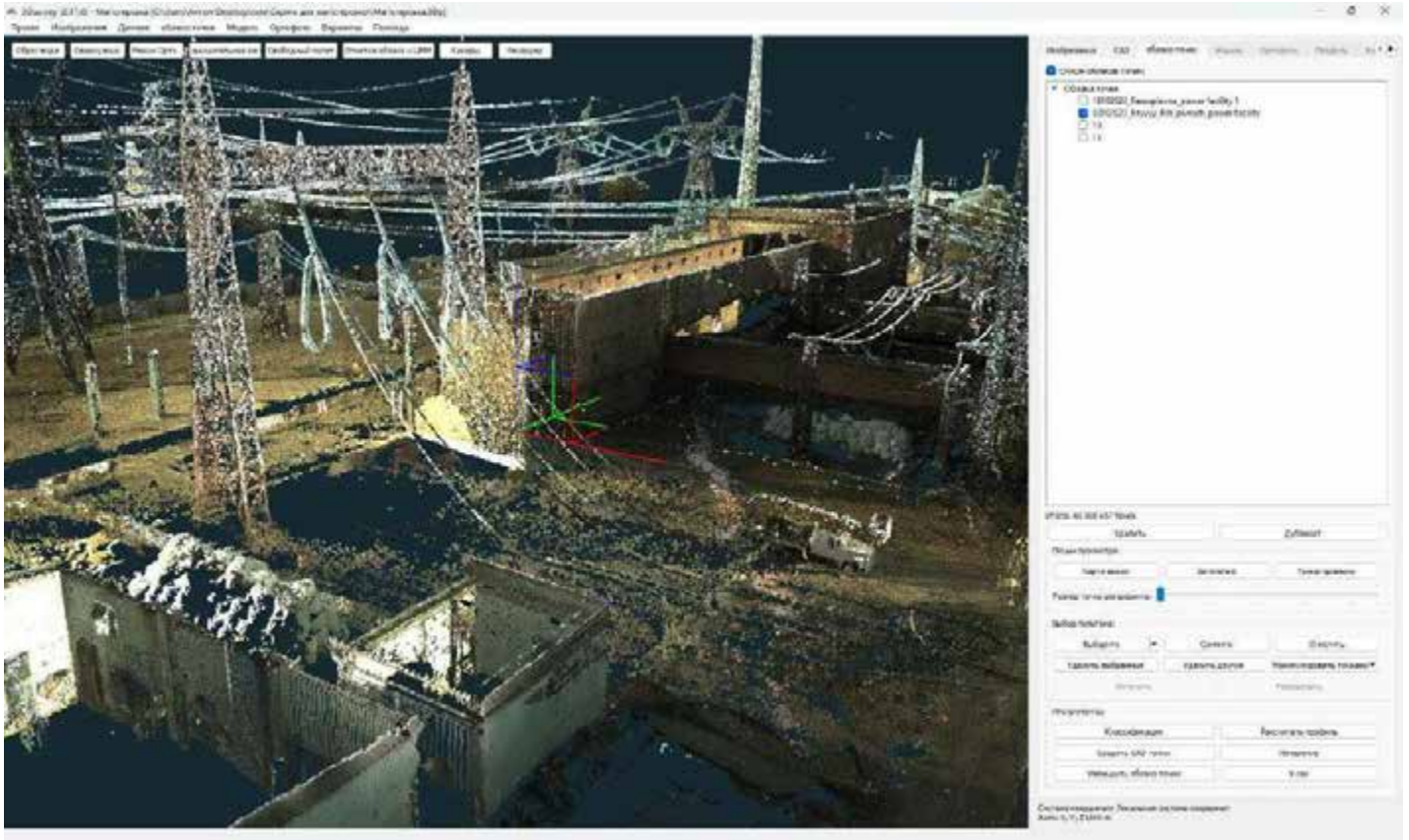
Також замовнику надаються рекомендації щодо подальшого використання результатів, наприклад, реконструкція об'єкта, технічний моніторинг.

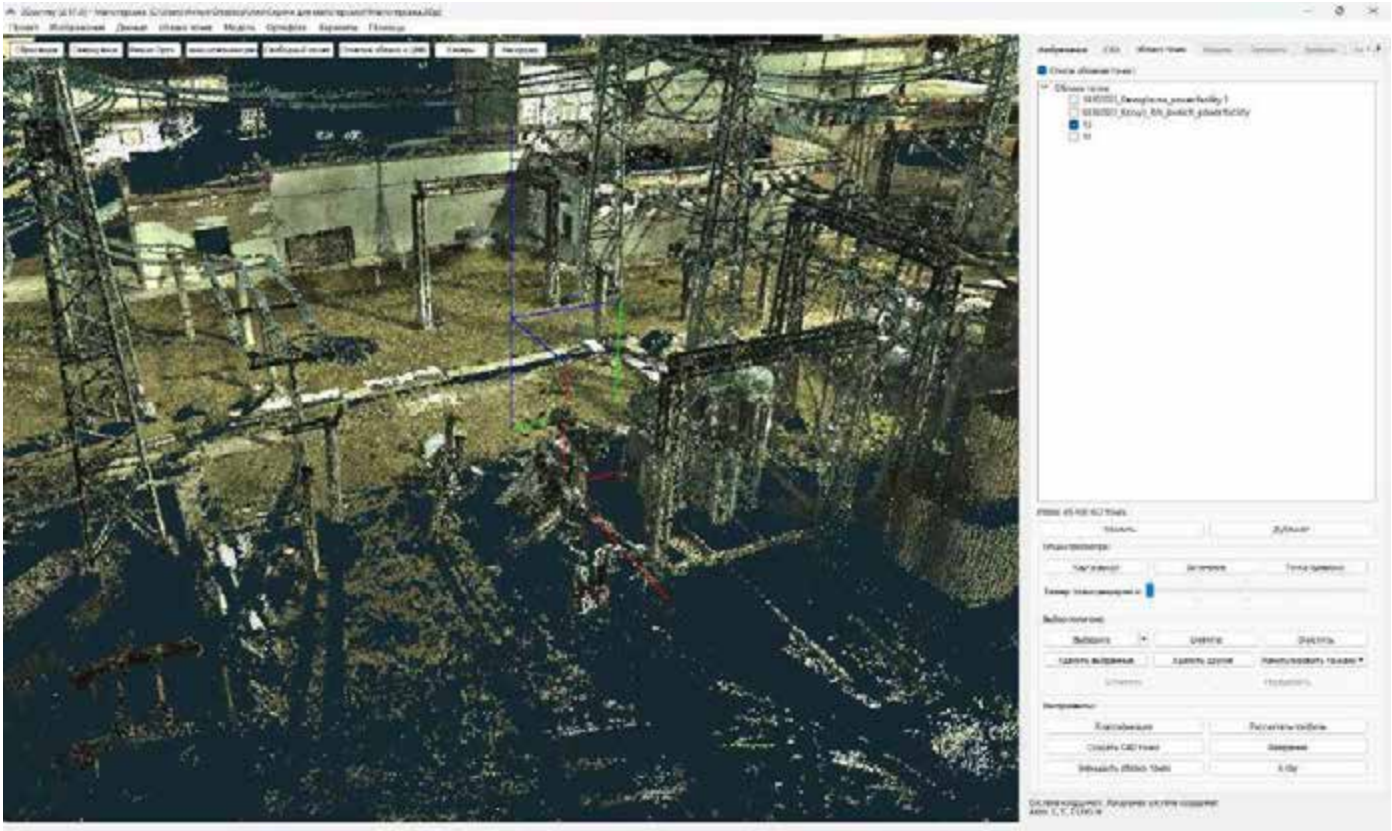
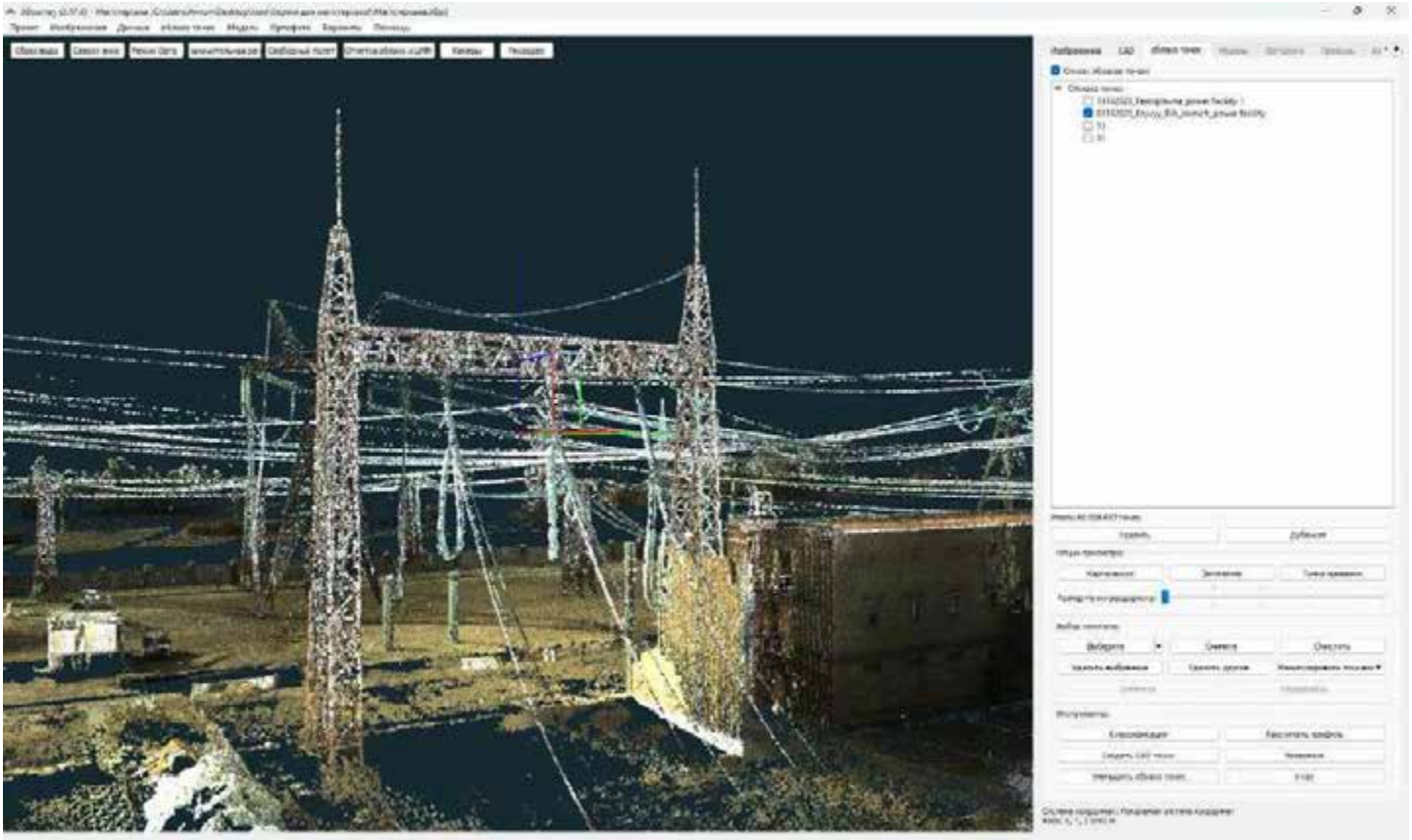
### **3. Аналіз даних для фіксації зруйнувань електропідстанції.**

За допомогою отриманих даних ми можемо зробити геометричний аналіз, здійснюється вимірювання фізичних параметрів об'єкта: точні розміри руйнувань, глибина вибоїн і тріщин, зміщення конструкцій відносно проєктної осі. Виконується оцінка пошкоджень, аналіз зон із втратами матеріалів (метал, бетон), ідентифікація потенційно небезпечних конструкцій, що можуть обвалитися.

Отриматриану після обробки хмару точок ми можемо відкрити в програмному застосунку 3DSurvey, за допомогою якого ми можемо провести аналіз руйнувань.







А ось так це виглядає на місцевості:



Після виконання основних етапів обробки даних лазерного сканування та побудови моделей необхідно провести детальний аналіз отриманих результатів. Цей етап є надзвичайно важливим для оцінки масштабу руйнувань, визначення причин пошкоджень, а також для розробки подальших планів з відновлення електропідстанції. За допомогою побудованих 3D-моделей та візуалізацій проводиться виявлення зруйнованих, деформованих або пошкоджених частин об'єкта. Це включає в себе:

Пошкодження стін, даху, фундаменту.

Обрушення або зміщення опорних конструкцій.

Пошкодження електричних компонентів, таких як трансформатори, комутаційні апарати, кабелі.

Також можна провести кількісну оцінку пошкоджень. Зміщення точок відносно початкової позиції (наприклад, зміщення вертикальних опор або деформація конструкцій). Визначення тріщин, вм'ятин, обрушень та інших дефектів. Оцінка відсутності окремих елементів конструкції, що могли бути зруйновані або зникли (наприклад, частини даху, що обрушилися).

Ще одним аспектом аналізу є розробка стратегії відновлення підстанції, визначення необхідних заходів для безпеки та відновлення її функціональності. Визначення критичних пошкоджень:

Ідентифікація тих частин підстанції, які потребують негайного відновлення для забезпечення безперервної роботи. Це можуть бути:

Пошкодження основних конструктивних елементів (опор, фундаментів).

Порушення в роботі електричних систем (пошкодження трансформаторів, вимикачів, кабельних каналів).

Прогнозування термінів відновлення:

На основі масштабу пошкоджень і складності ремонту розробляються рекомендації щодо часу, необхідного для відновлення функціональності.

Ресурсне забезпечення:

Визначення необхідних матеріалів та ресурсів для ремонту. Це може включати:

Матеріали для будівельних та інженерних робіт (бетон, сталь, електричні компоненти).

Техніка і механізми для відновлення пошкоджених конструкцій (крани, підйомники, важка техніка).

Безпека під час відновлення:

Прогнозування можливих небезпек при проведенні ремонтних робіт у пошкоджених зонах. Рекомендуються заходи для забезпечення безпеки робітників, наприклад:, моніторинг стабільності конструкцій, обмеження доступу до небезпечних зон.

Ці дані допомагають у прийнятті стратегічних рішень щодо відновлення роботи підстанції, що, в свою чергу, гарантує ефективне та безпечне відновлення її функціональності.

## Висновки

У магістерській роботі проведено дослідження щодо використання наземного лазерного сканування (НЛС) для фіксації зруйнувань інфраструктури на прикладі електропідстанції, що зазнала руйнувань внаслідок бойових дій. Одержані результати підтвердили ефективність НЛС як сучасного інструменту для отримання високоточних, детальних даних про стан об'єктів, зокрема у випадках складних і пошкоджених споруд, де традиційні методи обстеження можуть бути недостатньо точними або небезпечними.

Наземне лазерне сканування забезпечує отримання високоточних хмар точок з просторовою роздільною здатністю, достатньою для детального аналізу пошкоджень інфраструктури. Використання цієї технології дозволяє зафіксувати всі деталі стану об'єкта, включаючи тріщини, деформації, зміщення конструктивних елементів та інші дефекти.

Лазерне сканування мінімізує необхідність фізичного доступу до пошкоджених або небезпечних зон об'єкта. Це знижує ризики для операторів та забезпечує ефективне виконання обстеження навіть в умовах загрози подальшого руйнування.

Отримані дані НЛС дозволяють створювати тривимірні моделі, які точно відображають геометрію об'єкта. Такі моделі слугують основою для подальшого аналізу, оцінки обсягів руйнувань і візуалізації стану об'єкта. Вони також можуть використовуватися для підготовки технічної документації та юридичних експертиз.

Використання хмар точок дає змогу виконувати детальний аналіз структурних пошкоджень із використанням спеціалізованого програмного забезпечення. Це включає сегментацію пошкоджених ділянок, розрахунок обсягів матеріалів, що потребують заміни, та оцінку ступеня небезпеки для конструкцій.

Дані НЛС сприяють ефективному плануванню робіт із відновлення, дозволяючи: визначити пріоритетні зони відновлення, розрахувати обсяги

необхідних матеріалів і ресурсів, прогнозувати витрати та тривалість робіт, забезпечити контроль за виконанням відновлення шляхом порівняння проміжних результатів з еталонними даними.

Отримані дані можуть бути інтегровані в сучасні інформаційні системи, такі як BIM (Building Information Modeling) та GIS (геоінформаційні системи). Це відкриває нові можливості для створення комплексних цифрових моделей пошкоджених об'єктів та їхнього подальшого моніторингу.

Розроблений у роботі методологічний підхід до використання НЛС може стати основою для створення стандартів фіксації та аналізу пошкоджень інфраструктури. Зокрема, він може бути адаптований для використання у сфері аварійного реагування, реконструкції пошкоджених об'єктів і в юридичній практиці для оцінки збитків.

Загалом, проведене дослідження підтвердило, що застосування наземного лазерного сканування для фіксації зруйнувань інфраструктури, зокрема електропідстанцій, є не тільки ефективним, але й незамінним інструментом. TLS дозволяє швидко, безпечно та точно оцінити масштаби пошкоджень, отримати дані для їх фіксації та створення моделей, що значно полегшує процес планування і виконання відновлювальних робіт. Результати цього дослідження можуть бути використані для розробки методичних рекомендацій з обстеження пошкодженої інфраструктури та створення стандартів використання лазерного сканування у відновлювальних роботах.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Грабченко А.І., Доброскок В.Л. Теорія 3D моделювання: навч. посібн. – Х.: НТУ "ХП", 2009. – 230 с.
2. Дишлик О. Марков С. Тревого І. Підхід до побудови тривимірних моделей складних просторових об'єктів при комплексному використанні технологій лазерного сканування та фотограмметрії // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва: Збірн. наук. праць. – Львів. – Вип.2 (16). – 2008. –С. 101 – 106.
3. Дорожинський О. Л. Наземне лазерне сканування в фотограмметрії: навч. посібн. Львів: Вид-во Львівської політехніки, 2014. – 96 с.
4. Рой Д. Н. Досвід застосування методу наземного лазерного сканування для робіт у галузі історико-культурної спадщини // Геопрофі. №2. - 2007. - С. 20-23.
5. Наземне лазерне сканування [Текст]: монографія / В. А. Середович, А. В. Комісаров, Д. В. Комісарів, Т. А. Широкова. □ Новосибірськ: СМДА, 2009. 261 с.
6. Тревого І., Баландюк А., Григоращ А. Аналіз технологічних можливостей сучасних наземних лазерних сканерів // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. – Вип. І(19). – 2010. – С. 170-176.
7. 3D Modeling and metric analysis in architectural heritage: photogrammetry and laser scanning / М. Caprioli и др. // Procs. 6th Conference on Optical 3-D Measurement Techniques, PP. 206–213, Zrich, Switzerland, September 22–25, 2003.
8. Laser scanning and modeling – industrial and architectural application/ М. Mettenleiter и др. // Procs. 6th Conference on Optical 3-D Measurement Techniques, PP. 252–259, Zurich, Switzerland, September 22–25, 2003.
9. URL: <https://systemnet.com.ua/scaner-leica-scanstation-c10-ru/#parametry>

10. URL: <https://www.leica.kiev.ua/pdf/leica-scanstation-c10.pdf>
11. Laser scanning and modeling – industrial and architectural application/ M. Mettenleiter и др. // Procs. 6th Conference on Optical 3-D Measurement Techniques, PP. 252–259, Zurich, Switzerland, September 22–25, 2003.
12. URL: <https://ngc.com.ua/ua/info/skanirovaniye-aleksandrovs koy-ges.html>
13. URL: <https://ngc.com.ua/ua/info/skanirovaniye-zdaniya-komendatury-g-kiyeva-dlya-sozdaniya-3d-bim.html>
14. URL: <https://ngc.com.ua/ua/info/starinnoye-zdaniye-v-tsentre-stolitsy.html>