

Київський національний університет імені Тараса Шевченка

Географічний факультет

Кафедра геодезії та картографії

**ЛАЗЕРНЕ СКАНУВАННЯ В ІНЖЕНЕРНІЙ ГЕОДЕЗІЇ: СТАН ТА  
ПЕРСПЕКТИВИ**

Галузь знань 19 – “Архітектура та будівництво”

Спеціальність 193 – “Геодезія та землеустрій”

Освітня програма – “Землеустрій та кадастр”

Кваліфікаційна робота магістра  
студента 2-го курсу магістратури  
Пишногуба Владислава Віталійовича  
Науковий керівник –  
доцент, кандидат технічних наук  
Гончаренко Олександр Степанович

Допущено до захисту:

Протокол засідання кафедри № \_\_\_\_\_ від “ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2025 року

Завідувач кафедри

проф. Даценко Л. М.

Київ 2025

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка 80 сторінок, 10 рисунків, використано 43 літературних джерела, 5 таблиць.

В роботі розглянуто технології лазерного сканування в інженерній геодезії та перспективи їх розвитку.

Завдяки лазерному скануванню інженерно-геодезичні роботи пришвидшуються в рази. За допомогою спеціального лазерного сканера можна виконати будь-які завдання інженерної геодезії за кілька годин, в той час, як традиційними методами вимірювальні геодезичні роботи тривали б не менше тижня.

Об'єкт дослідження. Технології лазерного сканування в інженерній геодезії.

Предмет дослідження. Особливості роботи лазерних сканерів при вирішенні завдань інженерної геодезії.

Метою роботи є аналіз розвитку технологій лазерного сканування в інженерній геодезії.

## ЗМІСТ

<b>ВСТУП</b> .....	<b>5</b>
<b>Розділ 1. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ТЕХНОЛОГІЇ ЛАЗЕРНОГО СКАНУВАННЯ</b> .....	<b>7</b>
<b>1.1. Історія розвитку лазерного сканування</b> .....	<b>7</b>
<b>1.2. Види лазерного сканування</b> .....	<b>10</b>
<b>1.3. Прилади для лазерного сканування</b> .....	<b>12</b>
<b>1.3.1 Прилади наземного лазерного сканування</b> .....	<b>13</b>
<b>1.3.2 Прилади мобільного лазерного сканування</b> .....	<b>16</b>
<b>1.3.3 Прилади повітряного лазерного сканування</b> .....	<b>18</b>
<b>1.4. Сфери застосування</b> .....	<b>22</b>
<b>1.5. Як допомагає лазерне сканування в топографічних зйомках</b> .....	<b>23</b>
<b>1.6. Порядок створення 3D-моделей об'єктів та ландшафтів</b> .....	<b>25</b>
<b>1.7. Програмне забезпечення для здійснення обробки даних лазерного сканування</b> .....	<b>28</b>
<b>1.8. Порівняльний аналіз популярного програмного забезпечення для лазерного сканування</b> .....	<b>32</b>
<b>1.9. Інтеграція лазерного сканування з ГІС-технологіями та BIM-моделюванням</b> .....	<b>34</b>
<b>ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1</b> .....	<b>39</b>
<b>Розділ 2. ПЕРЕВАГИ, НЕДОЛІКИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ЛАЗЕРНОГО СКАНУВАННЯ В ІНЖЕНЕРНІЙ ГЕОДЕЗІЇ</b> .....	<b>41</b>
<b>2.1. Переваги лазерного сканування у порівнянні з традиційними методами геодезії</b> .....	<b>41</b>

2.2. Технологічні особливості використання методів лазерного сканування в будівництві та проектуванні інфраструктурних проєктів.....	44
2.3. Недоліки лазерного сканування .....	47
2.4. Перспективи розвитку технологій лазерного сканування.....	52
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2 .....	55
Розділ 3. ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ ЛАЗЕРНОГО СКАНУВАННЯ.....	57
3.1. Лазерне сканування сходів для подальшого проектування скляного огороження .....	57
3.2. Етапи лазерного сканування сходів .....	61
3.3. Результати лазерного сканування сходів .....	65
3.4. Проблеми під час сканування скляних поверхонь та під час виготовлення кріплень до них .....	67
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3.....	70
ВИСНОВКИ... ..	72
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....	74

## ВСТУП

Лазерне сканування відноситься до молодих дисциплін, які входять в структуру інженерної геодезії. Інженерно-геодезичні роботи мають велике значення для розвитку ринку геодезичних робіт. Інженерна геодезія вивчає напрямки застосування та розробки топографо-геодезичних методів та приладдя в інженерно-будівельному виробництві з метою проведення вимірювань на поверхні землі з метою пошуків, вимірювання деформацій, проектування та будівництва інженерних споруд: доріг, каналів, трубопроводів, мисів, тунелів, аеропортів тощо.

Лазерне сканування здійснюється переважно за допомогою 3D-моделювання. 3D-сканування – є процесом перетворення координат точок реальних об'єктів з метою отримання їх полігональних моделей. Це дасть можливість в подальшому проводити модифікації карт в спеціальних геодезичних програмах для створення кінцевої і більш точної моделі. За допомогою даних лазерного сканування можна побудувати тривимірні моделі та сучасні топографічні плани.

**Актуальність теми.** За допомогою лазерного сканування можна вирішити досить багато завдань. Цим методом активно користуються всі науково розвинені країни вже більше 10 років. В Україні лазерне сканування в інженерній геодезії тільки починає розвиватися. Завдяки лазерному скануванню інженерно-геодезичні роботи пришвидшуються в рази. За допомогою спеціального лазерного сканера можна виконати будь-які завдання інженерної геодезії за кілька годин, в той час, як традиційними методами вимірювальні геодезичні роботи тривали б не менше тижня.

**Мета дослідження.** Аналіз розвитку технологій лазерного сканування в інженерній геодезії.

В ході виконання роботи були поставлені наступні **завдання:**

1. Опрацювати літературні джерела та останні дослідження в сфері лазерного сканування.

2. Проаналізувати існуючі методи лазерного сканування.
3. Порівняти методи опрацювання цифрових тривимірних моделей.
4. Ознайомитися з програмним забезпеченням, за допомогою якого здійснюється лазерне сканування.
5. Виявити переваги та недоліки лазерного сканування.
6. Проаналізувати перспективи розвитку технологій лазерного сканування.

**Об'єкт дослідження.** Технології лазерного сканування в інженерній геодезії.

**Предмет дослідження.** Особливості роботи лазерних сканерів при вирішенні завдань інженерної геодезії.

**Методи дослідження.** Монографічний, статистичний, літературний, абстрактно-логічний, порівняльний.

**Наукова новизна.** Проаналізовано розвиток лазерного сканування в інженерній геодезії та розглянуто способи вдосконалення технологій лазерного сканування, зокрема із застосуванням БЛПА. Розглянуто можливу інтеграцію технологій лазерного сканування з ВІМ та ГІС системами.

**Практичне значення.** Дані роботи можуть бути використані для подальших досліджень в сфері інженерної геодезії та для вдосконалення існуючих методів лазерного сканування.

**Структура роботи.** Робота складається зі вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел. Загальний обсяг роботи становить 79 сторінок.

# Розділ 1. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ТЕХНОЛОГІЇ ЛАЗЕРНОГО СКАНУВАННЯ

## 1.1. Історія розвитку лазерного сканування

Технології лазерного сканування виникли не так давно. Активне використання таких пристроїв розпочалося в кінці ХХ століття. Перший прототип лазерного сканера з'явився в 1960-х. Тоді в нього було мінімум можливостей, але пристрій був першим справжнім тривимірним сканером.

Пристрої, що призначені для сканування, отримали перші суттєві вдосконалення в 1980-х роках. Тоді їх вже оснащували джерелами затемнення, білого світла та лазерами. Завдяки такому прориву, вдалося збільшити «захоплення» об'єктів. Тоді ж виникли і контактні датчики. Сьогоднішні 3D сканери мають різноманітні характеристики. Ці пристрої детально досліджують фізичні об'єкти, і після сканування створюються точні цифрові моделі цих об'єктів.

Кожен вид 3D сканера має різну технологію сканування. Відстань до об'єкта з різних ракурсів цей сканер вимірює за допомогою лазера та вбудованих камер. Вся інформація, яка отримана в процесі лазерного сканування передається на портативний комп'ютер, і в результаті, на екрані оператора з'являється готова цифрова модель об'єкта в 3D форматі [1, с. 24-25].

Сучасні лазерні сканери використовуються як для побутових, так і промислових потреб. Вони корисні в таких галузях: створення комп'ютерних ігор, кіноіндустрія, дизайн, виробництво, медицина, інженерна геодезія тощо. Сканери відрізняються не тільки за характеристиками, але й за принципами роботи. Розрізняють стаціонарні та мобільні моделі. Стаціонарні зручніше використовувати якщо поруч можливість підключити до електромережі або до додаткових джерел живлення (автомобільних акумуляторів, інверторів,

павербанків тощо). Мобільний пристрій зручний тим, що його можна зручно переміщувати та проводити сканування великогабаритних та важкодоступних об'єктів. Вимірювання цими пристроями доступне під будь-якими кутами. Ці пристрої можна під'єднувати і до інших гаджетів (планшет, смартфон, плазмовий телевізор, ПК, ноутбук). Зараз виробники пішли іще далі та змогли створити спеціальні програми для 3D сканування, які можна завантажити на смартфон.

Сканери використовуються все частіше, оскільки це пришвидшує основні види робіт. Сучасні моделі здатні провести вимірювання мільйонами точок на секунду. Головне що технології 3D сканування дозволяють збільшити точність та швидкість вимірювань в рази. Спочатку при скануванні утворюється хмара точок, а потім все це переростає в готове зображення об'єкта. Розрізняють 3 типи сканерного обладнання:

- Імпульсні сканери (TOF) – вони обчислюють відстань до досліджуваного об'єкта;
- Фазові сканери – дані отримують за допомогою визначення фазової різниці між надісланими та отриманими сигналами;
- Триангуляційні 3D сканери – вони працюють за принципом трикутника, тобто робочим механізмом є взаємодія трьох точок: випромінювача, об'єкта та приймача сигналу [2, С. 66].

Залежно від цілей виділяють 3 види лазерного сканування:

- Наземне – проводиться сканування складних промислових споруд та будується ортофотоплан.
- Мобільне лазерне сканування застосовують для моніторингу залізниць, автомобільних шляхів і мостів, а також лінійних предметів: трубопроводів, ліній електропередач тощо. Щоб провести сканування цим методом, потрібно використовувати машину, в якій встановлений сканер.
- Повітряне лазерне сканування – можна віднести до одного з типів повітряної фотографії. Тут сканер встановлюють в літаку, гелікоптері

або безпілотнику і підіймають його на необхідну висоту для зйомки об'єкта. Цим способом можна виконати тривимірну модель ландшафтів або густозаселених районів.

Більша детальна інформація про види лазерного сканування буде відображена в наступних підпунктах.

В останні роки лазерне сканування стало дуже популярним. Завдяки цьому методу всі геодезичні та інженерні дослідження проводяться якісно та з максимальним рівнем деталізації.

В інженерній геодезії лазерне сканування застосовують для того щоб:

- Проводити геодезичні зйомки з метою отримання просторових координат об'єктів та рельєфу різних типів місцевостей;
- Розробляти топографічні плани – моделювати детальні картографічні матеріали з подальшим створенням тривимірних моделей місцевостей;
- Проводити виконавчі зйомки – здійснювати контроль за будівельно-монтажними роботами щоб вчасно мати можливість виявити дефекти від проектної документації ще на етапі проектування;
- Моніторити стійкість укосів кар'єрів та зсувних процесів – контроль за можливими змінами у структурі рельєфу, щоб прогнозувати вірогідність можливих зсувів та розвитку геодинамічних процесів;
- Визначати об'єми земляних робіт [2, с. 66-67].

Найбільш часто користуються наземним та мобільним скануванням через їх зручність та універсальність. Контроль за роботою сканера можна організувати за допомогою портативного комп'ютера. Набір програм та плагінів для обробки даних зазвичай вбудовано в сам сканер. Для початку роботи його достатньо увімкнути і направити на досліджуваний об'єкт. Повітряне лазерне сканування використовується менше, оскільки це зумовлено дороговизною обладнання, зате результати сканування цим способом можна використовувати для проведення віртуальних екскурсій [2, с. 67-68].

## 1.2. Види лазерного сканування

Лазерне сканування буває наземним, повітряним та мобільним. Лазерне 3D сканування – є спеціальною знімальною системою, за допомогою якої вимірюється відстань від сканера до точок об'єкта з великою швидкістю та реєструє певні напрями з подальшим створенням зображення в тривимірному об'ємі.

До наземного лазерного сканування відносять блок розгортки лазерного променя та лазерного далекоміра, який має великий частотний діапазон. До блоку розгортки входить полігональне дзеркало (призма та сервопривод). Під час сканування фіксується відстань до точок об'єкта і відбувається розподіл лазерного променя. В результаті наземного лазерного сканування утворюється хмара у вигляді точок [3, С. 9].

Більш частіше для топографічних досліджень почали використовувати наземне лазерне сканування в форматі 3D. Воно мають суттєві переваги над іншими видами вимірювань:

- Виконувати роботи можливо при будь-якому рівні освітлення;
- Ще на стадії польових робіт можна визначити «мертві» зони;
- Точки об'єкта скануються лише з одного центру проектування;
- Високий ступінь деталізації зйомки;
- Проектувальник може знімати важкодоступні міста знаходячись в повній безпеці.

Наземне сканування використовують в таких галузях:

- Проведення топографічних зйомок на територіях з високим ступенем забудови;
- Розробка заходів, що направлені на ліквідацію наслідків надзвичайних ситуацій;
- Фіксація місць ДТП та злочинних правопорушень;

- Суднобудування;
- Архітектура;
- Гірська та нафтогазова промисловість;
- Конструювання інженерних споруд [3, с. 9-10].

Під час наземного лазерного сканування проводяться такі процедури: проводиться зйомка фасадів та внутрішніх приміщень будівель; створюються тривимірні моделі тунелів, мостів, технологічного обладнання, пам'яток архітектури, будинків.

Повітряне сканування проводять за допомогою літака чи гвинтокрила. Повітряні лазерні сканери працюють за таким принципом: випромінюють лазерний промінь до об'єкта місцевості і в зворотному порядку. В процесі повітряного сканування лазер генерує імпульсне випромінювання, котре при відбитті від земної поверхні чи наземних об'єктів, використовується з метою вимірювання дальності від джерела випромінювання до об'єкта, який було відображено [3, С. 10].

Існує безліч переваг повітряного лазерного сканування:

1. Матеріали лазерної локації можна застосовувати в різних сферах.
2. Можливість проведення робіт не залежить від часу доби.
3. Збір даних здійснюється максимально швидко.
4. При виконанні повітряної лазерно-локаційної зйомки нема необхідності в наземних геодезичних роботах.
5. Гарантується точність вимірювань.

Повітряне лазерне сканування застосовують в таких сферах:

- Нафтогазова та гірська промисловість;
- Електроенергетика;
- Дорожнє господарство;
- Лісове господарство;
- Кадастрування земель;
- Проектування берегових ліній [3, с. 12-13].

Додатково для виконання завдань лазерного сканування застосовують мобільні картографічні системи. Їх застосовують для картографування цілих міст або для тисяч кілометрів транспортних шляхів. Наприклад, за допомогою мобільних картографічних систем можна створити технічну документацію для ділянки шосе довжиною 100 км протягом одного дня.

Технології лазерного сканування підходять для мобільного картографування. Для того щоб отримати тривимірні дані в високій точності, вимірювання проводяться на високих швидкостях у будь-який час доби [3, С. 13].

### **1.3. Прилади для лазерного сканування**

Зараз можна знайти лазерні геодезичні прилади для будь-яких потреб. Сучасні геодезичні технології суттєво відрізняються від традиційних. До недавнього часу для певного виду вимірювань застосовували лише конкретну технологію. Наприклад, теодоліти брали для кутових вимірювань, для лінійних – рулетку або далекомір, а висотні вимірювання проводилися нівеліром. Однак після того, як з'явилися електронні тахеометри, додаткові побудови на місцевості перестали бути актуальними. Завдяки цьому прориву точність вимірювань зростає і з'явилася можливість отримувати готові координати в значно швидшому темпі [4, с. 24-25].

Сучасні геодезичні прилади є досягненням високих технологій за останні десятиліття в галузях оптики, точної механіки та електроніки. Геодезичні вимірювання необхідні для ремонту та реконструкції автомобільних доріг, а також допомагають у супроводі будівничих робіт. Для точних геодезичних вимірювань на лінійних об'єктах потребується велика кількість часу та зусиль. Якщо вимірювання проводити традиційними приладами, то роботи затягнуться більше ніж на тиждень. В той час як сучасними приладами можна провести зйомку за кілька годин, а результати опрацювати за допомогою комп'ютерної програми протягом дня.

Для правильного використання сучасного геодезичного обладнання потрібно бути обізнаним з теоретичними основами топографії, геодезії та картографії; знати технічні особливості та характеристики приладів; розуміти специфіку роботи супутникових систем; знаходити причини можливих помилок під час вимірювань. Завдяки застосуванню професійного обладнання є можливість виконати максимально точні розрахунки в стислі терміни [4, с. 25-26].

### **1.3.1 Прилади наземного лазерного сканування**

Наземні лазерні сканери досить широко застосовують в інженерній геодезії. Більшість конструкцій сканерів оснащені імпульсним лазерним віддалеміром. Такі сканери мають певну область огляду. Спочатку сканер наводять на об'єкт з вбудованою цифровою відеокамерою. Зображення з камери відправляється на комп'ютер. Зйомка здійснюється повністю в автоматизованому режимі. Через обмеження кута огляду, наземне сканування доводиться проводити по кілька разів [5, С. 25].

Наземні лазерні сканери повинні відповідати наступним характеристикам:

- Мати функцію портативності та на їх переміщення повинно використовуватися мінімум зусиль;
- Дальність вимірювань до 1000 м;
- Точність визначення координат повинна вимірюватися в сантиметрах;
- Діапазон роботи по горизонталі 360°, а по вертикалі 320° (для роботи в приміщенні), та 120° по вертикалі (для роботи на вулиці).

На точність визначення координат впливають наступні фактори:

- Довжина хвилі коливання в процесі вимірювання;
- Частота сканування;

- Коефіцієнт відбивання поверхні об'єкта та його форма;
- Кут розходження лазерного променя;
- Точність визначення напрямку розповсюдження променя в вертикальній та горизонтальній площинах;
- Точність вимірювання дистанції до точки.

Щоб вимірювати архітектурні форми споруди потрібен сканер з коротшим діапазоном роботи, але з більшими показниками точності. Якщо потрібно обміряти кар'єр, то тут треба сканер з меншою точністю проте більшим діапазоном вимірювань.

До головних параметрів наземних сканерів належать:

- Наявність вбудованих камер для фото чи відеозйомки;
- Наявність двохосового компенсатора;
- Темпи сканування від 10000 до 1200000 точок за секунду;
- Кут розходження лазерного променя від 0.12 до 0.30 мрад [5, с. 25-26].

Процес зйомки лазерним сканером проходить наступні етапи:

- Планування робіт;
- Польове сканування;
- Підготовка інформації;
- Прив'язка та калібрування даних;
- Формування тривимірної моделі;
- Контроль якості одержаних даних.

Коли планують знімальні роботи враховують наступні чинники:

- Визначають мету сканування та який повинен бути кінцевий результат;
- Проводять аналіз території щоб визначити оптимальні місця для встановлення сканера;
- Підбирають сканер з потрібними характеристиками;
- Визначають способи збереження великої кількості даних.

Перед початком сканування встановлюється сканер зі штативом для приведення їх в робоче положення. Далі сканер підключається до нетбука і обирається область сканування. Оскільки більшість сучасних сканерів оснащені вбудованими камерами для фото чи відеозйомки, то вони одразу підключаються до нетбука і щоб вибрати область сканування достатньо обвести зображення об'єкта та дисплеї [5, с. 26-27].

Сам процес сканування практично повністю автоматичний. Після того як натиснули кнопку «старт», сканер відносить промінь до початкової точки та починає збирати дані по точках. Точки автоматично заносяться в пам'ять нетбука чи самого сканера. Після сканування перевіряються результати щоб уникнути похибок. Після закінчення сканування необхідно перевірити чи роботи проведено в повному обсязі. Всі отримані дані прив'язують до єдиної системи координат.

Кінцевим результатом обробки сканування можуть бути такі дані:

- Очищені тривимірні дані у вигляді хмар точок;
- Стандартні 2D креслення у вигляді перерізів чи планів;
- Повністю текстуровані 3D моделі для створення покрокової анімації.

Найбільш ефективно використовувати наземні лазерні сканери при виконанні таких видів робіт:

- Знімання об'єктів нафтопромислового комплексу;
- Деформаційний моніторинг дамб та мостів;
- Топографічні зйомки з метою визначення обсягів порід в кар'єрах;
- Перевірка стану залізниць;
- Виконавча зйомка будівельних об'єктів;
- Архітектурні вимірювання;
- Топографічна зйомка місцевості для створення тривимірних моделей ландшафтів (особливо міських) [5, с. 27-29].

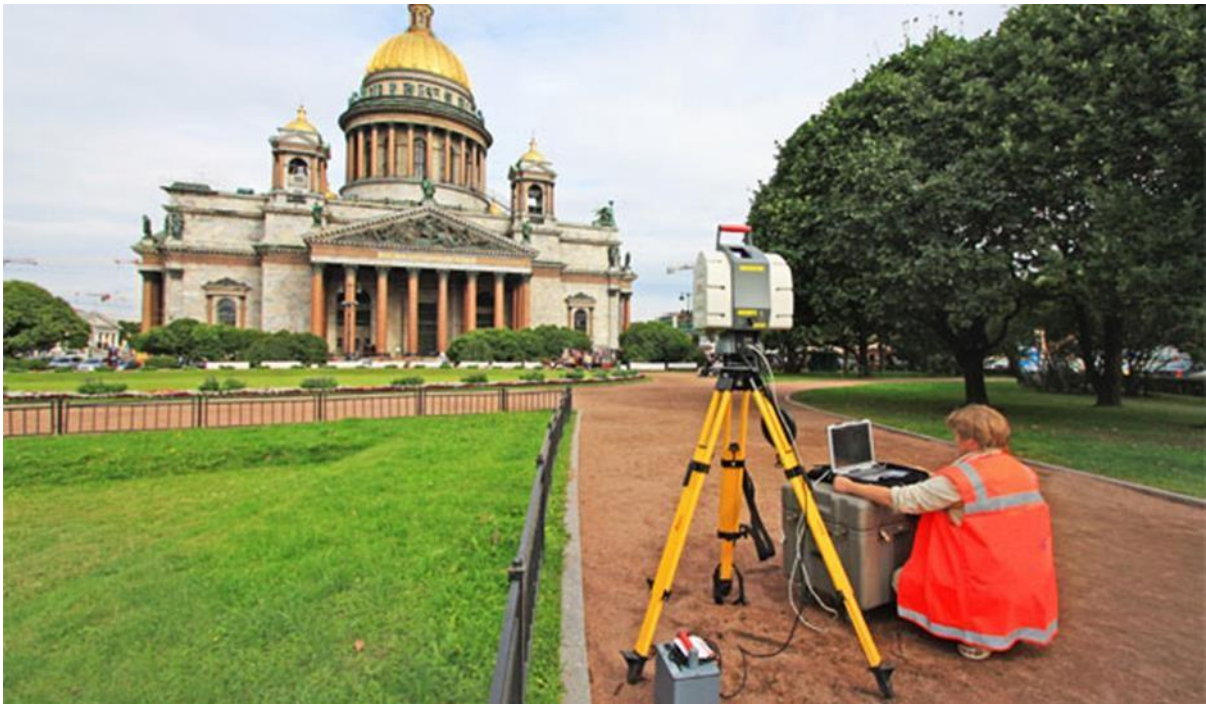


Рис. 1.1. Прилад для наземного лазерного сканування [33].

### **1.3.2 Прилади мобільного лазерного сканування**

Працювати с сучасними мобільними лазерними пристроями достатньо просто та швидко. Мобільний лазерний далекомір встановлюють на поворотній основі. Поворотною основою вважається головка для лазера. Протягом одного оберту далекомір виконує від сотні до тисячі вимірювань. Якщо лазерну головку встановити на рухомій базі під кутом до площини сканування, то далекомір буде з кожним наступним обертотом головки знімати нову площину [6, с. 121-122].

Максимальна продуктивність технології мобільного лазерного сканування для проведення паспортизації може сягати 300 км за добу в польових умовах однією дослідною станцією. Якщо вишукування проводяться з застосуванням ГІС-технологій, то продуктивність за день складе 200 км в умовах польових робіт однієї лабораторії при роботі однієї бригади. Якщо потрібно спроектувати ремонтні роботи, то продуктивність складе 50 км за день польових робіт.

Обробка даних. Мобільне лазерне сканування зараз досить популярне при замовленні проектувально-вишукувальних робіт в дорожній сфері. Технологію виконання робіт пов'язаних з мобільним лазерним скануванням освоїли багато компаній. Але виконання сканування та отримання хмари точок є лише початком роботи [6, с. 123-124].

Процес отримання хмари точок досить гарно опрацьований. Проте щоб досягнути потрібної точності, потрібно виконати якісне планово-висотне обґрунтування, а також здійснити перенесення хмар на контрольні точки. Сам процес обробки результатів лазерного сканування проводиться безсистемно і зводиться до того, що проводять класифікацію хмар точок та проводять їх фарбування. Однак цього об'єму роботи недостатньо для подальшої праці інженерів в системах автоматичного програмування та ГІС. Тому наступним етапом є визначення даних для отримання практичних 3D моделей.

Під час виділення модельних точок рельєфу звертають увагу на хмари точок лазерного сканування, в яких знаходиться десятки або й сотні мільйонів точок. Модельними точками рельєфу називають ті точки хмари, які найбільше відображають форму рельєфу. Зазвичай кількість модельних точок буває в 2-3 рази меншою ніж число вихідних точок. Модельні точки використовують для моделювання рельєфу поряд з автомобільними шляхами чи залізницею та задають числову модель рельєфу, яку можна застосовувати в будь-яких системах для автоматичного програмування та ГІС [6, С. 124].

Базову просторову геометрію автошляху чи залізниці можна задати при оцифруванні структурних ліній дороги. До структурних ліній дороги належать: осьові лінії, межі укосів виїмок та насипів, кромки проїжджої частини, бровки, підшви тощо. Структурні лінії дороги зараз можна розпізнати за допомогою багатьох геодезичних програм. Однак варто зазначити, що автоматичне розпізнавання структурних ліній дороги можна ефективно використовувати лише для нових доріг. Тому якщо дорога побудована давно, то потрібно здійснювати ручне оцифрування структурних ліній.

Тому при створенні моделей автомобільних та залізничних робіт важливо проводити моделювання об'єктів інженерного облаштування. При проведенні робіт з оцифрування інженерного облаштування оператор працює з 3D моделями [6, с. 125].



Рис. 1.2. Прилад для мобільного лазерного сканування [34].

### 1.3.3 Прилади повітряного лазерного сканування

Повітряне лазерне сканування в інженерній геодезії проводиться за допомогою літака, гелікоптера чи дрона. Системи повітряного сканування мають назву ЛІДАР (LIDAR з англійської розшифровується як Light Detection and Ranging). Це означає що ці системи працюють за принципом отримання смуг сканування в режимі нон-стоп. Дзеркало або призма відхиляє лазерний промінь в межах однієї смуги. Щоб отримати набір смуг потрібно щоб носій сканування перебував в постійному русі під час проведення сканування.

Для фіксації просторових координат на носії крім лазера додатково встановлюється GPS-приймач. Всі дані поєднуються з інерційно-навігаційною системою (INS). Фіксація даних у поєднанні систем (GPS-INS) дає можливість

визначити просторове знаходження та орієнтацію оптичного центру. Остаточним результатом лазерного сканування будуть визначені просторові координати точок земної поверхні. Сукупність точок відбитих лазерних променів створює нерегулярну сітку, де таких точок безліч. Після того як ці дані стали відомими, можна отримати цифрову модель рельєфу з реальною сіткою [7, с. 169-170].

За допомогою сучасних повітряних систем лазерного сканування можна одночасно фіксувати кілька відбитків променя від досліджуваного об'єкта. До прикладу, якщо промінь потрапляє на крону дерева, то першим відбиттям буде зображення від крони, а другим від земної поверхні. Завдяки лазерному променю можна побудувати електронну модель лісового масиву поза межами крон дерев. Таким способом будується цифрові моделі дахів будівель для забудованих територій, цифрові моделі ЛЕП тощо.

Якщо треба провести картографування території, то будують ЦМР (цифрову модель рельєфу) за допомогою системи ЛІДАР, в якій потрібно прибрати імпульси, які не стосуються земної поверхні. Частково цей процес проводиться за допомогою програмного забезпечення, але іноді цього не вдається і тому до роботи кличуть оператора-фотограмметриста [5, С. 170].

Головні технічні характеристики повітряних лазерних систем наведені в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1. Технічні параметри приладів повітряного лазерного сканування [7, С. 171].

Показники/клас приладу	ALTM3/70	ALTM3100	ALS50
Частота генерування імпульсів кГц	33, 50, 70	33, 50, 70, 100	83
Висота польоту Н (м)	200-300	80-3500	До 4000
Ширина смуги фіксації	від 0 до 0,93Н		
Кут сканування	0-25		До 75
Число реєстрованих відбиттів	4		3-4
Частота сканування кГц	0-70		–
Тривалість імпульсу нс	10		
Частота реєстрації GPS, Гц	1-2		
Частота реєстрації INS, Гц	50-200		
Розходження лазерного променя, мрад	0.2-0.7	0.3/0.8	–
Точність визначення віддаленості, см	1		
Точність визначення висоти, см	15-35		–
Точність визначення планового знаходження, см	1/2000 Н		–

Завдяки сучасним лазерним системам повітряного сканування можна реєструвати певну кількість відбитої енергії. Якщо порівнювати зі звичайною аерофотозйомкою, то повітряне лазерне сканування має безліч переваг. Це зумовлено тим, що робота лазера не впливає на час доби та погодні умови. Також на таких моделях відсутні тіні. При використанні методу лазерного сканування повітряним способом можна отримати низку додаткових даних, серед яких: растрова модель, ортофотоплан та математичні моделі поверхні.

Дані повітряного лазерного сканування зручно використовувати для наочного відображення рельєфу місцевості; антропогенної забудови щоб визначити форми та розміри інженерних споруд та для дешифрування об'єктів безпосередньо на місцевості [7, с. 171-172].

За допомогою даних, отриманих в ході повітряної лазерної зйомки можна створити цифровий топографічний план, пройшовши наступні етапи:

- Класифікація лазерних точок;
- Створення ЦМР;
- Отроттрансформування аерофотознімків;
- Створення растрових моделей поверхні;
- Створення векторної моделі рельєфу;
- Дешифрування.

Отже, завдяки технології повітряного лазерного сканування отримані дані будуть корисними не тільки для картографування території, але і для виконання науково-прикладних завдань в різних галузях економіки. Наприклад, отримані дані в результаті повітряного лазерного сканування будуть корисними в роботах з таксації лісових угідь, в землеустрої, при експлуатаційній оцінці стану електромереж (зокрема ЛЕП), екологічній оцінці та при визначенні збитків після техногенних катастроф та стихійних лих [7, с. 175-176].



Рис. 1.3. Прилади для повітряного лазерного сканування [35].

## 1.4. Сфери застосування

Лазерне сканування в форматі 3D є новітньою технологією збору просторових даних. Після проведення сканування створюється 3D модель об'єкта. Воно виконується двома методами: стаціонарний (сканування інтер'єрів, споруд або окремих будівель) та мобільний (скануються лінійні об'єкти великих розмірів).

Сфера використання технологій лазерного сканування в інженерній геодезії досить широка:

- Гірництво;
- Геодезія та картографування;
- Будівництво та проектування доріг;
- Створення цифрових моделей підземних галерей та кар'єрів з метою їх моніторингу;
- Топографічні зйомки інтенсивно забудованих ділянок;
- Підготовка архітектурних креслень фасадів будинків;
- Ремонт, оздоблення та реставрація інтер'єрів.

Додатково 3D сканери застосовують у дизайнерських студіях, автомобільних компаніях та кіноіндустрії. Широкого застосування це обладнання набуло в кінці 1980-х та на початку 1990-років і з того часу постійно вдосконалюється. Сучасні 3D сканери роблять детальне дослідження фізичного об'єкта, після чого його точна модель відображується в цифровому вигляді [8, с. 11-14].

Наземні геодезичні системи відрізняються вищою точністю. Вони створюють більш щільно розташовані точки. Такі щільно розташовані хмари точок можна застосовувати для розробки 3D моделей міст. Сюди можна включити управління структурами та обладнанням, обстеження залізничних шляхів, внутрішніх моделей будівель та споруд, а також проводити планування містобудування.

Мобільні геодезичні системи ще називаються ЛІДАРАМИ. До мобільних лідарних систем може бути підключена різна кількість датчиків, які розгортаються під час руху транспорту. Такі системи допускається встановлювати на річкових суднах, кораблях, поїздах чи автомобілях. До комплектуючих мобільних систем входять лазерні датчики, лазерні системи вимірювання погоди, камери та внутрішні системи навігації (GPS, INS) [8, с. 16-17].

### **1.5. Як допомагає лазерне сканування в топографічних зйомках**

Без сучасних топографічних карт, які зроблені в цифровому форматі, неможливо узагальнити інформацію та проаналізувати можливості розвитку території. До важливих картографічних матеріалів відносяться топографічні карти великого (1:100000) та середнього (1:50000 та 1:25000) масштабів. Також в цю категорію враховують топографічні плани (1:500, 1:1000, 1:2000, 1:5000). Оновлені цифрові топографічні карти великих масштабів дають змогу вивчати території, а також проводити розрахунки та точні виміри. Для попереднього проектування об'єктів інфраструктури знадобляться карти середніх масштабів. Оновлені цифрові карти допоможуть більш ефективно планувати територію, розвивати інфраструктуру, вести моніторинг екологічних проблем, досліджувати будову кар'єрів тощо [9, С. 14]. Прискорити процес створення сучасних топографічних карт та полегшити топографічні зйомки загалом, допоможе лазерне сканування, яке є новим напрямком інженерної геодезії.

Наземне лазерне сканування (його ще іменують 3D-скануванням місцевості), дозволяє швидко проводити моніторинг конструювання інженерних споруд та досліджувати їх стан під час експлуатації. Додатково, за допомогою лазерного сканування можна провести топографічну зйомку та змодельовати складні архітектурні об'єкти в форматі 3D.

Застосовуючи метод лазерного сканування топографічна зйомка можлива при будь-якому освітленні в будь-який час доби. Це допомагає максимально швидко та точно виконати різні завдання інженерної геодезії. Знімання виконується шляхом прокладення сканерних ходів або супроводжується створенням сканерної мережі від опорних геодезичних пунктів. Після цього пункти сканерної мережі фіксуються на місцевості спеціальними помітками [10, С. 22].

Топографічні зйомки зазвичай виконують методами наземного лазерного сканування за допомогою сканерів Leica P20 та BLK360. Проведення польових робіт забезпечує збір інформації про поверхню сканованого об'єкта з метою створення повної та точної 3D моделі. Під час проведення сканування фіксуються в програмі всі відміряні дистанції до точок. Отже, лазерні сканувальні системи є потужним помічником у просторовому моделюванні об'єктів під час топографічних зйомок [10, с. 22-23].

Топографічні зйомки залишаються невід'ємною частиною геодезичних робіт. Оскільки сучасна геодезична наука стрімко розвивається, то для ефективних досліджень потрібно застосовувати сучасне геодезичне обладнання, яке не тільки полегшить, але й прискорить процес топографічного знімання. Для того щоб користуватися сучасним геодезичним приладдям, необхідно мати ґрунтовні знання в сферах топографії, геодезії, картографії, володіти знаннями стосовно технічних особливостей приладів, розумітися на специфіці роботи супутникових систем, а також вміти віднаходити причини можливих похибок під час організації вимірювальних робіт. Серед таких приладів варто виділити спеціальні 3D сканери, які займаються лазерним скануванням. Цей метод геодезичних робіт сильно полегшує та пришвидшує топографічні зйомки [11, С. 249].

Точні розрахунки в короткі терміни можна зробити виключно професійним обладнанням. Завдяки використанню сучасного лазерного обладнання при проведенні топографічних зйомок є можливість суттєво

розширити багаж знань, які вирішуються геодезичними та топографічними методами. Також під час вирішення різних топографо-геодезичних завдань підвищиться доступ до опрацьовуваних матеріалів.

Серед основних видів сучасного геодезичного обладнання для проведення топографічних зйомок найбільшу популярність отримали лазерні сканери. Вони відносяться до новітнього геодезичного обладнання. Ці пристрої мають системи зміни напрямку променя лазера та облаштовані високошвидкісним безвідбивачевим лазерним далекоміром. Сектор повороту дзеркала є областю сканування. Лазерний промінь далекоміра поширюється зі швидкістю 50 000 точок на хвилину. За допомогою цього приладу можна здійснити комплексну зйомку об'єкта [11, с. 249-250].

Додатково до процесу лазерного сканування при веденні топографічних зйомок можна залучати БЛПА, які зможуть всю інформацію зберігати на своїх накопичувачах, або передавати її через хмарні сервіси в режимі онлайн. Використання БЛПА корисне для сканування пошкоджених будинків, для відображення ситуації в важкодоступних районах, для моніторингу стану до доріг та різних об'єктів. Вони також можуть фіксувати виникнення лісових пожеж чи моніторити ступінь завданих збитків унаслідок стихійних лих.

## **1.6. Порядок створення 3D-моделей об'єктів та ландшафтів**

Як вже відомо з попереднього матеріалу, створення 3D моделей об'єктів та ландшафтів виконується за допомогою спеціальних 3D сканерів. Існує два умовних типи технології тривимірного сканування: контактне та безконтактне.

До контактних пристроїв відносять те обладнання, в якому встановлено будь-який «контактний елемент». Всередині кожного пристрою знаходиться точний датчик кута повороту, при русі якого відбувається зйомка. Саме від «гнучкості» та оптики цього датчика залежить точність вимірювань.

Контактні пристрої є більш дешевими і точність вимірювань може бути нижчою, адже модель створює сам оператор, а не програмне забезпечення. Але якщо порівнювати контактні сканери з безконтактними, то можна зазначити те, що безконтактні моделі не зчитують текстуру об'єкта [12, с. 9-10].

Безконтактні 3D сканери оснащені лазерними датчиками та цифровою камерою. Їх використовують тоді, коли треба отримати більшу точність сканування. За допомогою лазерного сканування є можливість сканувати об'єкти з їхніми текстурами. Головним компонентом лазерного 3D сканера є імпульсний лазерний далекомір. Керування таким приладом здійснюється через портативний комп'ютер. В момент початку сканування проводиться попереднє наведення камери на досліджувані об'єкти. Зображення, що було отримано з цифрової камери миттєво передається на екран гаджета, завдяки чому оператор може здійснювати візуальний контроль за процесом сканування в режимі реального часу [12, с. 10-12].

Моделювання рельєфу місцевості та окремих об'єктів стають невід'ємною частиною експериментально-теоретичних досліджень в картографії, проектах інженерної геодезії, земельному кадастрі, екології, науках про Землю тощо. Цифрова модель рельєфу показує його у вигляді тривимірних зображень. За допомогою 3D сканування можна побудувати віртуальну модель певного ландшафту чи окремого об'єкта. В результаті утворюються хмари точок, про які згадувалося в попередньому розділі.

Хмари точок є основою для створення цифрових моделей місцевостей. Для прискорення процесу створення цифрової моделі точки групують, утворюючи класи об'єктів за спільними характеристиками. Групування проходить за наступними показниками: рельєф, природні та штучні об'єкти, рослинність, будинки тощо.

Наприклад, для моделювання рельєфу виконують адаптивне проріджування точок, щоб класифікувати основні точки, які допоможуть визначити рельєф місцевості. Найменша кількість точок залишиться на рівнинному рельєфі, а на переломах та інших мікроформах залишають ту

кількість точок, яка повністю передає форму цих об'єктів. Класифікація є важливим етапом при створенні 3D об'єктів моделей та ландшафтів [13, с. 173-174].

Раніше ми розібралися з пристроями для 3D моделювання об'єктів та ландшафтів і як відбувається класифікація цих об'єктів. Далі буде розглянуто процес створення цих об'єктів.

Процес побудови моделей зазвичай розпочинається з ознайомлення з їх структурними особливостями та розмірами. Всі дані фіксуються в комп'ютер для подальшої обробки. Якщо справа стосується моделювання будівель, то кожна з них спочатку знімається окремо, а потім будується спільна базова карта. Після того, як процес з'єднання будівель та ландшафтів в єдину площину відбувся, для об'єктів фіксують висоту та географічне розташування (яке підтягується автоматично за допомогою спеціальних ГІС-технологій). Після зчитування висот та географічних координат розпочинається ландшафтне моделювання та створюється поверхня місцевості. Щоб пришвидшити процес сканування всі роботи плануються заздалегідь [14, с. 24-25].

Моделювання ландшафтних об'єктів розпочинається із знімків поверхні Землі та створення ортофотоплану. На основі цих даних класифікують окремі об'єкти. Деякі результати подібних зйомок розміщені у вільному доступі в мережі інтернет. Всі ландшафти, які підлягають лазерному скануванню розділені на 4 категорії:

1. Рослинність – ландшафти, на яких зустрічаються певні види рослинності (можливо рідкісні).
2. Локальні сімейства ландшафтних об'єктів – це невеликі форми архітектурних об'єктів, до яких відносяться урни для сміття, ліхтарі, лавки тощо.
3. Системні сімейства ландшафтних об'єктів – будівлі чи невеликі архітектурні об'єкти, що збудовані за певним шаблоном (стіни, балкони).

4. Комбіновані проекти – невеликі архітектурні об’єкти, що мають складну будову, але вписуються в загальний проект (сміттєві баки) [14, с. 25-26].

Заключним етапом створення 3D моделей об’єктів та ландшафтів є створення цілісного проекту, який включатиме: дороги, дерева, будинки. Перед проектування робиться схематична модель, а далі проводиться її деталізація. Спочатку дороги відокремлені від раніше створеної місцевості, але потім їх додають у разі необхідності. Будинки спочатку моделюють на низькому рівні деталізації, щоб можна було прочитати контур кожного об’єкта. Отже, сканування проводиться в кілька етапів, щоб врахувати всі нюанси досліджуваної місцевості, а також для того, щоб уникнути помилок [14, с. 26-27].

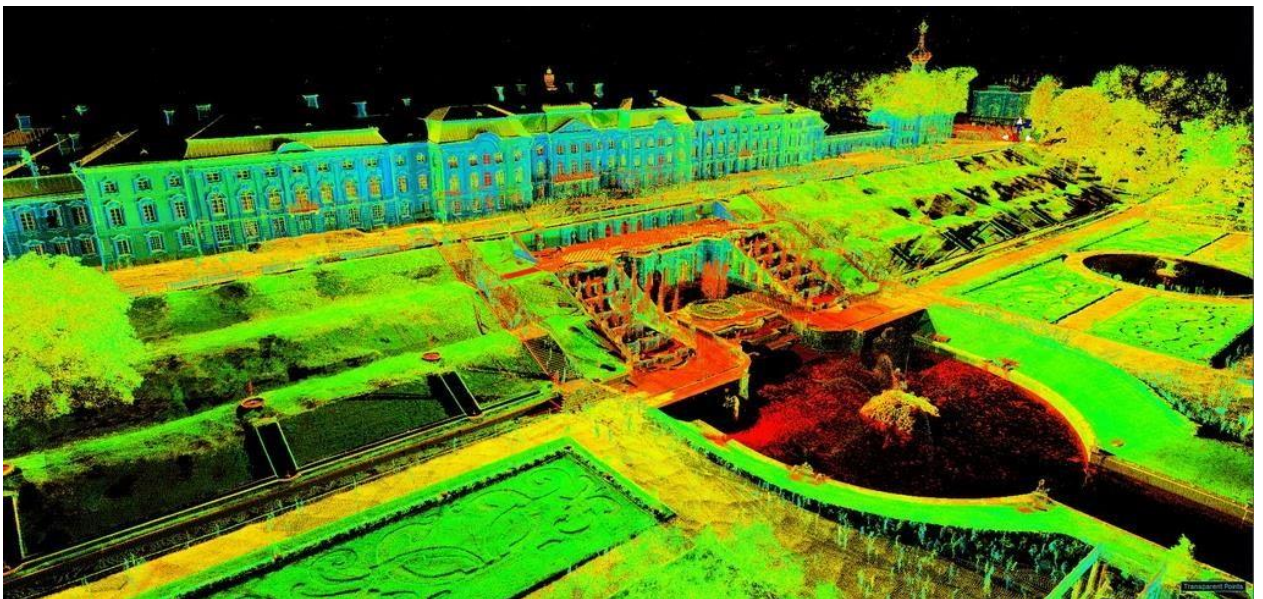


Рис. 1.4. Приклад тривимірного сканування місцевості [36].

### **1.7. Програмне забезпечення для здійснення обробки даних лазерного сканування**

Лазерне сканування в інженерній геодезії виконується за допомогою спеціального програмного забезпечення. Переважно сканування проводиться

наземними методами, але бувають випадки, що потрібно застосовувати повітряне лазерне сканування (проте такий вид сканування потрібен для масштабних знімачів таких як: спостереження за певним видом тварин чи рослин дистанційно, для дослідження шахт та кар'єрів, при оцінці збитків завданих стихійними лихами чи унаслідок бомбардувань).

Деякі сканери можна використовувати в приміщенні, а деякі доцільно застосовувати на вулиці. Вибір програмного забезпечення залежить від того, який тип сканера обрано.

Серед основних технічних характеристик лазерних сканерів виділяють наступні:

- Швидкість сканування та темп вибірки системи вимірювання;
- Кут огляду;
- Просторова роздільна здатність, тобто кількість точок, які можливо переглянути у сканувальному полі;
- Точність системи вимірювання та ступінь відхилення;
- Чи можливе поєднання з іншими гаджетами та ГІС-системами [15, с. 7-8].

При проектуванні будівель та моделей ландшафтів більш доцільно застосовувати наземне лазерне сканування. Ринок лазерних сканерів для потреб наземного сканування в останні роки суттєво розширився. Зараз безліч компаній можуть запропонувати подібну продукцію на ринку. Порівняти лазерні системи наземного сканування від різних компаній досить складно, оскільки вони мають різні характеристики та принципи вимірювання.

На відміну від традиційних геодезичних пристроїв, лазерні сканери не мають чітких характеристик щодо точності, роздільної здатності та їх продуктивності. Виробники лише зазначають їх діапазон роботи. На ринку зараз можна зустріти системи для лазерного сканування від таких компаній: Riegl, Optech, Trimble (Mensi), Minolta, iQSun, Callidus, Leica (Cyra), Visimage та Z+F. Точність вимірювань відстані в таких сканерах залежить від

інтенсивності відбитого лазерного світла та від відбивної здатності поверхні об'єкта [15, с. 8-9].

Якщо порівнювати наземні лазерні сканери зі сканерами повітряного базування, то можна помітити, що система координат визначається будовою самого сканера. В структуру наземного лазерного сканера входять такі елементи:

- Далекомірний блок. Цей блок вимірює відстані до перешкод, що розташований на шляху приймало-передавального пристрою далекоміра. Напівпровідниковий лазер виступає джерелом сканування. Відстань до сканувального об'єкта за часом проходження виконується імпульсним та фазовим методом.
- Блок розгортки. Цей блок зміщує приймально-передавальний тракт далекоміра та фіксує кути спрямованості випромінювання за допомогою оптико-механічної системи. Ця система складається із сервоприводів та дзеркальних призм. Вертикальну розгортку проводять з використанням плоскої чи багатогранної дзеркальної призми.

Імпульсний метод вимірювання відстаней застосовується для того щоб визначити час, за який випромінювання подолає відстань  $2D$ . Превагами імпульсного методу вимірювання відстаней є висока дальність дії при відносно малій потужності імпульсу, однозначність отриманого результату (довжина лінії пропорційна часу пробігу). Серед недоліків варто виділити те, що в порівнянні з фазовим методом, спостерігається менша точність та обмеження частоти імпульсів у відстані до об'єкта [16, с. 43-44].

Коли проводяться заміри фазовим методом, то реєструється фазовий зсув  $\Delta\varphi$  сигналу, який пройшов подвійний шлях до перешкоди. Таким чином, визначається ціле число довжини хвиль  $N$ . До переваг варто віднести високу точність вимірювань та більш кращу продуктивність в порівнянні з імпульсним методом.

Також є метод оптичної тріангуляції. Цей метод дозволяє вимірювати як відносну зміну відстані від датчика до контрольованого об'єкта так і його абсолютну величину. В таблиці 1.2 відображено порівняльна характеристика згадуваних методів [16, с. 44-45].

Таблиця 1.2. Аналіз НЛС за способами вимірювання дистанції [16, С. 45].

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

НЛС відрізняються такими технічними характеристиками:

- Дальність дії – показує максимальну відстань, на якому наземний лазерний сканер здатний отримати однозначний результат з гарантованими характеристиками. На цей показник впливають такі чинники: вибір методу вимірювання відстаней, потужність лазера та відбивна здатність поверхні.
- Точність вимірювання відстаней визначає ступінь похибки разового вимірювання та залежить від конструкції далекоміра, а також від способу вимірювання відстаней. Великий вплив на точність на точність вимірювань має розбіжність лазерного випромінювання.

- Швидкість проведення робіт. Тут визначається кількість точок, що може бути отримана за одну хвилину.
- Мінімальний кутовий крок сканування. Він визначає максимальну можливість для конкретної моделі сканера щільність зйомки.
- Кут поля зору визначає максимальну ділянку, яка підлягає зйомці з одного положення.
- Споживча напруга. Лазерні сканери можуть працювати як від змінної, так і від постійної напруги. Якщо поруч є мережа 220В, то вигідно працювати від джерела змінної напруги. Робота від акумуляторів здійснюється при відкритих геодезичних роботах. Акумулятори мають постійну напругу від 12 до 24В залежно від конфігурації пристрою.
- Можливість геодезичного орієнтування. Визначається можливість орієнтування по точках з відомими координатами.
- Діапазон допустимих робочих температур та зовнішніх умов [16, с. 46-49].

### **1.8. Порівняльний аналіз популярного програмного забезпечення для лазерного сканування**

Щоб оброблювати результати лазерного сканування потрібно застосовувати спеціальне програмне забезпечення. Серед таких програм буде розглянуто такі програмні рішення як: ArcMap, Autodesk Civil 3D, Cyclone та PolyWorks.

Програмне забезпечення MicroStation відноситься до високопродуктивних програм, які допомагають вирішувати задачі лазерної геодезії. В цій програмі є високопродуктивний пакет автоматизованого проектування (CAD, САПР). Завдяки цьому пакету є можливість опанувати функції керування базами даних, візуалізації, креслення, моделювання та аналізу готових цифрових об'єктів, що були створені в процесі лазерного

сканування. Ця програма здатна імпортувати растрові та векторні файли різних форматів. Також є можливість використовувати растрові зображення в якості підкладки. Додатково ці файли можна геометрично перетворювати. Завдяки цій функції можна одночасно обробляти векторну графіку та аерокосмічні знімки [17, С. 197].

Програма ArcMap дозволяє не тільки створювати, але й проводити перегляд та аналіз електронних карт. Цей додаток має наступні функціональні можливості:

- Створює та зберігає в різних форматах на основі інтегрування даних;
- Подає просторові дані у вигляді картографічних проекцій з використанням широкого діапазону функцій;
- Аналізує просторові дані з метою пошуку об'єктів або встановлення між ними зв'язку;
- Формує графіки та звітність, що відображують результати досліджень.

Компанія Autodesk Inc створила програмний пакет Autodesk Civil 3D. Він дозволяє створювати цифрові моделі об'єктів у сфері будівництва цивільних об'єктів (гидравліка, гідрологія, забудова територій, транспортна сфера). В програмному пакеті Autodesk Civil 3D є спеціальні функції, які дозволяють спрощувати проектування ділянок стічних вод, водозаборів, земельних ділянок, будівельних майданчиків та доріг [17, с. 197-199].

Програма Cyclone є спеціальним пакетом, який забезпечує обробку 3D моделей від фірми Leica Geosystems. За допомогою цього пакета проводяться геодезичні зйомки в сфері будівництва та інших наземних робіт. Це програмне забезпечення необхідне для керування роботою сканерів. В пакет входять окремі модулі. Cyclone-scan – цей модуль керує процесом сканування. Cyclone-Register – допомагає реєструвати хмари точок. Cyclone-Model – виконує задачі з 3D моделювання об'єктів [18, С. 3].

В програмі Cyclone реєстрація доступна двома способами:

- Реєстрація з прив'язкою до опорних точок;
- Реєстрація за допомогою прив'язки до хмари точок.

Дані з програми Cyclone імпортуються у форматі PTX. Цільові координати імпортуються окремо з текстового файлу після кожного сканування.

Програмне забезпечення PolyWorks випускає канадська компанія InnovMetric Inc. Цю програму використовують переважно для вирішення промислових, реінжинірингових та виробничих завдань. В пакет входять такі модулі:

- IMAlign – виконує функцію реєстрації та вирівнює хмари точок;
- IMInspect – цим модулем проводиться вимірювання та порівняння даних сканування;
- IMMerge – об'єднує та генерує полігональні сітки;
- IMEdit – редагує та модифікує полігональні сітки;
- IMCompress та IMTexture – створюють текстури полігональних сіток.

В програмі Polyworks реєстрація теж здійснюється двома способами як і в програмі Cyclone. Файли в цій програмі також імпортуються в форматі PTX.

Зазвичай для сканування більшості об'єктів достатньо разового сканування, але якщо це сканування будинків, або інших інфраструктурних об'єктів, то сканування виконується в кілька етапів [18, с. 9-12].

### **1.9. Інтеграція лазерного сканування з ГІС-технологіями та BIM-моделюванням**

Геоінформаційні технології (ГІС) – це системи, що призначені для керування базами даних для роботи з територіально орієнтованою інформацією, яка направлена на планування спостережень, збирання, накопичення та аналізу даних з прив'язкою картографічних об'єктів до єдиної системи координат.

Будують електронні та проводять їх аналіз все частіше із застосуванням ГІС. Сучасні системи можуть не лише робити простий пошук та досліджувати окремі дані, але й проводити повноцінний аналіз географічної інформації та узагальнювати її. ГІС – є сучасною комп'ютерною технологією, яка картографує та аналізує об'єкти картографування. Таке програмне забезпечення дає змогу поєднувати традиційні методи інженерної геодезії з базами даних та дають можливість створювати тривимірні моделі об'єктів [19, С. 301].

Завдяки використанню ГІС-систем можна зекономити не тільки час, але й кошти при проектуванні будь-яких об'єктів. Ці системи корисні під час прийняття рішень, пов'язаних з управлінням територій, охороною заповідників, заказників та моніторингом стану навколишнього середовища. В Україні цими технологіями користуються переважно транснаціональні корпорації. Але з часом до користування ГІС переходять природоохоронні та науково-дослідні організації, у яких на меті дослідження певних територій. В нашій державі ці технології розвиваються повільно через наступні причини: недостатня кількість фахівців в цій галузі та відсутність грошей на створення таких проектів, які б займалися з системами ГІС. На відсутність прогресу цих технологій також впливає внутрішня ситуація в країні, де основним стримуючим фактором розвитку є військова агресія РФ.

Щоб швидше ГІС-технології заповнили український ринок потрібно визнати, що через відсутність повсюдного запровадження ГІС існують такі проблеми при створенні географічних карт:

- Геопросторова інформація застаріла та її кількість недостатня для нових досліджень;
- Геопросторові дані не мають єдиного стандарту (масштаби карт та системи координат відрізняються);
- Геопросторові дані не розподілені між відповідними відділами (багато архівів дублюється, а також є необхідність копіювати оригінали карт, оскільки нема їх цифрових варіантів);

- На підготовку копій та на їх пошук йде багато часу;
- Без впровадження нових технологій неможливо задовольнити нові потреби, які з'явилися в чинному законодавстві (оновлення реєстрів земельного кадастру, висвітлення діяльності владних структур в мережі Інтернет тощо).

Завдяки впровадженню ГІС всі учасники ринку отримують низку переваг:

- Збільшиться ефективність та швидкість виконання проектів;
- З'явиться можливість швидко аналізувати поточні дані та впроваджувати додаткові заходи щодо покращення проектів;
- Виникне можливість продавати нову продукцію та передавати досвід партнерам [19, с. 301-302].

Інформаційні технології останнім часом все частіше застосовують в різних сферах таких як: будівництво, проектування, експлуатація будівель, різних споруд та інфраструктурних проектів. Досить активно в сфері цифровізації рухається будівельна індустрія. Важливою технологією в сфері став розвитку технологій (BIM) – це будівельно-інформаційне моделювання. Завдяки використанню BIM технологій є можливість планувати раціональне використання ресурсів, оптимізувати робочі процеси та всім зацікавленим сторонам одночасно оцінювати ті самі дані завдяки взаємодії різних технологічних платформ [20, С. 239].

BIM-технології почали запускати в 2013 році, а вже в 2018 робоча група ЄС, що керує BIM, створила Керівництво з запровадження технологій для замовників з європейських країн. В 2019 році ці технології запрацювали і в Україні. Офіційна дата підписання меморандуму: 30.11.2019. Він отримав назву: «Дорожня карта впровадження інформаційного моделювання будівель (BIM) при створенні об'єктів будівництва, об'єктів архітектури».

BIM-моделювання розшифровується як (Building Information Model) – інформаційне моделювання будівельного об'єкта, котрий включає створення та керування цифровими уявленнями фізичних та функціональних

особливостей певного об'єкта. Всі отримані інформаційні моделі стають загальними джерелами знань, які направлені на те, щоб приймати рішення про об'єкт на самих ранніх стадіях будівництва починаючи з проектування, зведення, експлуатації та можливого знесення [20, с. 239-240].

Якщо технології BIM та ГІС використовувати спільно, то це створить додаткові переваги при плануванні та проектуванні об'єктів. Зручність пояснюється тим, що реальні об'єкти знаходяться в геоінформаційному просторі.

Якщо вводити в BIM-моделювання технології геоприв'язки, то це дасть можливість виконувати просторове планування об'єктів та здійснення будівництва в геопросторовому контексті. Завдяки цій інтеграції можна не тільки вірно розпланувати розташування об'єктів на топографічній карті, але й залучитися до створення розумних будинків, які б змогли максимально ефективно використовувати природне освітлення та контролювати температуру повітря в таких будинках. Використовуючи ГІС-технології, проєктанти мали б уявлення про регіони схильні до повеней, зсувів, землетрусів чи інших явищ природи [20, С. 240].

Інтеграція BIM і GIS підвищує ефективність всього життєвого циклу проєктів. Завдяки цій взаємодії різних систем, можна більш ефективно адаптувати та обробляти 3D моделі BIM в поєднанні з ГІС, а також робити більш детальну візуалізацію та аналіз.

Наприклад, в кінці 2019 року в Україні налічувалося 20 діючих аеропортів, 17 з яких включено до Державної цільової програми розвитку аеропортів 2023 року. Ця концепція прийнята в 2016 році, але поки що їй не судилося реалізуватися через повномасштабне вторгнення. Мета цієї програми полягала в тому щоб модернізувати аеропорти та привести їх у відповідність до міжнародних стандартів.

Багато країн світу використовуються BIM-моделювання та ГІС-технології при плануванні, проектуванні та експлуатації аеропортів. Дані лазерного сканування з поєднанням BIM та GIS технологій використовують в

таких аеропортах: Хітроу (Великобританія), Абу-Дабі (ОАЕ), Король Халід (Ер-Ріяд, Саудівська Аравія), Хартсфілд-Джексон в Атланті (США), Лос-Анджелес (США), Жешув Ясенка (Польща). Спільне використання ВІМ та ГІС-технологій для проектування, будівництва та реконструкції аеропортів дає можливість побудувати комплексну інформаційну систему, яка ефективно працює протягом всього життєвого циклу цих об'єктів та споруд [20, с. 240-241].

Щоб більш ефективно здійснювати збір геопросторових даних для ВІМ та ГІС, активно застосовують наземне та повітряне (лідарне) лазерне сканування, що дає можливість моделювати точні копії об'єктів та різних територіальних відрізків шляхом переміщення геометричних форм у математичні моделі.

Під час проведення робіт у ВІМ та ГІС інтегруються різні технологічні напрямки: наземне та повітряне лазерне сканування, побудова та аналіз різних типів поверхонь, модель-орієнтоване проектування, 3D моделювання та реалізація 3D-середовища для отримання візуалізації.

Серед проблем інтеграції ВІМ-моделювання та ГІС-технологій виділяють наступні:

- Відмінність семантики – різні терміни та набори артибутивної інформації;
- Топологічні відносини – різні підходи до топології (ГІС використовує полігони лінії та точки), а (ВІМ використовує параметричні криві та сплайни);
- Різні формати даних – ГІС використовує CityCML, GML та шейп-файли; ВІМ використовує файли таких форматів: IFC, RVT, DGN та DWG.

Над об'єднанням даних геоінформаційних систем та інформаційних моделей ВІМ працюють компанії Autodesk та Esri. Рішення стосовно інтеграції направлені на те, щоб відображення семантичних даних було однаковим, або хоча б подібним один до одного. Якщо вдасться ще зробити не тільки

інтеграцію семантичних даних, але й об'єднати семантичні та просторові дані разом, то це стане ідеальним доповненням для будь-якої геоінформаційної та ВІМ-системи і дасть можливість конвертувати дані в більш ніж 2000 форматів [20, с. 241-243].

## **ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1**

У межах першого розділу було всебічно розглянуто теоретичні засади, принципи роботи, типи та практичне застосування технологій лазерного сканування в інженерній геодезії. Лазерне сканування як сучасний метод просторового вимірювання дає змогу отримувати високоточні тривимірні моделі об'єктів та територій з мінімальними затратами часу, що суттєво підвищує ефективність геодезичних робіт.

У сучасній практиці використовують три основні типи лазерного сканування: наземне, повітряне та мобільне. Наземне лазерне сканування дозволяє точно відображати фасади та інтер'єри будівель, архітектурні об'єкти, промислову інфраструктуру, тунелі та мости. Повітряне сканування, що здійснюється за допомогою літаків, гвинтокрилів або безпілотників, ефективно для охоплення великих площ, зокрема для моделювання рельєфу, моніторингу ландшафтів та створення цифрових моделей місцевості. Мобільне сканування базується на використанні спеціалізованих платформ, встановлених на транспортні засоби, що дає змогу здійснювати швидке картографування міст і доріг, включаючи створення технічної документації для сотень кілометрів автошляхів у найкоротші терміни.

Окремо проаналізовано етапи та структуру застосування технологій лазерного сканування. Розкрито методику створення тривимірних моделей об'єктів — від збирання первинних даних до їх обробки у спеціалізованому програмному забезпеченні. Наведено категорії ландшафтів, які найчастіше піддаються скануванню, та підкреслено значення попереднього ознайомлення з особливостями об'єктів для підвищення точності моделювання. Значну увагу

приділено характеристикам самих лазерних сканерів, зокрема точності, дальності дії, швидкості збору даних та принципам вимірювання.

Порівняльний аналіз моделей сканерів від різних виробників дозволив визначити оптимальні прилади для певних задач геодезії. Також окремо розглянуто інтеграцію даних лазерного сканування з ГІС-системами та BIM-технологіями, що є надзвичайно актуальним у контексті сучасного будівництва, архітектури та міського планування. Отримані 3D-моделі слугують основою для створення графічної документації (поверхових планів, креслень фасадів і мереж), яка використовується як проєктувальниками, так і замовниками для візуалізації, планування й ухвалення технічно обґрунтованих рішень.

Таким чином, лазерне сканування є потужним інструментом сучасної інженерної геодезії, який забезпечує високий рівень точності, автоматизацію процесів, швидкість отримання результатів та широкий спектр застосування в різних сферах.

## **Розділ 2. ПЕРЕВАГИ, НЕДОЛІКИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ЛАЗЕРНОГО СКАНУВАННЯ В ІНЖЕНЕРНІЙ ГЕОДЕЗІЇ**

### **2.1. Переваги лазерного сканування у порівнянні з традиційними методами геодезії**

Щоб забезпечити точність проведення вишукувальних та розмічувальних інженерно-геодезичних робіт для будівництва, необхідно витратити велику кількість часу та зусиль. Зважаючи на те, що темпи урбанізації швидко ростуть, виникає необхідність у вдосконаленні існуючих та розробці нових методів способів геодезичного забезпечення будівництва. Також необхідність пошуку нових методів проведення геодезичних робіт зумовлений тим, що на проведення цих робіт тепер встановлюють більш стислі терміни, але провести ці роботи традиційними методами неможливо швидше [21, С. 70].

Перед початком проведення геодезичних робіт виконується розмічування. Існують планові та висотні розмічування. Розмічувальні роботи є комплексним взаємопов'язаним процесом, що є головним етапом будівельних робіт.

Точність розмічувальних робіт визначається різними видами помилок. При вимірюванні традиційними геодезичними приладами цих помилок виникає дуже багато і доводиться часто проводити процедури повторно. Тому тут в нагоді стануть лазерні сканери, які зможуть виконати всі види геодезичних робіт за кілька годин.

Зараз глобальні супутникові системи відіграють важливу роль в інженерній геодезії. Визначення координат точок на земній поверхні набуло широкого застосування завдяки цим системам та системам лазерного сканування. Координатами користуються не лише працівники сфери геодезичних наук, але й учасники експедицій, військові, авіатори, моряки

тощо. Раніше для отримання координат потрібно було виконувати велику кількість геодезичних робіт на місцевості, а для передавання координат будували мережі різних координацій, що займало багато часу. Але після появи супутникових систем необхідність цих робіт фактично відпала [22, с. 9-10].

Основним інноваційним проривом для інженерної геодезії стало лазерне сканування. Завдяки цій технології є можливість миттєво отримати зображення складних промислових та архітектурних об'єктів. Лазерне сканування є технологією, яка збирає просторові дані з різних об'єктів з використанням 3D сканерів. Після проведення сканування можна переносити фізичні об'єкти в цифрову модель [23].

Щоб виконати лазерне сканування необхідно скористатися спеціальними сканерами. Вони здатні провести до мільйона вимірювань в секунду. В результаті формується хмара точок з просторовими координатами завдяки якій в подальшому створюються 2 та 3D моделі реальних об'єктів. Популярність таких сканерів зумовлена тим, що готові результати вимірювань з максимальною деталізацією зображення можна отримати вже через кілька годин, коли раніше на ці процедури йшло більше тижня. Серед ключових переваг лазерного сканування виділяють наступні:

- Максимально висота точність вимірювань;
- Тривимірну модель об'єкта можна отримати одразу після зйомки;
- Збираються дані значно швидше, ніж під час проведення традиційних польових геодезичних робіт;
- Похибки та відхилення від очікуваного результату виявити досить просто (треба порівняти отриманий результат з проектною 3D моделлю);
- Можна без ризику для життя вести зйомку в небезпечних та важкодоступних місцях (в цьому допоможуть БЛПА);
- Достатньо лише віртуальної зйомки методом повітряного сканування щоб отримати готовий цифровий топографічний план;
- Дистанційне зондування дає можливість працювати з архітектурними пам'ятками [23].

Варто зазначити, що лазерне сканування буде відігравати важливу роль для післявоєнної відбудови України. Через повномасштабне вторгнення в нашої держави знищено або пошкоджено багато об'єктів інфраструктури, які потрібно відбудовувати або будувати заново. Пришвидшити цей процес допоможуть технології лазерного сканування. Перед тим як розпочинати відбудову, потрібно швидко виявити такі об'єкти які потребують відновлення, а також провести планувальні роботи. Тут допоможуть геоінформаційні системи, за допомогою яких можна виявити геолокацію цих об'єктів. Якщо це важкодоступні місця, то можна туди направити дрони, котрі проведуть лазерне сканування місцевості.

Щоб успішно реалізувати ці проекти в майбутньому, потрібно провести оцінку ефективності управління будівельними проектами в умовах відновлення після закінчення бойових дій. За цими показниками можна визначити ефективність управління: результативність, якість виконуваних робіт, вартість, терміни реалізації, можливі ризики та ціна утримання цих будівель. Але щоб реалізувати ці проекти, також треба враховувати наступні особливості: наявність необхідних будівельних матеріалів, кадрове забезпечення команди проекту, забезпечення безпеки та умов праці робітників. [24, с.66-68].

Щоб все це реалізувати, потрібно врахувати такі фактори:

1. Наявність достатньої кількості коштів для виконання проекту, можливість взяти кредит, наявність державної підтримки.
2. Наявність новітніх технологій та сучасного обладнання, яке зможе проводити лазерне сканування.
3. Наявність фахівців високої кваліфікації в галузі будівництва та управління проектами.
4. Врахування інтересів та потреб населення.
5. Відсутність корупції в країні та стабільність політичної ситуації.

## **2.2. Технологічні особливості використання методів лазерного сканування в будівництві та проектуванні інфраструктурних проектів**

Зараз наземні лазерні сканери мають безліч функціональних можливостей. Цікавий той факт, що єдиної інструкції де описані етапи робіт та послідовність дій, не існує. Є лише інструкції до кожного окремого приладу.

Для сучасного будівництва лазерне 3D сканування стало ключовим інструментом, який полегшує проектування, будівництво та процес управління об'єктами. Технологія дозволяє без зайвих зусиль точно вимірювати поверхні об'єктів, моделюючи точну тривимірну модель будинків чи навколишньої місцевості за короткий проміжок часу. Завдяки цього обладнанню інженери та архітектори мають змогу отримати максимально розгорнуті дані про розміри, структуру та форму досліджуваних об'єктів. Це допомагає швидко розробити нові проекти чи удосконалити існуючі.

Завдяки використанню лазерного сканування скорочуються часові та ресурсні затрати. Після отримання результатів з'являється можливість планувати забудову ділянки, розміщення предметів всередині будівлі, прорахувати об'єми земляних робіт, розрахувати розміри складних інфраструктурних об'єктів (мостів, резервуарів, станцій метро), спрогнозувати ступінь розвитку несприятливих процесів (затоплення території, ступінь пошкодження будівель після бомбардувань, суми нанесених збитків внаслідок виверження вулканів тощо [25]).

Отримані тривимірні моделі можна використовувати для візуалізації різних проектів, як для замовників так і для проектувальників. За результатами лазерного сканування можна скласти чи відновлювати графічні документи (поверхові плани будинків, розрізи, креслення інженерних мереж та фасадів). Додатково можна створювати зовнішні та внутрішні моделі об'єктів, в тому числі елементи інтер'єру та екстер'єру. Кольорові панорамні зображення можна створити при проведенні інвентаризації та паспортизації об'єктів культурної спадщини.

Висока точність сканування дає можливість виявити невидимі дефекти або неоднорідності на поверхнях. Це допоможе уникнути потенційних труднощів на ранніх стадіях будівництва. За результатами 3D сканування є можливість вести облік елементів зовнішньої реклами (біл-бордів), кіосків, павільйонів торгових точок тощо [25].

Застосування лазерного сканування в будівництві та реалізації інфраструктурних проектів має такі переваги:

- Висока надійність планування;
- Ефективність та якість виконуваних робіт зростає в рази;
- Оптимізуються витрати;
- Управління даними здійснюється централізовано;
- В програмному забезпеченні доступна спільна робота всіх учасників проекту;
- Зменшується кількість правок на етапі проектування;
- Ефективність робіт стає вищою на всіх етапах будівництва;
- Вже на стадії проектування помітні помилки, які можна швидко усунути;
- Всі зміни автоматично імпортуються до єдиної системи.

Проекти будь-якого масштабу можна реалізувати за допомогою лазерного сканування. Лазерне сканування корисне для таких галузей будівництва:

- Дорожньо-будівельне планування;
- Побудова цивільних об'єктів;
- Будівельні послуги та керування об'єктами нерухомості;
- Архітектура та інженерія [26, с. 17-19].

Спільна робота всіх учасників проекту в будівельній галузі необхідна для успішної організації процесу – від початкової ідеї до здачі об'єкта в експлуатацію.

Тривимірне лазерне сканування все ще залишається маркетинговим ходом, але все одно йде активний перехід до цих технологій, бо вони

відкривають багато перспектив. Головна перепона це перехід від 2D проектування будівель і споруд до 3D проектування. Якщо порівнювати це з іншими сферами, то це можна прирівняти до переходу на новий стандарт зв'язку з 4G(LTE) до 5G (високошвидкісного супутникового зв'язку та інтернету). Перехід до проектування в тривимірному просторі дозволяє технологія лазерного сканування. Цей перехід зекономить час і кошти на розробку та реалізацію проекту.

Всі заміри та оформлення тривимірних моделей проводяться згідно зі стандартами ДСТУ Б А.2.4-4:2009. Результати виконаних замірів оформлюються в єдиній системі координат та висот[27, с. 34-35].

Системи лазерного сканування доцільно використовувати для моделювання 3D зображень об'єктів в програмі Revit, або в інших програмних продуктах, які згадувалися в другому розділі. Після того як цю модель створено, можна її сформувані в 2D-креслення щоб в подальшому моніторити стан будинків та міських територій, а також виявляти можливі дефекти та пошкодження в процесі реконструкції, реновації та експлуатації.

Перед тим, як застосовувати лазерне 3D-сканування в будівництві, варто звернути увагу на такі нюанси:

- Дослідження хмар точок та процес зйомки дороговартісний;
- Велика кількість роботи при обробці результатів сканування;
- Лазерні сканери коштують не дешево;
- Якщо будинок має великі розміри, то для повного створення тривимірної моделі може знадобитися до трьохсот сканувань.

Для малих проектів технологія лазерного сканування не є ефективною. Ефективність буде високою, якщо проектом вирішила зайнятися велика компанія. Особливо це актуально при дослідженні будівель, що мають архітектурну цінність. Також варто зазначити, що вартість лазерних сканерів з кожним роком знижується. Їх використання може призвести до технічної революції в сфері будівництва [27, с. 35-36]. Скоро використання лазерної

зйомки стане звиним явищем для будь-яких будівельних проектів, але для цього треба ще почекати.

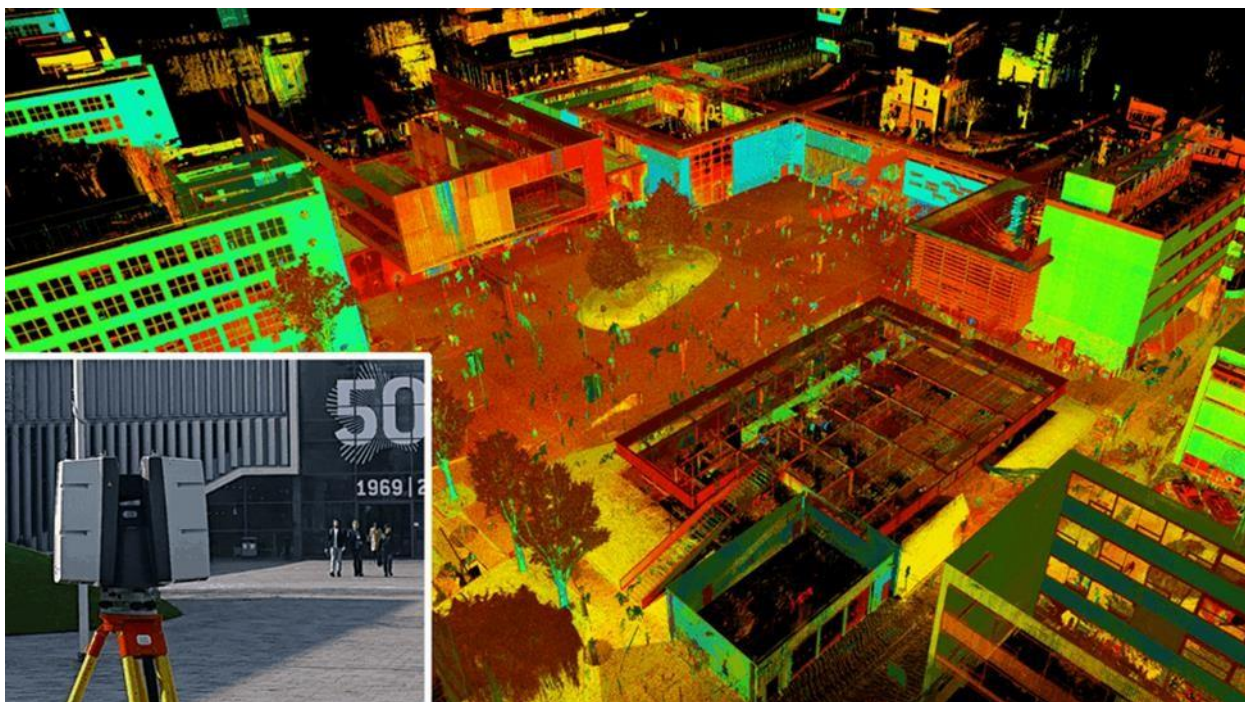


Рис. 2.1. Приклад роботи лазерного сканера при скануванні будівель [37].

### 2.3. Недоліки лазерного сканування

Крім переваг, лазерне сканування має ряд недоліків. Проблеми часто виникають з форматуванням даних, оскільки вони можуть бути неправильно відображені на пристрої, або неповними. Ще проблемою є те, що кожна програма, яка налаштована читати дані лазерного сканування, зберігає свої результати в певних форматах. Тобто один розробник програмного забезпечення заклав одні формати, а інший розробник зовсім інші. Тому щоб цих проблем не виникало, потрібно зробити інтеграцію різних системних продуктів та привести всі дані лазерних зйомок до єдиного формату.

Також при дослідженні технологій лазерного сканування було помічено, що при проведенні зйомки всіх видимих поверхонь спостерігаються спотворення, які не дають передати суть об'єкта в повній мірі. Також

користувачі програмного забезпечення різних компаній помічали, що будівлі сканують зі щільністю 5мм на одну точку. Через це фактор, файли сканування ставали настільки великими, що їх не зручно було зберігати та передавати на інші пристрої [28, С. 254].

Незважаючи на те, що лазерне сканування має багато переваг, воно все ще обережно застосовується в інженерній геодезії. Для цієї галузі така технологія все ще є додатковим помічником, а не основним засобом.

За результатами інших досліджень було встановлено, що проблеми лазерного сканування також можуть виникати через вплив атмосфери на потік лазерних променів, що спричинює зниження якості сканування. Серед негативних впливів атмосфери на лазерне сканування, у статті Х.В. Бурштинської, А.В. Бабушки відмічено наступні фактори: астрономічна рефракція; турбулентне викривлення лазерних променів; а також послаблення випромінювання, яке викликане розсіюванням та поглинанням. Послаблення лазерного випромінювання лазерного променя відбувається за рахунок молекулярного розсіювання на молекулах газу; аерозольного поглинання та селективного поглинання газовими компонентами. Світові дослідження лазерного сканування показали, що атмосфера істотно впливає на зниження сигналу лазерного променя.

В ході досліджень по всьому світу, було виявлено типи оптичної погоди, сприятливої для лазерного сканування:

- Серпанок з метеорологічною дальністю видимості  $S_m \geq 3$  км;
- Серпанок з туманом з характерними показниками  $1 \text{ км} \leq S_m \leq 3 \text{ км}$ ;
- Хмари та тумани  $S_m < 1$  км [29, с. 50-51].

Типовими умовами для проведення лазерної локації є серпанки та туманні серпанки, оскільки 90% часу атмосфера перебуває саме в таких станах. Щоб дізнатися інтегральний вплив атмосфери на якість лазерного сканування, виділили основні періоди, пов'язані зі змінами сезонів. І було знайдено, коли атмосферні серпанки є однотипним явищем: весняно-осінній, літній та зимовий. Показники цих серпанків продемонстровано в таблиці 2.1,

куди віднесено спеціальні емпіричні показники  $k_0$ ,  $k_1$ ,  $k_2$ , значення яких було здобуто експериментально.

Таблиця 2.1. Значення емпіричних коефіцієнтів  $k_0$ ,  $k_1$ ,  $k_2$  [29, С. 51].

Періоди	Тип аерозолю	$k_0$	$k_1$	$k_2$
Зимовий	«Крижаний серпанок»	0.248	0.447	1.24
	Серпанок зі снігом	0.770	0.145	1.24
	Зимовий серпанок	0	0.580	1.24
Весняно-осінній	Серпанок із мжичкою	0.275	0.455	1.09
	Туманний серпанок	0.116	0.690	0.56
	Стійкий серпанок	0.040	0.585	1.02
Літній	Після сильного дощу	0	0.400	0.188
	Стійкий серпанок	0.060	0.360	1.88

Також щоб розуміти, чи можливо максимально ефективно проводити процедури лазерного сканування в конкретний час, потрібно орієнтуватися на погодні умови конкретного регіону, в якому планується його проводити. Цей фактор враховується тільки тоді, коли дослідження проводиться на вулиці, на якість роботи в приміщенні ці показники не впливають. Щоб правильно розрахувати підходящі умови для лазерного сканування, потрібно ознайомитися з міжнародною шкалою видимості, дані з якої наведені в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2. Міжнародна шкала видимості [29, С. 51].

Характеристика видимості	Бали	Інтервали видимості в м	Умови видимості
Дуже погана	0	0-50	Максимально потужний туман
	1	50-200	Сильний туман чи дуже густий сніг
	2	200-500	Середній туман чи інтенсивний сніг
Погана	3	500-1000	Слабкий туман, розмірений сніг чи сильний серпанок
	4	1000-2000	Розмірений сніг, розмірений серпанок чи сильний дощ
Середня	5	2000-4000	Слабкий сніг, інтенсивний дощ чи слабкий серпанок
	6	4000-10000	Розмірений дощ, дуже слабкий сніг чи слабкий серпанок
Добра	7	10000-20000	Слабкий дощ або взагалі без опадів
Дуже добра	8	20000-50000	Відсутність опадів
Надзвичайна	9	Більше 50000	Повністю чисте повітря

Згідно з даними різних спостережень, можна зробити висновок, що найкраще проводити лазерне сканування в літній період. Тому якщо проводити лазерне сканування на вулиці за несприятливих умов, то інтенсивність сигналу може знижуватися в 5-7 разів.

Також є додаткові фактори, які спричинюють похибки та проблеми під час проведення інженерно-геодезичних робіт. Як відомо, для досягнення максимальної точності сканування потрібно зробити так, щоб всі компоненти сканера повинні мати ідеальні характеристики. Правда таких не існує. є просто сканери з базовими компонентами, а є з покращеними характеристиками. Але таке обладнання дороговартісне. Ціна сканера ще залежить від задач, для яких він призначений. В таблиці 2.3 відмічено як різні фактори можуть знижувати точність сканування.

Таблиця 2.3. Вплив умов сканування на точність дослідження [30, с. 31-32].

Ідеальні умови	Неідеальні умови	Результат неідеальних умов
Об'єкт сканується перпендикулярно його поверхні	Сканування проводиться під кутом	Знижується точність та деталізація
Калібрувальне поле вимірюється при поточній температурі	Сканування проводиться в прохолодному або жаркому приміщенні	Результат буде відрізяти від реальних характеристик об'єкта
Сканер прогріто до робочої температури і потім калібрується	Сканер не прогріто до робочої температури	Всі вимірювання вже будуть з невеликими похибками
Камери розсунуто на рекомендовану дистанцію	Камери зрушено з метою сканування западин	Великий рівень шуму під час отримання даних
Зовнішнє освітлення не впливає на роботу	Яскраве спрямоване зовнішнє освітлення	Неможливість виконати роботу або підвищений рівень шуму
Твердий об'єкт	Об'єкт, який піддається деформації	Фрагменти зняті з різних ракурсів погано поєднуються і спотворені
Світлий об'єкт	Темний об'єкт	Збільшується рівень шуму в даних і сканер працює повільніше
Нерухомий об'єкт	Рухається об'єкт чи сканер	Рухи спотворюють результати
Матовий об'єкт	Блискучий чи напівпрозорий об'єкт	Поганий або незадовільний результат сканування, якщо не покрити його матуючим спреєм

Закінчення таблиці 2.3

Ідеальні умови	Неідеальні умови	Результат неідеальних умов
Гладкий об'єкт	Об'єкт з гострими ребрами	Варто правильно обирати положення лазера стосовно ребер об'єкта
Об'єкт без країв, впадин та отворів	Об'єкт має впадини, краї листового матеріалу чи отвори	Край тонкого листах при 3D скануванні обривається, та не доходить до реальної межі об'єкта
Гарні геометричні особливості об'єкта	Об'єкт має вигородження (кулька, рейка, площина)	Окремі фрагменти неможливо якісно поєднати, оскільки точність без використання маркерів стає не контрольованою
Об'єкт всією площею поміщається в область сканування	Об'єкт сканується частинами, бо має великий розмір	При поєднанні частин об'єкта виникають додаткові помилки, кількість яких може збільшуватися

### 3.4. Перспективи розвитку технологій лазерного сканування

Технології лазерного сканування все більше застосовуються в різних сферах. Для інженерної геодезії це досить перспективний напрямок. І якщо стоїть завдання зйомки місцевості, зруйнованих будинків чи пам'яток архітектури, то доцільно використовувати дрони. Вони значно пришвидшать роботи. Про використання БЛПА вже згадувалося в попередніх матеріалах, проте узагальнено. Зараз використання дронів для цілей лазерного сканування буде розглянуто детально.

В перспективі їх можна використовувати для моніторингу та інспекції об'єктів. Сюди можна віднести будинки, інфраструктуру, мости. За допомогою дронів, які оснащені лазерними сканерами та камерами, що працюють в високому розширенні, можна проводити регулярні огляди різних об'єктів та виявляти потенційні проблеми. Цей моніторинг допоможе продовжити термін служби об'єктів та допоможе запобігти аваріям на об'єктах.

Також важливим напрямком розвитку технологій лазерного сканування є екологічний моніторинг. Головна задача безпілотників слідкувати за: станом водойм, лісових масивів, земельних угідь та за довкіллям в цілому. Це дослідження буде дозволяти оперативно вживати заходів щоб покращити екологічну ситуацію [31, с. 18-19].

Серед технологічних перспектив варто виділити розвиток сенсорів та камер, збільшення автономності та використання штучного інтелекту для покращення якості зображень місцевості та усунення можливих дефектів лазерного сканування та інтеграція з ГІС.

Вдосконалення сенсорів та камер є одним з пріоритетних напрямків розвитку БЛПА для цілей лазерного сканування. Завдяки сучасним розробкам вже в недалекому майбутньому можна отримувати зображення с високою роздільною здатністю та використовувати різні типи сенсорів, які дозволять розширити можливості використання безпілотників у геодезії.

Нові перспективи для застосування безпілотників в геодезії, та інженерній геодезії зокрема, дасть розвиток технологій штучного інтелекту та автономності. Автономні БЛПА зможуть виконувати складні завдання без участі людини. Таким чином, дрони зможуть скоро самостійно планувати маршрути та проводити аналіз зібраних даних.

Якщо інтегрувати БЛПА з ГІС, то вони зможуть збільшити можливості аналізу та візуалізації даних. Отримані дані з дронів можна буде легко інтегрувати в ГІС, що полегшить процес обробки та аналізу інформації, а також розширить перспективи створення більш точних та інформативних карт [31, с. 19-20].

Використання БЛПА в геодезії відкриє нові можливості для покращення якості та ефективності робіт. Висока точність даних, економія часу та ресурсів є ключовими факторами щодо застосування безпілотників для лазерного сканування. Розвиток їх сенсорів, технологій штучного інтелекту та процес інтеграції з ГІС дають можливість подальшого вдосконалення та розширення сфери застосування БЛПА при лазерному скануванні різних видів об'єктів. В

найближчі роки очікується збільшення застосування цих технологій та появи нових технологічних рішень, які зроблять геодезичні роботи більш ефективними та дешевими.

Також в перспективі лазерне сканування допоможе ефективно сканувати пам'ятки архітектури. Для цього застосовуються різні методи сканування. Кожен метод має свої особливості. Серед таких методів варто розглянути фотограмметричний метод, як один з перспективних. Моніторити пам'ятки архітектури можна за допомогою 3D сканування. Але досягнута точність сканованого об'єкта не завжди відповідає допустимому діапазону. Тому розробки лазерних факторів намагаються покращити характеристики сканерів, щоб вони могли детально передавати всі особливості архітектурних пам'яток.

Також можна генерувати 3D моделі за допомогою фотограмметричного методу, проте при їх створення виникають спотворення. Тому в цьому напрямку теж працюють учені. Але незважаючи на свої недоліки, фотограмметричний метод є найбільш перспективним для моніторингу об'єктів культурної спадщини. За допомогою цього методу можна швидко складати відносно точні моделі пам'яток культури. Проте лазерне сканування більш ефективно фотограмметричного методу і теж постійно розвивається [32, с. 130-132].

Також лазерне сканування може стати перспективним напрямком для проектування доріг. Звісно цей процес буде значно пришвидшено з використанням БЛПА. Також БЛПА допомагають фотографувати розташування ворога щоб знищити його підрозділи, і після успішної роботи вогневих груп, за допомогою лазерного сканування можна побачити ефективність ураження ворожої сторони.

Україна нині, як і будь-яка інша країна світу потребує високоточного геодезичного обладнання для покращення обороноздатності та повоєнного відновлення об'єктів. Також за допомогою лазерного сканування в перспективі можна проводити ефективне управління території [32, с. 157-158].

## ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2

В цьому розділі розглянуто перспективи лазерного сканування, структуру використання лазерного сканування в будівництві та при розробці та обслуговуванні інфраструктурних проектів, описано недоліки лазерного сканування та розглянуто перспективи використання лазерного сканування (описано хід лазерного сканування сходів для подальшого проектування та встановлення скляної огорожі).

Технологія дозволяє без зайвих зусиль точно вимірювати поверхні об'єктів, моделюючи точну тривимірну модель будинків чи навколишньої місцевості за короткий проміжок часу. Завдяки цьому обладнанню інженери та архітектори мають змогу отримати максимально розгорнуті дані про розміри, структуру та форму досліджуваних об'єктів. Це допомагає швидко розробити нові проекти чи удосконалити існуючі.

Отримані тривимірні моделі можна використовувати для візуалізації різних проектів, як для замовників так і для проектувальників. За результатами лазерного сканування можна складати чи відновлювати графічні документи (поверхові плани будинків, розрізи, креслення інженерних мереж та фасадів). Додатково можна створювати зовнішні та внутрішні моделі об'єктів, в тому числі елементи інтер'єру та екстер'єру. Кольорові панорамні зображення можна створити при проведенні інвентаризації та паспортизації об'єктів культурної спадщини.

Крім переваг, лазерне сканування має ряд недоліків. Проблеми часто виникають з форматуванням даних, оскільки вони можуть бути неправильно відображені на пристрої, або неповними. Ще проблемою є те, що кожна програма, яка налаштована читати дані лазерного сканування, зберігає свої результати в певних форматах. Тобто один розробник програмного забезпечення заклав одні формати, а інший розробник зовсім інші. Тому щоб цих проблем не виникало, потрібно зробити інтеграцію різних системних продуктів та привести всі дані лазерних зйомок до єдиного формату.

Також при дослідженні технологій лазерного сканування було помічено, що при проведенні зйомки всіх видимих поверхонь спостерігаються спотворення, які не дають передати суть об'єкта в повній мірі.

Технології лазерного сканування все більше застосовуються в різних сферах. Для інженерної геодезії це досить перспективний напрямок. І якщо стоїть завдання зйомки місцевості, зруйнованих будинків чи пам'яток архітектури, то доцільно використовувати дрони. Вони значно пришвидшать роботи.

Використання БЛПА в геодезії відкриє нові можливості для покращення якості та ефективності робіт. Висока точність даних, економія часу та ресурсів є ключовими факторами щодо застосування безпілотників для лазерного сканування. Розвиток їх сенсорів, технологій штучного інтелекту та процес інтеграції з ГІС дають можливість подальшого вдосконалення та розширення сфери застосування БЛПА при лазерному скануванні різних видів об'єктів.

## **Розділ 3. ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ ЛАЗЕРНОГО СКАНУВАННЯ**

### **3.1. Лазерне сканування сходів для подальшого проектування скляного огороження**

Лазерне сканування відноситься до новітніх технологій, яка дозволяє швидко та точно отримати просторові дані про сканований об'єкт. У випадку проектування скляного огороження для сходів, цей спосіб забезпечить високу точність вимірювань, що є важливим фактором для виготовлення та монтажу скляних конструкцій.

Процес сканування сходів дає можливість зробити вимірювання для подальшого встановлення скляної огорожі, яка додасть більше природного освітлення та збільшить відчуття безпеки у людей, які мають проблеми із зором.

Перед проведення сканування потрібно налаштувати сканер та переконатися чи він правильно сканує задані об'єкти. Результати сканування зберігаються у точковому форматі. Після того як сходи відскановано, потрібно переконатися чи 3D модель відповідає їх реальному зображенню. Картографування скляних предметів з метою створення їхньої тривимірної моделі, викликають деякі сумніви. Хоча якщо проектувати скляні огорожі під час сканування сходів без наявності біля них відбиваючих поверхонь, то можна зробити достатньо точні знімки. Моделювання скляних поверхонь робиться здебільшого за допомогою програми Revit [38, с. 117].

Додаток Revit дає змогу створювати інформаційне моделювання об'єктів. За допомогою цього програмного забезпечення можливо змоделювати скляні фасади і будь-які види скляних огорож, в тому числі і для сходів. Скляні огорожі для сходів додають не тільки естетичного вигляду сходовому майданчику, але й підвищують безпеку пересування. Положення

станції лазерного сканування та робоче креслення конструкції скляної огорожі відображено на рисунках 3.1-а та 3.1-б відповідно.



Рис. 3.1-а. Положення станції лазерного сканування [40].

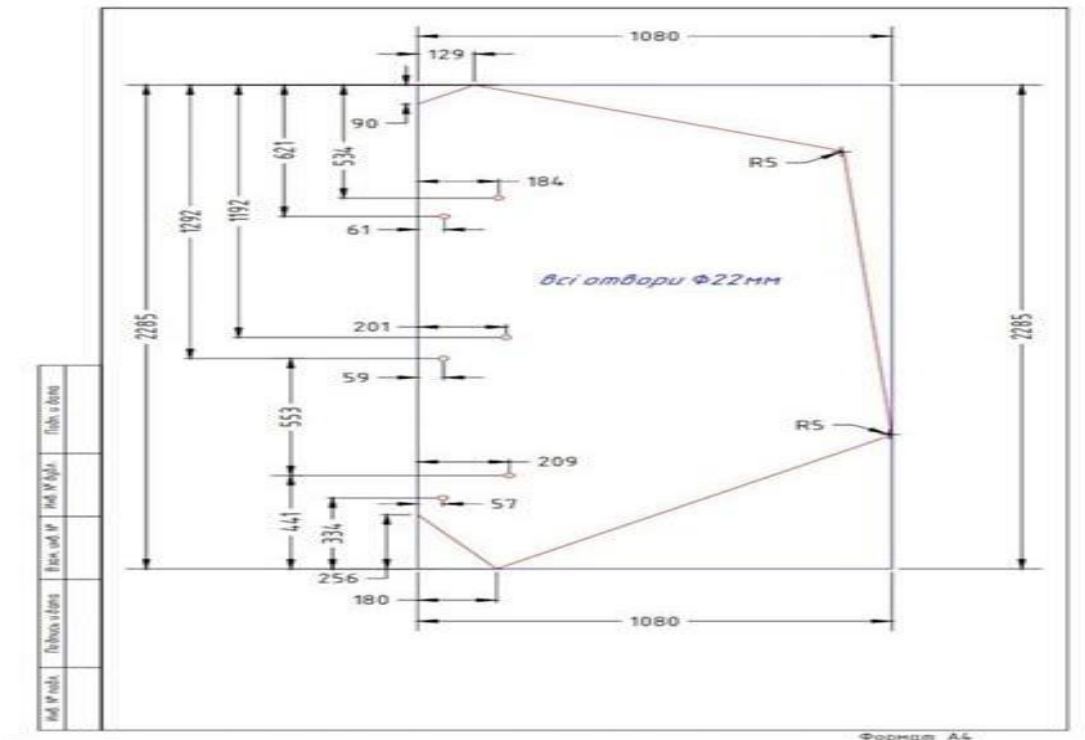


Рис 3.1-б. Робоче креслення конструкції скляної огорожі [40].

На рисунку 3.2. показано, як буде виглядати створена модель сходів в результаті сканування.

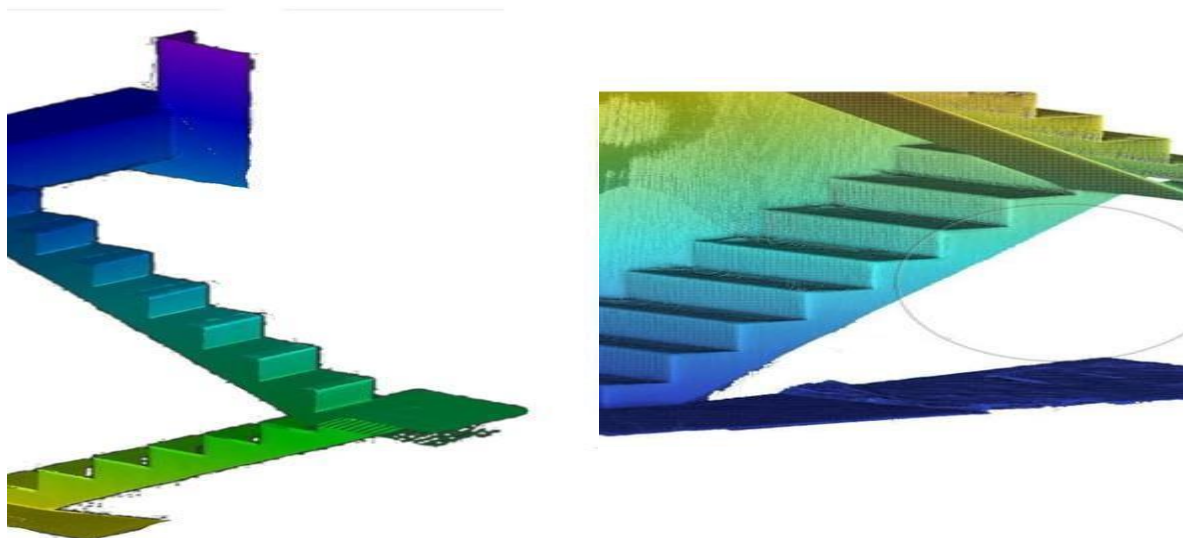


Рис. 3.2. Створена модель сходів в результаті сканування [40].

Після проведення сканування та створення моделі сходів, позначаються місця кріплення анкерних болтів. Їх відмічено на рисунку 3.3.

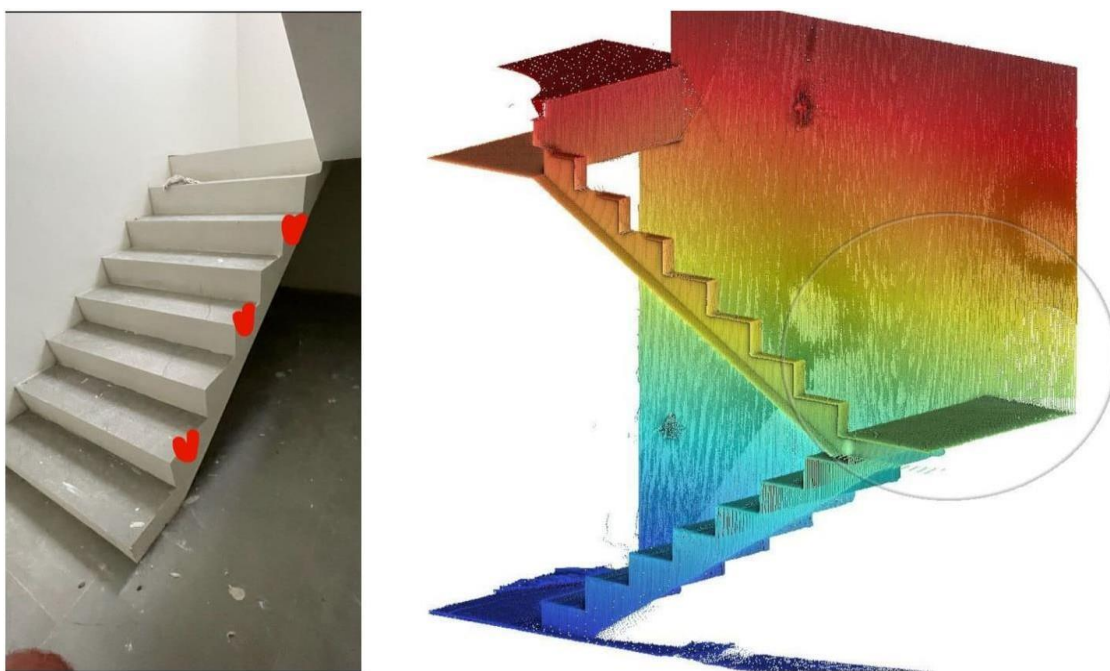


Рис. 4.3. Цифрова модель сходів із позначками місць кріплення анкерних болтів [40].

Після закінчення всіх процедур сканування та позначення місць кріплення анкерних болтів, створюється цифрова модель проекту скляної огорожі сходові. Готова цифрова модель сходові позначена на рисунку 3.4.

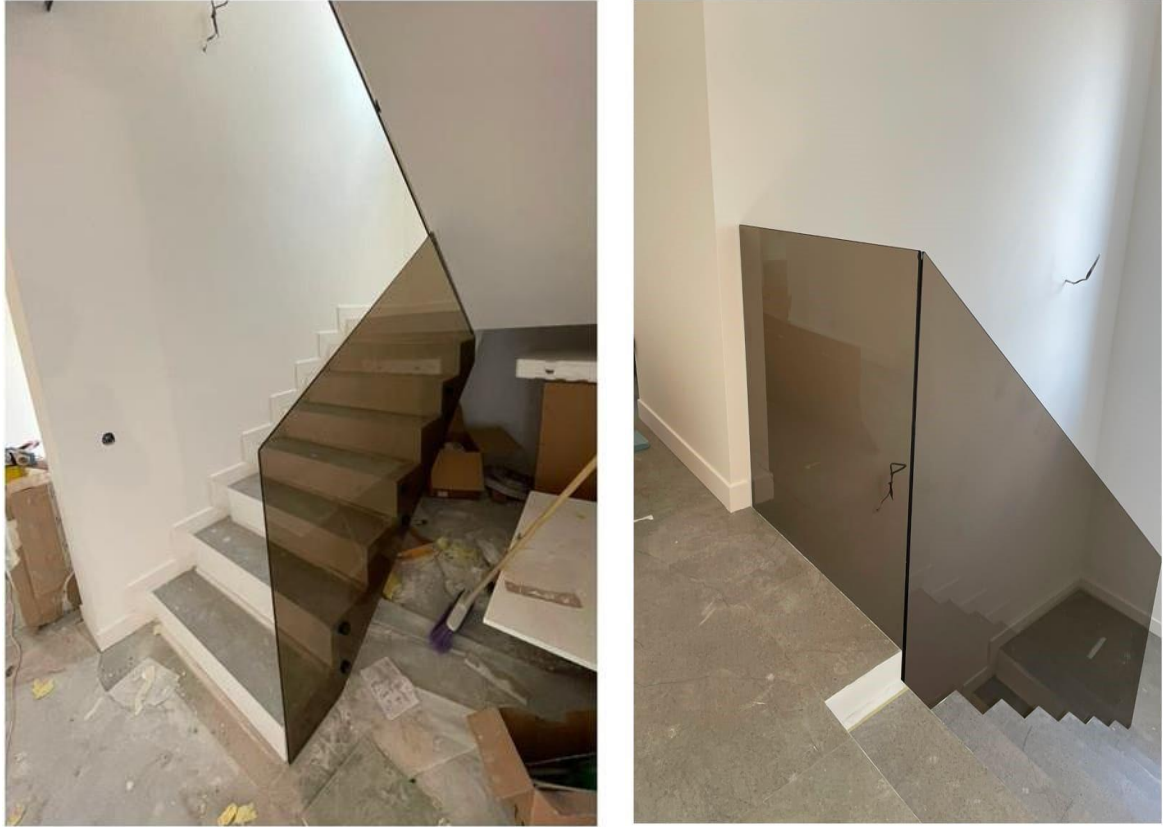


Рис. 3.4. Цифрова модель проекту скляної огорожі сходові [40].

Цифрову скляну модель об'єкта створити значно складніше, ніж провести його звичайне сканування. Однак технологія тривимірного лазерного сканування набуває все більшої популярності при будівництві скляних об'єктів. Зокрема скляні огорожі зараз будують на сходах торгових центрів, футбольних стадіонах, на місцях для проведення змагань з легкої атлетики, біатлону тощо.

### 3.2. Етапи лазерного сканування сходів

Технологія тривимірного лазерного сканування корисна як для геодезиста так і для самого клієнта. Скляні огорожі методом лазерного сканування можуть проектуватися для закладів освіти, охорони здоров'я, великих спортивних арен тощо. За допомогою лазерного сканування є можливість навіть створювати декоративні перила. Це ноу-хау не тільки підвищить безпеку, але й покращити зовнішній вид конструкції [39].

Для проведення сканування сходів з метою створення скляної огорожі, потрібно пройти кілька етапів:

#### **1) Оцінюється об'єкт та визначається оптимальна точка розташування лазерного сканера.**

Перед тим як проводити сканування, детально оглядається об'єкт та оцінюється стан навколишнього середовища. Під час аналізу слід врахувати наступні нюанси:

- ✓ Аналізуються форми та розміри об'єкта – об'єкти великих розмірів або складної форми можуть потребувати багаторазового сканування.
- ✓ Матеріал поверхні – прозорі чи дзеркальні поверхні можуть негативно впливати на якість сканування та відсіювати частину інформації.
- ✓ Перепони в секторі сканування – наявність в полі сканера додаткових об'єктів можуть перешкоджати роботі сканера (люди, транспорт, стовпи, дерева).
- ✓ Доступність місця для установки сканера – треба обирати такий ракурс, з якого можна отримати найбільше інформації з мінімальною кількістю перестановок.

#### **2) Виконується 3D-сканування сходів із використанням лазерного сканера високої точності**

Після завершення підготовки проводиться сам процес сканування. Перед початком зйомки обов'язково налаштовується сканер. Для цього встановлюються наступні параметри:

- Роздільна здатність – визначається щільність хмар точок;
- Діапазон дії лазера – залежить від наявності можливих перепон та від параметрів об'єкта;
- Швидкість сканування – оптимізується залежно від того, яка точність потрібна.

Для проведення сканування виконуються наступні дії:

- Лазерний промінь вимірюють сканером та відбивають від поверхні сходів;
- Дистанція до кожної точки фіксується на основі часу обміну;
- Йде формування тривимірних хмар точок, які зберігають точні координати кожного елемента об'єкта;
- Якщо у об'єкта присутні тіньові зони або він складний за будовою, то сканування проводиться з кількох точок.

### **3) Зберігаються детальні хмари точок**

Проводиться обробка отриманих даних:

- Отримані хмари точок зберігаються в спеціальних форматах, які доступні в програмі;
- Проводиться попередня фільтрація даних – прибираються зайві точки, які утворюються унаслідок шуму або через відбиття від нецільових поверхонь;
- Реєструється (суміщення) хмарного потоку, отриманого з різних місць розташування сканера.

Зберігаються геометричні параметри:

- Точна геометрія сходів зберігається у хмарі точок, включно з їхніми кутами нахилу, розмірами, радіусами заокруглення тощо;

- При необхідності дані конвертуються в 3-D модель чи використовуються для подальших креслень [40].

#### **4) Обробка отриманих даних**

Після того, як завершилося сканування, отримані хмари точок слід обробити з метою створення точного цифрового знімку сканованого об'єкта. Для створення єдиної цифрової моделі об'єкта об'єднують окремі його скани, якщо сканування велося з різних точок.

Головні етапи об'єднання точок виглядають так:

- Проводиться геометричне вирівнювання – використовуються маркери або природні спільні точки для суміщення окремих сканів;
- Автоматична реєстрація – деякі програмні продукти можуть здатні автоматично підключати скани на основі накладання частин об'єкта (наприклад, Autodesk Recap, Faro Scene, Leica Cyclone);
- Точне коригування вручну – ручне коригування виконується у випадку помилки з реєстрацією;
- Оптимізація вирівнювання – проводиться перевірка суміщення та виправляються помилки у прив'язці даних.

#### **5) Видалення зайвих елементів та очищення від шумів**

Під час сканування іноді з'являються зайві точки у зв'язку з:

- Перепонами в зоні сканування;
- Присутністю в зоні сканування рухомих об'єкт включаючи транспорт чи людей;
- Лазер відбивається від блискучих поверхонь.

Для видалення шумів застосовуються методи очищення:

- Фільтрація шумів – автоматичне фільтрування та видалення точок, які розрізнені, та не відповідають геометрії об'єкта;

- Обрізка зайвих елементів – усуваються об'єкти, що не відносяться до основної моделі об'єкта (меблі, рослини, тимчасові конструкції);
- Гармонізація хмари точок – точки усереднюються до згладжування нерівностей та підвищення точності.

## **б) Перетворення хмари точок у тривимірну модель**

Після того як хмари точок очистили та об'єднали, проводиться перетворення її у зручний формат для подальшої візуалізації, проектування чи розрахунків. Основними методами перетворення є:

- Створення полігональної моделі. Поверхня будується за допомогою алгоритму Делоне, або застосовується метод триангуляції. Для кращої візуалізації модель згладжують або деталізують.
- Перетворення в BIM або CAD-модель. Для перетворення в параметричні об'єкти застосовують такі програми як AutoCAD, Revit, Geomagic Design X. В цих програмах можна створювати креслення та 3D-геометрію та проводити векторизацію з можливістю редагування.
- Додавання текстур та кольорів. Їх можна накладати у випадку, якщо підтримує цю функцію. Накладання кольорових текстур допоможе створити реалістичний вигляд об'єкта.

Після проведення всіх етапів обробки вихідні дані можна використовувати для виконання інженерних та архітектурних завдань. Кінцеві дані обробки включають:

- Єдину очищену хмару точок, яка відображає реальну геометрію сходів;
- 3D-модель, яка доступна для аналізу, проектування та реконструкції;

- BIM-модель, котра інтегрується з будівельними інформаційними системами;
- Ортогональні проекції, креслення та плани, спроектовані на основі отриманих показників;
- Можливість проведення точних вимірювань кутів нахилу сходів, ширини та висоти.

Отримані дані також можна застосовувати в інших напрямках:

- 1) Будівельний моніторинг для контролю змін у конструкції сходів;
- 2) Використання цифрових моделей для реконструкції або відновлення пошкоджених об'єктів, або тих, що мають історичну цінність;
- 3) Проектування нових конструкцій за допомогою 3D-дизайну та планування;
- 4) Використання для візуалізації в системах віртуальної та доповненої реальності.

### **7) Створення робочої документації**

Технічна документація готується одразу після створення 3D-моделі, яку потім використовують для будівництва, реконструкції чи виготовлення певних елементів конструкції, таких як скляну огорожу [40].

### **3.3. Результати лазерного сканування сходів**

Після закінчення лазерного сканування сходів створюється автоматичне та ручне креслення:

- Генерацію креслень можна виконати в AutoCAD, Revit, SolidWorks, ArchiCAD;
- Будуються плани, розрізи та фасади на основі хмари точок чи полігональної моделі;
- Виділяються головні елементи сходів, такі як ступені, кріплення та майданчики.

Формуються розрізи:

- Визначаються опорні точки для встановлення скляного огороження;
- Аналізується навантаження точок кріплення та потенційних відхилень від вертикалі;
- Генеруються деталізовані вузли (деякі з них для виробництва та монтажу).

В результаті буде отримано DWG, PDF чи інші формати креслень для будівельників чи виробників. Формування технічних специфікацій для виготовлення скляного огороження виглядає наступним чином:

- Ведеться розрахунок інших матеріалів. Сюди включено: визначення типу скла; аналіз товщини скла, яке витримає розрахункове навантаження; підбір кріпильних елементів.
- Формується специфікація у вигляді таблиці розрізів та параметрів скла; вказується спосіб монтажу та тип використовуваних кріплень; описуються вимоги стосовно обробки країв скла.

В результаті буде отримано документ в форматі Excel, PDF з переліком матеріалів, які необхідні для виготовлення виробникам. Після того, як робочу документацію створено, її передають замовнику. Він в свою чергу, може нею користуватися для проектування, виготовлення та монтажу скляного огороження для сходів.

Готові тривимірні моделі можна передавати у таких форматах:

- IFC, DWG, STEP, IGES та DXF для архітекторів та інженерів;
- OBJ, FBX, STL для візуалізації та презентацій;
- DXF та PDF для розкрою скла на ЧПУ та для перегляду креслень без спеціальних програм.

В результаті замовник отримує набір файлів, які підійдуть йому для проектування та виробництва.

Під час формування креслень виробництва та монтажу потрібно дотримувати цих правил:

- Робочі креслення створюються з точними розмірами скла та місцями отворів для кріплень;
- Для розуміння точного розташування деталей потрібно відобразити розрізи та вузли;
- Слід врахувати специфіку матеріалів (герметики, ущільнювачі, кріплення; тип скла.

Рекомендації для монтажу:

- Обрати спосіб кріплення скла;
- Встановити допуски та зазори для компенсації температурних деформацій;
- Слід послідовно пройти етапи встановлення: підготовка місця, фіксація, герметизація;
- Важливо захистити кромки та перевірити навантаження на конструкцію.

В результаті клієнт отримує повний пакет креслень та технічних рекомендацій для правильної установки скляного огороження [40].

### **3.4. Проблеми при скануванні скляних поверхонь та під час виготовлення кріплень до них**

Лазерне сканування скляних поверхонь є досить складним та трудомістким процесом. Складність такого виду сканування зумовлена тим, що скло має високу відбивну здатність та може спровокувати спотворення під час сканування або взагалі призвести до втрати даних під час сканувальних процедур.

Похибки наземного лазерного сканування розділяють на кілька типів. Інструментальні. Вони повторюються випадково та систематично. Ступінь цих похибок залежить від конструкції сканера. Оскільки наземні

лазерні сканери складаються з двох блоків, і похибки бувають відповідними. Існують похибки віддалемірного та кутомірного блоку.

Серед джерел, які спричинюють похибки через певні властивості об'єкта сканування, де відбивна здатність поверхні об'єкта, оскільки сканер працює без «відбивача». До відбивної здатності об'єктів відносять такі чинники: вологість та температура об'єкта; довжина хвилі та кут падіння лазерного променя; колір об'єкта; магнітна та електрична проникність; електропровідність. Точність випромінювання знижується при скануванні темних об'єктів, оскільки вони поглинають більшу частину лазерного променя. Якщо сканувати яскраві об'єкти з високим коефіцієнтом відбиття, то можна отримати більш точні результати вимірювання [41, С. 42].

Похибки пов'язані з прив'язкою хмар точок до системи координат виникають через те, що невірно обираються параметри сканування. Також похибки можуть бути спричинені під час камеральної обробки даних. Незважаючи на те, що більшість виробників надають технічну інформацію про свої прилади, все одно треба проводити експерименти для перевірки точності даних.

Уникнути похибок, що спричинені з методикою сканування, рекомендовано шляхом встановлення кроку сканування, який рівний приблизно 86% від величини діаметру лазерного променя та максимального кута падіння, котрий не може перевищувати 65° [41, с. 42-43].

Як відомо, скляні огороження є новинкою у світі дизайну інтер'єру, особливо при створенні скляної огорожі для сходів. Скляні огорожі роблять будь-яке приміщення стильним, просторим та оригінальним.

Серед переваг створення скляних огорож виділяють наступні:

- Такі огорожі не створюють відчуття замкнутого простору;
- Вони мають гарну звукоізоляцію;
- Матеріал для скляних огорож виготовляється із екологічно безпечного матеріалу;
- Мають властивість покращувати якість освітлення в приміщенні.

Однак незважаючи на ряд переваг при скануванні скляних поверхонь та при виготовленні кріплень до них все одно виникає багато проблем. Однією з таких проблем є прозорість та сильна відбиваюча здатність в хаотичних напрямках. Якщо скляні поверхні є гладкими, то це спричинює погіршення якості кінцевого результату, оскільки такі поверхні часто не мають достатньої текстури.

Кріплення також виготовляти до скляних поверхонь проблематично, оскільки вони є крихким матеріалом, а додаткові точкові навантаження можуть спровокувати тріщини [42].

Після проведення сканування та виготовлення скляних конструкцій і кріплень до них, починається етап встановлення. І тут можуть виникнути проблеми, оскільки ці конструкції достатньо крихкі, а кріплення до них повинні бути непомітними щоб не псувати інтер'єр.

Після виготовлення деталей, проводять контрольний замір, щоб нейтралізувати можливі похибки. На цьому етапі проводиться планування встановлення всієї конструкції.

Далі йде підготовка елементів кріплення. Основну роль в процесі установки конструкції відіграє каркас. Правильне його виготовлення є гарантією безпеки всієї конструкції. Елементи кріплення встановлюють відповідно до особливостей будівельного матеріалу. Під час установки скляних конструкцій потрібно забезпечити чистоту на будівельному майданчику.

Після перевірки всіх елементів конструкції на відповідність технічним вимогам, можна починати монтаж стійок та напрямних. На цьому етапі потрібно робити все правильно з прорахуванням усіх деталей. Всі кріплення потрібно надійно зафіксувати, але важливо робити це уважно та обережно, оскільки навіть мінімальна помилка може призвести до тріщин та неможливості в подальшому безпечно встановити каркас.

Після фіксації стійок та напрямних, далі треба обережно встановити скляні полотна. Під час транспортування скляних елементів починаються

проблеми. Важливо безпечно підняти скло на потрібно позицію. Іноді їх потрібно підіймати на 2-3 і 10-й поверх, а при падінні скло моментально розіб'ється, то варто подумати за безпечний спосіб підняття скляних панелей.

Також при встановленні скляних конструкцій, варто врахувати наступні моменти:

- Обов'язково слід звертати на особливості покриття скла, щоб не пошкодити його під час монтажу;
- Необхідно встановлювати такі елементи фурнітури як: декоративні елементи, ручки та заглушки;
- Кріплення до кожної такої конструкції підбирається індивідуально та можуть мати нестандартну форму для забезпечення надійності кріплення.

Після збору всіх елементів конструкції проводиться фінальна перевірка. Під час неї аналізуються такі нюанси:

- Відповідність готового виробу проекту дизайну та конфігурації;
- Важливо перевірити надійність закріплення кожного елемента;
- Встановлені скляні огороження потрібно перевірити на стрес-фактор. Для цього потрібно перевірити потенційно вразливі місця.

Завдяки етапу перевірки можна встановити чи було допущено помилки [43].

### **ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3**

Лазерне сканування стає все більш привабливим інструментом для проектування та виготовлення скляних конструкцій. Такий метод забезпечує:

- 1) Високу точність сканування, що є важливим для точного виготовлення скляних конструкцій та їх монтажу.
- 2) На всіх етапах роботи фактор помилки зводиться до мінімуму. Це дозволяє зменшити витрати часу та ресурсів на перепроведення замірів.

3) Дані отримуються миттєво. Завдяки цьому, вимірювання проходить без фізичного контакту з поверхнею об'єкта економлячи час та знижує ризик для працівників.

4) Детальні 3D-моделі дають можливість додатково візуалізувати об'єкт та забезпечити точну відповідність реальним параметрам існуючого об'єкта.

Таким чином, лазерне сканування дає можливість не тільки збільшити якість та ефективність проектування, але й створити високий рівень безпеки та естетичну красу скляних конструкцій, таких як огороження. Це гарантує те, що конструкція буде повністю створена згідно запиту замовника та впишеться в архітектурний стиль з мінімізацією можливих помилок чи необхідності повторного перероблення конструкції.

Отже, застосування лазерного сканування є початковим етапом в ході проектування скляних конструкцій, що істотно підвищує якість кінцевого результату та оптимізує витрати на монтаж та виробництво цих конструкцій.

## ВИСНОВКИ

Лазерне сканування здійснюється переважно за допомогою 3D-моделювання. 3D-сканування – є процесом перетворення координат точок реальних об'єктів з метою отримання їх полігональних моделей. Це дасть можливість в подальшому проводити модифікації карт в спеціальних геодезичних програмах для створення кінцевої і більш точної моделі. За допомогою даних лазерного сканування можна побудувати тривимірні моделі та сучасні топографічні плани.

За допомогою лазерного сканування можна вирішити досить багато завдань. Цим методом активно користуються всі науково розвинені країни вже більше 10 років. В Україні лазерне сканування в інженерній геодезії тільки починає розвиватися. Завдяки лазерному скануванню інженерно-геодезичні роботи пришвидшуються в рази. За допомогою спеціального лазерного сканера можна виконати будь-які завдання інженерної геодезії за кілька годин, в той час, як традиційними методами вимірювальні геодезичні роботи тривали б не менше тижня. Робота складається із чотирьох розділів.

В першому розділі описано що таке лазерне сканування та що воно дає для інженерної геодезії. Нині існує 3 види лазерного сканування: наземне, повітряне та мобільне. Під час наземного лазерного сканування виконуються такі процедури: проводиться зйомка фасадів та внутрішніх приміщень будівель; створюються тривимірні моделі тунелів, мостів, технологічного обладнання, пам'яток архітектури, будинків. Також у розділі описана структура застосування технології лазерного сканування в інженерній геодезії. Спочатку проілюстровано якими способами проводиться лазерне сканування та розкрито суть описуваних методів. Виділено основні переваги лазерного сканування над традиційними методами геодезії. Висвітлено той аспект, як сучасне геодезичне обладнання (лазерні сканери) допомагають в топографічних зйомках.

В другому розділі розглянуто перспективи лазерного сканування, структуру використання лазерного сканування в будівництві та при розробці та обслуговуванні інфраструктурних проектів, описано недоліки лазерного сканування та розглянуто перспективи використання лазерного сканування.

В третьому розділі розглянуто практичне застосування лазерного сканування. В якості прикладу, обрано сканування сходів для подальшого проектування скляного огороження, проаналізовано етапи сканування сходів, результати сканування та проблеми, які можуть виникати під час лазерного сканування скляних поверхонь, а також виявлено труднощі, які можуть виникати при виготовленні кріплень до цих поверхонь.

Також в ході роботи було виконано поставлені завдання:

1. Опрацьовано літературні джерела та останні дослідження в сфері лазерного сканування.
2. Проаналізовано існуючі методи лазерного сканування.
3. Порівняно методи опрацювання цифрових тривимірних моделей.
4. Проведено знайомство з програмним забезпеченням, за допомогою якого здійснюється лазерне сканування.
5. Виявлено переваги та недоліки лазерного сканування.
6. Проаналізовано перспективи розвитку технологій лазерного сканування.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Вострецов М. І, Сахарова С. В, Барабаш Т. М. Сучасні технології 3D сканування: матеріали XXI Всеукраїнської науково-технічної конференції молодих вчених, аспірантів і студентів Одеської національної академії харчових технологій [«Стан, досягнення та перспективи інформаційних систем і технологій»] (Одеса, 22-23 квітня 2021 р.) – Одеса, 2021. – С. 24-25.
2. Arsenieva N. O. (2022) *Using of laser scanning in geodetic highways surveys. Kharkiv National Automobile and Highway University, st. Yaroslava Mudrogo, 13* (2022), 65-69 [in English]. <https://doi.org/10.30888/2663-5712.2022-13-01-018>.
3. Козуб О. А. Застосування даних лазерного сканування при вирішенні задач народного господарства: квал. роб. на здобуття освітнього ступеня «Магістр»: 193. Рівне, 2018. 74 с.
4. Нестеренко С. Г. Методи і засоби автоматизації геодезичних робіт : конспект лекцій для здобувачів другого (магістерського) рівня вищої освіти зі спеціальності 193 – Геодезія та землеустрій / С. Г. Нестеренко, О. В. Афанасьєв ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2023. – 131 с.
5. Бачишин Б. Д. Інженерна геодезія: навч. посіб. [Електронне видання]. Рівне: НУВГП, 2020. 196 с. URL: [https://ep3.nuwm.edu.ua/19290/1/Посібник\\_інж\\_геод\\_вип\\_1.pdf](https://ep3.nuwm.edu.ua/19290/1/Посібник_інж_геод_вип_1.pdf) (дата звернення 14.02.2025).
6. Вяткін К. І., Мамонов К. А, Нестеренко С. Г. Системи мобільного лазерного сканування в геоінформаційних технологіях. *Вісник Харківського університету міського господарства ім. О. М. Бекетова. Комунальне господарство міст*. 2016. Вип. 132. С. 121-126.
7. Геоінформаційні системи і бази даних : монографія. – Кн. 2 / В. І. Зацерковний, В.Г. Бурачек, О. О. Железняк, А. О. Терещенко. Ніжин: НДУ ім. М. В. Гоголя, 2017. 237 с.

8. Гураль Т. О. Використання BIM технологій при будівництві та реконструкції споруд: квал. роб. на здобуття освітнього ступеня «Магістр»: 192. Тернопіль, 2024. 65 с.
9. В. Пеленко. Цифрові топографічні карти для потреб управління територіальними громадами: матеріали студентської наук. конф. Чернівецького національного університету ім. Ю. Федьковича. (Чернівці, 25 квітня 2023 р.) – Чернівці, 2023 – С. 14-15.
10. М. Сояк. Технологічні аспекти виконання наземного лазерного сканування: матеріали студентської наук. конф. Чернівецького національного університету ім. Ю. Федьковича. (Чернівці, 25 квітня 2023 р.) – Чернівці, 2023 – С. 22-23.
11. Арсеньєва Н. О., Фоменко Г. Р. Сучасні геодезичні прилади, які використовують під час будівництва, реконструкції та ремонтних робіт автомобільних доріг. *Вчені записки ТНУ ім. В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки.* 2021. № 2, Том 32 (71) Ч. 2. С. 248-253. URL: [https://www.tech.vernadskyjournals.in.ua/journals/2021/2\\_2021/part\\_2/41.pdf](https://www.tech.vernadskyjournals.in.ua/journals/2021/2_2021/part_2/41.pdf) (дата звернення 17.02.2025).
12. Тасаж В. С. 3D сканер для визначення геометрії об'єкту контролю: квал. роб. на здобуття освітнього ступеня «Бакалавр»: 6.051003. Київ, 2019. 57 с.
13. Пустовіт О. В., Бутенко Є. В. Класифікація хмари точок для створення цифрової моделі рельєфу: матеріали Міжнар. наук.-практ. конф. [«Інноваційні технології у плануванні території»] (Одеса, 5-7 жовтня 2023 р.) – Одеса, 2023. – С. 173-174.
14. A.S. Borkowski, Ł. Kochański, M. Wyszomirski. *A Case Study on Building Information (BIM) and Land Information (LIM) Models Including Geospatial Data. Geomatics and environmental engineering.* 2023. Vol. 17, N. 1. P. 19-34 [In English].
15. С. Fröhlich, M. Mettenleiter. *Terrestrial laser scanning – new perspectives in 3D surveying. International Archives of Photogrammetry, Remote*

*Sensing and Spatial Information Scienses. 2022. Vol. XXXVI, N. 8/W2. P. 7-13 [in English].*

16. Намінат О. С. Удосконалення методів геодезичного забезпечення моніторингу лінійних об'єктів в зонах впливу підземних гірничих робіт: дис. на здобуття наук. ступеня к-та техн. наук: 05.24.01/ Львів. Нац. ун-т. Львів, 2020. 197 с.

17. Х. Бурштинська, І. Василюха, С. Пікулик. Опрацювання даних лазерного сканування місцевості для відтворення гідрографічних об'єктів. *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва*. 2009. Вип. I (17). С. 195-202.

18. Y. Abdelmajid. Investigation and Comparison of 3D Laser Scanning Software Packages. Master of Science Thesis in Geodesy. 2012. Stockholm. 87 P [in English].

19. І. Паздрій, Ю. Білінський. Використання геоінформаційних систем для зображення рельєфу земної поверхні. *Вісник Львівського Ун-ту. Серія географічна*. 2006. Вип. 33. С. 301-309.

20. О. Бойко, Д. Ляшенко, Д. Прусов. Концептуальні засади ВІМ/GIS інтеграції геопросторових даних аеропортів, отриманих лазерним скануванням. *Технічні науки та технології*. 2019. № 4 (18). С. 238-246.

21. Свідерська Т. О. Використання сучасних технологій для підвищення ефективності виконання розмічувальних інженерно-геодезичних робіт. Білоцерківський національний аграрний університет. 2023. С. 70-74. URL:

<https://rep.btsau.edu.ua/bitstream/BNAU/11329/1/ВИКОРИСТАННЯ%20СУЧА%20СНИХ%20ТЕХНОЛОГІЙ.pdf> (дата звернення 18.02.2025).

22. Гладиш Є. О. Підвищення ефективності будівництва об'єктів цивільної інфраструктури за рахунок ВІМ-моделювання: квал. роб. на здобуття освітнього ступеня «Магістр»: 192. Запоріжжя, 2023. 87 с.

23. Pro scan. Лазерне 3D-сканування: веб-сайт. URL: <https://proscan.com.ua/skanuvannya-u-budivnictvi-ta-arhitekturi> (дата звернення 18.02.2025).
24. А. С. Соколенко. Ефективне будівництво та управління проєктами в умовах післявоєнної відбудови України: матеріали XXIII міжнародної науково-практичної конференції «Стародубовські читання 2023» (м. Дніпро, 19 квітня 2023 р.). Дніпро, 2023. С. 66-69.
25. Топограф, геодезія, геологія. Лазерне сканування у геодезії: веб сайт. URL: <https://topograph.com.ua/uk/blog/lazerne-skanuvannya-u-geodeziyi/> (дата звернення 18.02.2025).
26. Касьянов В. В. Дослідницькі методи та сучасні технології геодезії : конспект лекцій для здобувачів третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти зі спеціальності 193 – Геодезія та землеустрій / В. В. Касьянов ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2022. – 115 с.
27. Руднева І. Застосування лазерного сканування для моніторингу стану будівель та споруд при реконструкції. *Transfer of Innovative Technologies*. 2021. Vol.4, No.1. С. 33-36.
28. Ulrika Uotila, Arto Saari, Juha-Matti Junnonen (2021). *Investigating the barriers to laser scanning implementation in building refurbishment*. Journal of Information Technology in Construction (ITcon), (2021), 249-262. Vol. 26 [in English]. <https://doi.org/10.36680/j.itcon.2021.014>.
29. Х.В. Бурштинська, А.В. Бабушка. Вплив атмосфери на послаблення лазерного променя при скануванні місцевості. *Геодезія, картографія і аерофотознімання*. 2013. Вип. 78. С. 49-53.
30. Сирдій Д. А. Методи та засоби сканування 3D-об'єктів: квал. роб. на здобуття освітнього ступеня «Магістр»: 123. Вінниця, 2020. 99 с.
31. Москалюк І. В., Сакун М. М. Безпілотні літальні апарати. Їхня роль у геодезії: Proceedings of X international scientific and practical conference (Tokyo, June 13-15 2024). Tokyo: CPN Publishing Group [in Ukrainian].

32. Інноваційні методи проектних та геодезичних робіт. Матеріали 86-ї міжнародної студентської конференції (квітень 2024) / ХНАДУ. – Харків. Видавець: О. А. Мірошніченко, 2024. – 210 с.
33. Наземне лазерне сканування. *Геодезія, геологія, топозйомка від сертифікованих фахівців Гільдія Інжиніринг*: веб сайт. URL: [https://geotop.com.ua/nazemnoe-lazernoie-skanirovanie\\_ua.php](https://geotop.com.ua/nazemnoe-lazernoie-skanirovanie_ua.php) (дата звернення 27.02.2025).
34. 3D-сканування: веб сайт. URL: <https://3dway.com.ua/blog/3d-scanning> (дата звернення 27.02.2025).
35. Лазерні сканувальні системи повітряного базування. *Файловий архів студентів*: веб сайт. URL: <https://studfile.net/preview/6440954/page:34/> (дата звернення 27.02.2025).
36. Лазерне сканування в геодезії. *Geoplan*: веб сайт. URL: <https://geoplan.com.ua/ua/blog-ua/surveying-surveys-ua/lazerne-skanuvannya-v-geodezii/> (дата звернення 27.02.2025).
37. 3D зйомка (лазерне сканування). *Geodet*: веб сайт: URL: <https://geodet.com.ua/services/3d-ziomka-lazerne-skanuvannya/> (дата звернення 27.02.2025).
38. Wider M., Gawronek P (2021). *Accuracy of the BIM model generated from the point cloud for an object made in glass technology. Geomatics, Landmanagement and Landscape*, (2021), 117-133. No. 4 [in English]. <https://doi.org/10.15576/GLL/2021.4.117>.
39. 3-D Laser Technology Brings Field-Accurate Dimensions to Commercial Railing Systems. *Class on web*: веб сайт: URL: <https://www.glassonweb.com/news/3-d-laser-technology-brings-field-accurate-dimensions-commercial-railing-systems> (дата звернення 06.03.2025).
40. Обмір сходів для улаштування скла. Лазерне сканування, геодезія та 3D моделювання: веб сайт: URL: <https://laser-scanning.com.ua/portfolio/obmir-shodiv-dlya-ulashtuvannya-skla/> (дата звернення 06.03.2025).

41. Глотов В. М., Марусаж Х. І. Дослідження точності хмари точок методом наземного лазерного сканування. *Геодезія, картографія та аерофотознімання*. 2019. Вип. 90. С. 41-49.

42. Скляні перегородки під замовлення. Виготовлення і монтаж. Монтаж скляних перегородок: веб сайт: URL: [https://klymglass.com.ua/montazh-peregorodok/?utm\\_source=chatgpt.com](https://klymglass.com.ua/montazh-peregorodok/?utm_source=chatgpt.com) (дата звернення 11.03.2025).

43. Як підібрати стильні та безпечні перила? SFERAGLASS: веб сайт: URL: <https://sferaglass.com/ua/blog/protsess-ustanovki-steklyannykh-peril-etapy-i-osobennosti-montazha> (дата звернення 11.03.2025).