

**КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ**

Факультет: Геоінформаційних систем та управління територіями

Кафедра: Геоінформатики і фотограмметрії

Освітній рівень: «магістр за ОПП»

Спеціальність: 193 «Геодезія та землеустрій»

Спеціалізація: Геоінформаційні системи і технології

ЗАТВЕРДЖУЮ

Декан факультету

_____доцент., к.т.н. Нестерненко О. В.

“3” грудня 2025 року

**З А В Д А Н Н Я
ДО ВИКОНАННЯ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ ВИПУСКНОЇ РОБОТИ
НА ЗДОБУТТЯ ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ МАГІСТРА**

Рафальська Катерина Богданівна

(прізвище, ім'я, по батькові)

1.Тема роботи: Застосування геоінформаційних технологій для побудови цифрової моделі дорожнього полотна на основі хмари точок

затверджена наказом ректора КНУБА №1844/22/25 від 31.10.2025

2. Керівник роботи доц., к.т.н. Горковчук Юлія Вікторівна

(прізвище, ім'я та по батькові, науковий ступінь,
вчене звання)

3. Строк подання студентом роботи до захисту: 4.12.2025

4. Зміст пояснювальної записки за розділами:

Р. 1. Сучасний стан і тенденції розвитку геоінформаційних технологій для побудови цифрової моделі дорожнього полотна

Р. 2. Методичні засади побудови цифрової моделі дорожнього полотна

Р. 3. Розроблення алгоритмів створення цифрової моделі дорожнього полотна на основі хмари точок

Р. 4. Апробація алгоритму створення цифрової моделі дорожнього полотна на основі хмари точок

5. Графічний матеріал за розділами

Р. 1. Рис. 1.1.1 «Схема збору просторових даних». Рис. 1.1.2 «Ілюстрація хмари точок дорожнього полотна як вихідного матеріалу». Рис. 1.2.1 «Схема

використання геоінформаційних технологій у проектуванні дорожньої інфраструктури». Таблиця 1.1 «Порівняльний аналіз (суть відмінностей)»

Р. 2. Рис. 2.1 «Основні компоненти формування цифрової моделі дороги». Рис. 2.2 «Складова цифрової моделі дорожнього полотна». Рис. 2.3 «Блок-схема формування базової цифрової моделі дорожнього полотна».

Р. 3. Рис. 3.1 «Алгоритм створення цифрової моделі дорожнього полотна». Рис. 3.2 Аналітичне використання САД-моделі у ГІС.

Р.4. Рис. 4.1 «Фрагмент хмари точок із зміною рельєфу». Рис. 4.2 «Геодезичний сканер Leica ScanStation P40». Рис. 4.3 «Приклад кількості точок на 1м²». Рис. 4.4 «Фрагмент хмари точок із зміною рельєфу». Рис. 4.5 «Кольорова інформація хмари точок (RGB)». Рис. 4.6 «TIN-поверхня з брейклайном». Рис. 4.7 «Растеризація, для прорідження хмари». Рис. 4.8 «Плагін CloudCompare для фільтрації точок». Рис. 4.9 «Процес імпорту хмари точок». Рис. 4.10 «Підписання файлу хмари точок та вибору місця збереження». Рис. 4.11 «Вибір налаштувань конвертації хмари точок». Рис. 4.12 «Конвертована хмара точок для продуктів Autodesk». Рис. 4.13 «Файл .dwg із усіма налаштуваннями». Рис. 4.14 «Виклик команди імпорту (Insert → Point Cloud)». Рис. 4.15 «Підтвердження координатної системи». Рис. 4.16 «Об'єкт Point Cloud в Civil 3D». Рис. 4.17 «Режим Elevation Style». Рис. 4.18 «Режим Intensity Style». Рис. 4.19 «Процес створення TIN-поверхні». Рис. 4.20 «Процес редагування параметрів TIN-поверхні». Рис. 4.21 «Процес фільтрування хмари точок для TIN-поверхні». Рис. 4.22 «Первинна TIN-поверхня». Рис. 4.23 «Малювання брейклайнів на елемент Бордюр». Рис. 4.24 «Проведення брейклайнів по зміні матеріалу». Рис. 4.25 «Створені 3D Solid опор мосту». Рис. 4.26 «3D Модель мосту на основі хмари точок». Рис. 4.27 «TIN-поверхня вид Зверху». Рис. 4.28 «Викопіювання з архівних документів дорожнього полотна». Рис. 4.29 «Профіль дороги станом на 2005р.». Рис. 4.30 «Профіль дороги станом на 2025р.». Рис. 4.31 «Поєднання профілів 2005р. та 2025р.». Рис. 4.32 «Різниця висот профілів 2005р. та 2025р.». Рис. 4.33 «Представлення зон потенційних ризиків». Таблиця 4.1 «Загальні технічні характеристики сканера Leica P40».

6. Календарний план виконання роботи:

Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)
Розділ 1. 1.1. Аналіз джерел і методів отримання просторових даних для моделювання доріг. 1.2. Геоінформаційні технології та їх роль у проектуванні дорожньої інфраструктури. 1.3. Порівняльний аналіз програмних засобів для 3D-моделювання (AutoCAD, Civil 3D, QGIS, CloudCompare, ReCap та ін.). Висновки до розділу 1.	13.10.2025
Розділ 2. 2.1 Цифрова модель рельєфу (ЦМР): структура, стандарти та вимоги до точності. 2.2 Формування ЦМР та вимоги до точності цифрової моделі дорожнього полотна. Висновки до розділу 2.	27.10.2025
Розділ 3. 3.1. Алгоритм створення цифрової моделі дорожнього полотна на основі хмари точок в ГІС. 3.2. Особливості векторизації об'єктів дорожнього полотна. 3.3. Інтеграція САД моделі дорожнього полотна в ГІС. Висновки до розділу 3.	10.11.2025
Розділ 4. 4.1. Вихідні дані та структура хмари точок 4.2. Імпорт хмари точок, створення базової та робочої 3D моделі. 4.3. Моніторинг стану дорожнього покриття на основі результатів моделювання 4.4. Застосування цифрової моделі дорожнього полотна. Висновки до розділу 4.	02.12.2025
Остаточне оформлення роботи	08.12.2025
Направлення роботи на рецензування, перевірку на плагіат	17.12.2025
Попередній захист роботи на кафедрі	04.12.2025

7. Консультанти розділів атестаційної випускної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Перевірив	
		дата	підпис
Розділ 1.	Горковчук Ю.В		
Розділ 2.	Горковчук Ю.В		
Розділ 3.	Горковчук Ю.В		
Розділ 4.	Горковчук Ю.В		

8. Дата видачі завдання

Зав. кафедри _____ Карпінський Ю.О.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник _____ Горковчук Ю.В.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Студент _____ Рафальська К.Б.
(підпис) (прізвище та ініціали)

**КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ**

Факультет геоінформаційних систем і управління територіями

Кафедра геоінформатики і фотограмметрії

**ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
ДО АТЕСТАЦІЙНОЇ РОБОТИ
НА ЗДОБУТТЯ ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ МАГІСТРА**

на тему:

Застосування геоінформаційних технологій для побудови цифрової моделі
дорожнього полотна на основі хмари точок

Рафальська Катерина Богданівна

Київ – 2025 р.

**КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ**

Факультет геоінформаційних систем і управління територіями

Кафедра геоінформатики і фотограмметрії

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ проф., д.т.н. Юрій КАРПІНСЬКИЙ

“ _____ ” _____ 2025 року

**ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
ДО АТЕСТАЦІЙНОЇ РОБОТИ
НА ЗДОБУТТЯ ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ МАГІСТРА**

Застосування геоінформаційних технологій для побудови цифрової моделі
дорожнього полотна на основі хмари точок

Виконала студентка групи ГСТм-24
193 «Геодезія та землеустрій»
Геоінформаційні системи і технології

Рафальська К.Б.

Керівник: Горковчук Ю.В., доц., к.т.н.

Київ-2025 р.

Зміст

ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ 1. СУЧАСНИЙ СТАН І ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ ГЕОІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ ПОБУДОВИ ЦИФРОВОЇ МОДЕЛІ ДОРОЖНЬОГО ПОЛОТНА.....	10
1.1. Аналіз джерел і методів отримання просторових даних для моделювання доріг.....	11
1.2. Геоінформаційні технології та їх роль у проектуванні дорожньої інфраструктури. .	14
1.3. Порівняльний аналіз програмних засобів для 3D-моделювання (AutoCAD, Civil 3D, QGIS, CloudCompare, ReCap та ін.).....	20
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1	28
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИЧНІ ЗАСАДИ ПОБУДОВИ ЦИФРОВОЇ МОДЕЛІ ДОРОЖНЬОГО ПОЛОТНА.....	30
2.1 Цифрова модель рельєфу (ЦМР): структура, стандарти та вимоги до точності	31
2.2 Формування ЦМР та вимоги до точності цифрової моделі дорожнього полотна	35
ВИСНОВОК ДО РОЗДІЛУ 2	44
РОЗДІЛ 3. РОЗРОБЛЕННЯ АЛГОРИТМІВ СТВОРЕННЯ ЦИФРОВОЇ МОДЕЛІ ДОРОЖНЬОГО ПОЛОТНА НА ОСНОВІ ХМАРИ ТОЧОК	45
3.1. Алгоритм створення цифрової моделі дорожнього полотна на основі хмари точок в ГІС	47
3.2. Особливості векторизації об'єктів дорожнього полотна	50
3.3. Інтеграція САД моделі дорожнього полотна в ГІС.....	53
ВИСНОВОК ДО РОЗДІЛУ 3	57
РОЗДІЛ 4. АПРОБАЦІЯ АЛГОРИТМУ СТВОРЕННЯ ЦИФРОВОЇ МОДЕЛІ ДОРОЖНЬОГО ПОЛОТНА НА ОСНОВІ ХМАРИ ТОЧОК	58
4.1. Вихідні дані та структура хмари точок.....	59
4.2. Імпорт хмари точок, створення базової та робочої 3D моделі.....	70
4.3. Моніторинг стану дорожнього покриття на основі результатів моделювання	88
4.4. Застосування цифрової моделі дорожнього полотна	96
ВИСНОВОК.....	99
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	101
ГРАФІЧНИЙ МАТЕРІАЛ	108

ВСТУП

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ДИПЛОМНИЙ ПРОЕКТ			
					Застосування геоінформаційних технологій для побудови цифрової моделі дорожнього полотна на основі хмари точок	Літ.	Арк.	Аркушів
Виконала	Рафальська К.Б.						1	2
Керівник	Горковчук Ю.В.							7
Зав. каф.	Карпінський Ю.О.					КНУБА, ГІСУТ, група ГСТм-24		

Розвиток дорожньої інфраструктури потребує сучасних методів просторового моделювання, що забезпечують високу точність, оперативність та інформативність інженерних рішень. Традиційні технології зйомки не завжди дають змогу швидко отримати детальну та повну картину стану дорожнього полотна, особливо на великих протяжностях чи в умовах складного рельєфу. У зв'язку з цим актуальним є застосування геоінформаційних технологій (ГІС), які дозволяють комплексно опрацьовувати великі просторові масиви даних та формувати на їх основі цифрові моделі різних інженерних об'єктів.

Одним із найбільш ефективних джерел просторової інформації є хмара точок, отримана за допомогою технології LiDAR або фотограмметрії з використанням безпілотних апаратів. Такі дані забезпечують високу щільність та просторову деталізацію, що робить їх придатними для відтворення реальної геометрії дорожнього полотна. Подальше оброблення хмари точок у ГІС-середовищі та її моделювання в програмних засобах, зокрема AutoCAD Civil 3D, CloudCompare та Autodesk ReCap, створюють можливість автоматизувати процес побудови цифрової моделі дороги та отримувати інженерно значущі результати — від поверхні рельєфу до профілів, ухилів і деформацій покриття.

Метою даної магістерської роботи є застосування геоінформаційних технологій для побудови цифрової моделі дорожнього полотна на основі хмари точок.

Для досягнення мети передбачається виконати такі завдання:

- проаналізувати сучасні підходи та інструменти збору просторових даних;
- дослідити особливості використання хмар точок у цифровому моделюванні;

- реалізувати побудову цифрової моделі дорожнього полотна з використанням ГІС-технологій;
- виконати просторовий аналіз моделі та оцінити її точність;
- визначити можливості практичного застосування цифрової моделі для контролю та моніторингу доріг.

Об'єктом дослідження є дорожнє полотно як інженерний об'єкт, предметом — методи його цифрового моделювання на основі хмар точок.

Практична значущість роботи полягає у можливості використання цифрової моделі дорожнього полотна для своєчасного виявлення деформацій, планування ремонтів та удосконалення процесів утримання й управління дорожньою інфраструктурою.

1.1. Аналіз джерел і методів отримання просторових даних для моделювання доріг.

Сучасні методи моделювання дорожнього полотна базуються на використанні високоточної просторової інформації, отриманої за допомогою різних технологій збору геоданих. Від точності вихідної інформації безпосередньо залежить якість побудови цифрової моделі дорожнього полотна (ЦМДП), її геометрична відповідність реальним умовам, коректність подальших розрахунків і придатність цифрової моделі для інженерного аналізу. Основними джерелами даних для створення цифрових моделей дорожньої інфраструктури є технології лазерного сканування (LiDAR), аерофотознімання з безпілотних літальних апаратів (UAV), наземні геодезичні вимірювання (GNSS, тахеометрія) та супутникові системи дистанційного зондування Землі. Узагальнена класифікація методів збору просторових даних наведена на рис. 1.1.1, де подано принципи застосування різних груп технологій для моделювання дорожніх об'єктів. [1]

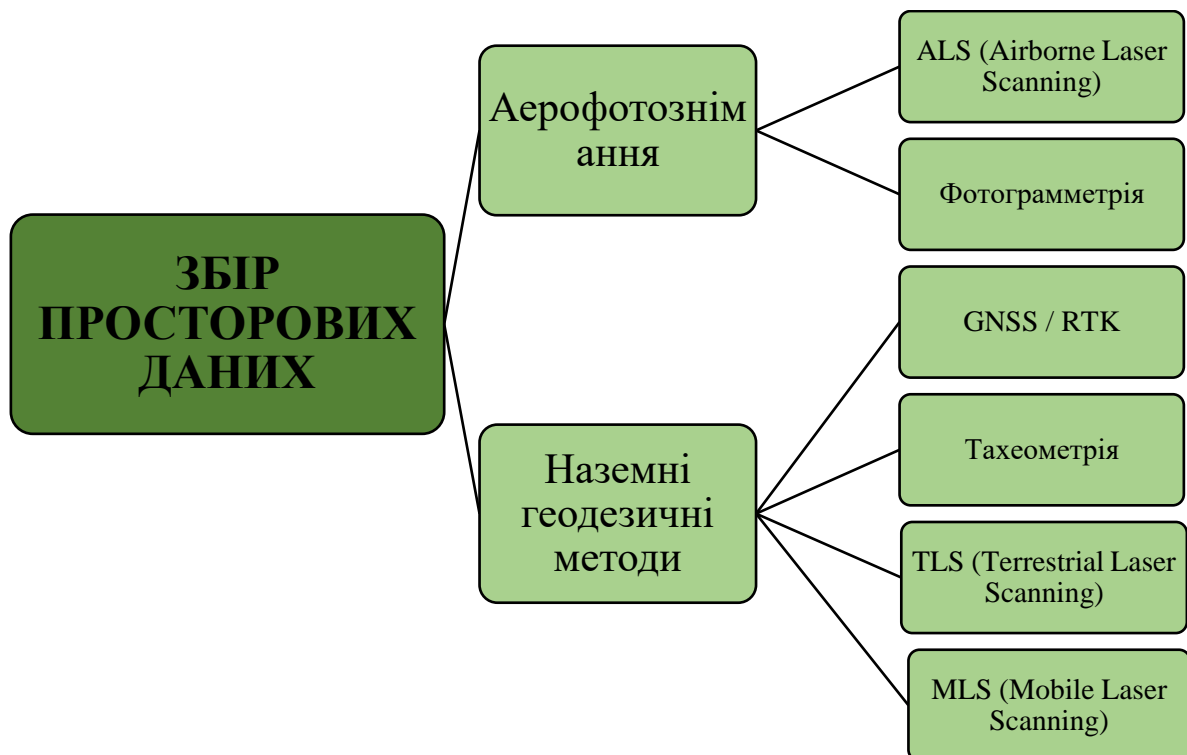


Рис 1.1.1 «Схема збору просторових даних»

Лідарні технології (Light Detection and Ranging – LiDAR) є найбільш точним інструментом для формування вихідної хмари точок – множини тривимірних координат, що описують поверхню дорожнього покриття та прилеглі елементи інфраструктури. Залежно від застосованої платформи розрізняють наземне лазерне сканування (TLS), мобільне лазерне сканування (MLS) та аеролазерне сканування (ALS). Дані LiDAR характеризуються високою щільністю, стабільністю та точністю, що дає змогу деталізовано відтворювати тривимірну геометрію дорожнього полотна. Саме point cloud є базовим вхідним елементом для подальшої векторизації, побудови цифрових поверхонь і створення просторових моделей. [2]



Рис. 1.1.2 «Ілюстрація хмари точок дорожнього полотна як вихідного матеріалу»

Використання геоінформаційних технологій (ГІС) забезпечує інтеграцію різнотипних джерел просторових даних, їх зберігання, обробку, візуалізацію та аналітичну обробку. ГІС-системи виступають інфраструктурною платформою для реалізації повного циклу просторового моделювання: від надходження даних до аналізу отриманих результатів. На сучасному етапі розвитку дорожнього проєктування ГІС-технології

виконують ключову роль у підтримці прийняття рішень, автоматизації дорожнього моніторингу, плануванні реконструкцій та розвитку транспортної мережі.

Крім LiDAR-даних, у дорожній галузі широко застосовують UAV-фотограмметрію, яка забезпечує оперативне створення ортофотопланів і цифрових моделей рельєфу (DEM) з високою роздільною здатністю. GNSS-технології використовують для геоприв'язки результатів знімання, а супутникові дані застосовують переважно для інвентаризаційних та регіональних задач. На практиці максимальну точність забезпечує саме комбіноване використання LiDAR, UAV і GNSS, що дозволяє нівелювати недоліки кожного окремого метода та підвищити достовірність ЦМДП. [2]

Суттєве значення у виборі технології моделювання мають програмні засоби. Порівняльні характеристики найбільш поширених ПЗ, таких як AutoCAD Civil 3D, QGIS, CloudCompare та ReCap та ін. наведено у табл. 1.1, де проаналізовано їх функціональні можливості, точність, специфіку застосування та доцільність використання на різних етапах моделювання. Автоматизація оброблення просторових даних у цих програмних середовищах дає змогу значно скоротити тривалість інженерного аналізу та зменшити ризик похибок. [1]

Загалом аналіз показує, що сучасні методи отримання просторових даних демонструють тенденцію до підвищення точності, зростання щільності хмар точок, збільшення обсягів доступних даних і переходу до повної автоматизації процесів оброблення. Технології LiDAR та UAV залишаються найперспективнішими для дорожнього моделювання, особливо у поєднанні з інтелектуальними інструментами ГІС та машинного навчання.

1.2. Геоінформаційні технології та їх роль у проєктуванні дорожньої інфраструктури.

Сучасний етап розвитку дорожнього будівництва характеризується стрімким впровадженням цифрових методів просторового аналізу, серед яких провідну роль відіграють геоінформаційні технології (ГІС). Вони забезпечують інтеграцію різнорідних джерел просторових даних, їх зберігання, оброблення та відображення у вигляді цифрових моделей, придатних для інженерного аналізу й проєктування. ГІС-технології дозволяють перейти від фрагментарних підходів до комплексного управління інформацією про дорожню інфраструктуру, об'єднавши геодезичні, фотограмметричні, лідарні, кадастрові та аналітичні модулі в єдине середовище моделювання. [3]

Роль та функції ГІС у дорожній інженерії

Основною функцією ГІС у дорожній галузі є просторове моделювання, що включає збір, редагування, аналіз та візуалізацію даних, які описують як геометрію дороги, так і її інженерні параметри. Використання ГІС дозволяє створювати цифрові моделі місцевості (ЦММ), цифрові моделі рельєфу (ЦМР) і цифрові моделі дорожнього полотна (ЦМДП), що слугують базою для проєктування, моніторингу, оцінки деформацій і прийняття управлінських рішень. [4]

ГІС-системи реалізують повний цикл просторового моделювання, який охоплює:

- збір просторових даних (LiDAR, UAV, GNSS, супутникові знімки); [2]
- попередню обробку й геоприв'язку даних;
- формування цифрової моделі рельєфу та поверхні дороги;
- аналітичну обробку (розрахунок ухилів, профілів, площ, об'ємів);

- візуалізацію результатів у вигляді карт, 3D-моделей і тематичних шарів;
- використання отриманих результатів для оптимізації проєктних рішень.

Інтеграційна роль ГІС у дорожньому проєктуванні

ГІС виступають інтеграційною платформою, що забезпечує взаємодію між різними видами даних та програмними системами – AutoCAD Civil 3D, QGIS, ArcGIS Pro, CloudCompare, ReCap тощо. Вони дозволяють суміщати в одному середовищі хмари точок, векторні шари, растрові знімки та інженерні моделі, що значно спрощує аналіз складних об'єктів дорожньої інфраструктури. Структурну схему застосування геоінформаційних технологій у процесі дорожнього проєктування подано на рис. 1.2.1, де показано циклічний процес «збір – обробка – інтеграція – аналіз – моделювання – прийняття рішень». [3]



Рис. 1.2.1 «Схема використання геоінформаційних технологій у проєктуванні дорожньої інфраструктури»

Перший етап – збір вихідних даних. Для дорожнього проектування це, в першу чергу, цифрові моделі рельєфу (ЦМР/DEM), отримані з аерофотознімання, LiDAR-зйомки чи супутникових даних високої роздільності. Також використовуються матеріали топографічних карт масштабів 1:10 000 – 1:25 000, державні кадастрові карти, ортофотоплани, гідрографічні схеми. Інженерно-геологічні дані включають результати буріння свердловин, геофізичних досліджень, лабораторних випробувань ґрунтів, карти стратиграфії та геологічної будови. Додатково залучаються дані дистанційного зондування Землі (RS): космічні знімки середньої (Sentinel) та високої (WorldView, Pleiades) роздільності, а також UAV-зйомка з дронів. [8]

Другий етап – структурування та стандартизація даних. Оскільки дані надходять із різних джерел, важливим завданням є приведення їх до єдиної системи координат, формату та проекції. Використання різних форматів (DWG, DXF, Shapefile, GeoTIFF, LAS, IFC) потребує проміжних перетворень. На цьому етапі розробляється концептуальна модель бази даних: які шари будуть включені, які атрибути описують об'єкти, як реалізовано зв'язки між ними. Приклад: шар «Рельєф» містить значення висот і похідні характеристики (нахил, експозиція схилів, кривизна поверхні); шар «Геологія» описує типи ґрунтів, глибину залягання, показники несучої здатності; шар «Гідрографія» містить інформацію про річки, озера, заболочені території, межі підтоплення; шар «Соціальна інфраструктура» описує межі населених пунктів, землі сільськогосподарського користування, об'єкти культурної спадщини.

Третій етап – просторове моделювання. На цьому рівні виконуються перші просторові аналізи: створення карт ухилів, експозицій, зон видимості, буферних зон навколо інфраструктури, визначення водозборів і напрямків стоку. Геологічні дані інтерполюються методами IDW, крігінгу або сплайнів для створення поверхонь фізико-механічних властивостей ґрунтів. Поєднання цих даних дозволяє створити інтегровану модель території, яка наочно демонструє взаємозв'язки факторів.

Четвертий етап – застосування багатокритеріального аналізу. Використовуються методи аналітичної ієрархії (АНР), вагового накладання шарів (Weighted Overlay), еволюційні алгоритми (генетичні, мурашині, рої частинок). Усі вони дозволяють обґрунтовано вибирати території з найкращими параметрами для трасування.

П'ятий етап – моделювання альтернативних варіантів траси. ГІС дозволяє автоматично генерувати кілька варіантів ліній трасування, кожен із яких відповідає певній комбінації критеріїв. Для кожного варіанта розраховуються довжина, обсяг земляних робіт, вартість будівництва, екологічні втрати. Це дозволяє приймати рішення не лише на основі інженерних параметрів, а й комплексного підходу.

Шостий етап – візуалізація та підтримка прийняття рішень. У результаті формується набір карт, профілів і тривимірних моделей, які дозволяють інженерам, проєктантам і замовникам наочно оцінити альтернативи. Сучасні веб-ГІС платформи (ArcGIS Online, QGIS Cloud, GeoServer) дозволяють публікувати інтерактивні карти, до яких мають доступ усі стейкхолдери. Це робить процес прозорим, а рішення більш обґрунтованими. [8]

Під час створення цифрової моделі дорожнього полотна етапи «Просторове моделювання» і «Моделювання альтернативних варіантів траси» працюють не послідовно, а ітеративно. Після інтеграції хмари точок, DEM та інших шарів у ГІС виконується початкова аналітика, яка визначає обмеження рельєфу, конфліктні зони та можливі коридори для траси. На основі цих даних моделюються альтернативні варіанти. Кожен варіант траси потім знову аналізується у ГІС, де перевіряється його узгодженість із рельєфом, інженерними мережами та екологічними обмеженнями. За потреби траса коригується, і цикл повторюється.

Таке відображення процесу демонструє системний характер застосування ГІС: дані, отримані з різних джерел, після обробки й аналізу

повертаються у цикл оновлення бази, забезпечуючи динамічне відображення стану дорожнього полотна. Цей підхід формує основу для створення «цифрового двійника дороги» (Digital Twin Road) , який поєднує геометрію, технічні характеристики та часову динаміку об'єкта.

Приклади практичного використання

У практиці дорожнього будівництва ГІС-технології застосовують для:

- аналізу траси дороги (визначення оптимального положення з урахуванням рельєфу);
- контролю будівництва та реконструкції (порівняння фактичних і проєктних поверхонь);
- моніторингу стану покриття (ідентифікація деформацій і просідань);
- управління активами дорожньої мережі (облік, паспортизація, ремонтні графіки);
- автоматизації кадастрових і геодезичних робіт (ведення баз даних про елементи інфраструктури).

ГІС також інтегруються з BIM-системами, утворюючи спільний інформаційний простір, у якому моделі доріг взаємопов'язані з архітектурними та інженерними компонентами території. Це створює передумови для формування єдиного цифрового середовища управління інфраструктурою (Common Data Environment). [3]

Сучасні тенденції та перспективи

Подальший розвиток ГІС у дорожній галузі пов'язується з автоматизацією аналітичних процесів, впровадженням штучного інтелекту для класифікації об'єктів хмари точок та прогнозування технічного стану покриття. Застосування машинного навчання (ML) і нейронних мереж (CNN)

дозволяє виявляти дефекти та зміни у структурі дорожнього полотна в автоматизованому режимі. [6]

Розвиток концепції «розумної дороги» (Smart Road) ґрунтується на поєднанні ГІС із сенсорними системами моніторингу, що забезпечує безперервне оновлення даних і створює основу для інтелектуальних транспортних систем (ITS). Цифрові моделі доріг, побудовані на базі ГІС, уже сьогодні застосовуються для управління рухом, планування реконструкцій та оптимізації маршрутів. [5]

Геоінформаційні технології є фундаментальним елементом сучасного дорожнього проектування, забезпечуючи перехід від статичних карт до динамічних цифрових моделей. Вони об'єднують процеси збору, моделювання, аналізу та візуалізації просторових даних, формуючи цілісну систему управління інфраструктурою. ГІС забезпечують не лише підвищення точності проєктних рішень, а й створюють основу для цифрової трансформації дорожньої галузі – від «карти» до «цифрового двійника». [3]

Важливим завданням є також розробка прикладних програмних рішень і шаблонів, що дозволяють автоматизувати обробку польових даних, побудову цифрових моделей місцевості й виконання просторового аналізу. Не менш значущим стає розвиток веб-ГІС порталів, які забезпечують візуалізацію даних та участь громадськості у прийнятті рішень, наприклад порталу «ГІС автомобільних доріг»

Використання геоінформаційних систем у дорожньому будівництві сьогодні розглядається як один із ключових факторів підвищення ефективності та якості інженерних вишукувань. Методологія застосування ГІС полягає у створенні єдиної інтегрованої бази просторових і атрибутивних даних, що охоплює весь спектр інформації, необхідної для прийняття рішень на етапах від попереднього обґрунтування до детального проектування та експлуатації дороги. Класичні підходи передбачають виконання окремих

етапів вишукувань без комплексної цифрової інтеграції: геодезисти створювали топографічні карти, геологи – колонки свердловин та карти інженерно-геологічного районування, екологи – окремі схеми обмежень. Це призводило до фрагментарності даних, що ускладнювало ухвалення оптимальних рішень. ГІС дозволяє створити середовище, де всі ці дані зберігаються у структурованій формі, а просторові аналітичні інструменти забезпечують їх поєднання, візуалізацію й аналіз. [61]

1.3. Порівняльний аналіз програмних засобів для 3D-моделювання (AutoCAD, Civil 3D, QGIS, CloudCompare, ReCap та ін.)

Побудова цифрової моделі дорожнього полотна на основі хмари точок потребує комплексного застосування програмних засобів, орієнтованих на різні етапи технологічного процесу: препроцесинг та очищення даних, створення тривимірної геометрії, просторову аналітику, інженерне моделювання, векторизацію та підготовку технічної документації. Дані LiDAR-сканування або фотограмметричної зйомки, незважаючи на високу деталізацію, є неструктурованими наборами точок, тому ключовим фактором успіху проєктування є правильний вибір програмного забезпечення для кожної групи операцій. [2]

Цифрова модель дороги формується як результат комплексної послідовності процесів, у яких кожен програмний продукт виконує власну, взаємодоповнювальну функцію, забезпечуючи цілісність і точність кінцевого результату. Щоб простежити цю логіку та зрозуміти роль окремих інструментів у загальній структурі моделювання, далі буде здійснено огляд програмних засобів, що застосовуються у цифровому проєктуванні дорожнього полотна:

1. *CloudCompare та ReCap*. Застосовуються для очищення, реєстрації та базової класифікації хмар точок, підготовлюючи їх до подальшого моделювання.

2. *Autodesk Civil 3D*. Основний інженерний інструмент для побудови цифрової моделі дороги: поверхні, траси, профілі, коридори та обсяги робіт.
3. *QGIS*. ГІС-система для просторового аналізу, роботи з шарами місцевості та створення тематичних карт.
4. *ArcGIS Pro + ArcGIS 3D Analyst*. Дозволяють виконувати потужну 3D-аналітику: обробку LAS/LAZ, створення DEM/TIN поверхонь, аналіз ухилів і висот.
5. *AutoCAD*. Використовується для векторизації, технічних креслень і підготовки графічної документації.
6. *Bentley OpenRoads Designer / ContextCapture*. Професійна система для трасування та моделювання доріг із прямою підтримкою хмар точок та фотограмметрії.
7. *TerraSolid Suite (TerraScan, TerraModeler, TerraRoads)*. Набір модулів для класифікації хмар точок і створення дорожніх коридорів у середовищі MicroStation.
8. *Pix4D Survey / Pix4D Mapper*. Інструменти фотограмметрії для створення DTM/DEM, профілів та автоматичної векторизації ліній дороги.

Щоб глибше усвідомити специфіку програмних засобів, що використовуються у цифровому проектуванні дорожнього полотна, доцільно детально проаналізувати кожен з них:

1.1 Autodesk ReCap

Autodesk ReCap відповідає за імпорт, очищення, препроцесинг та геоприв'язку хмар точок, збережених у форматах LAS/LAZ. Програма виконує оптимізацію і підготовку даних, забезпечуючи коректний імпорт у Civil 3D. ReCap є важливою ланкою, без якої робота з великими хмарами точок у Civil 3D була б неефективною або неможливою.

1.2. CloudCompare

CloudCompare - спеціалізований інструмент для глибокої обробки хмар точок: реєстрації, фільтрації шумів, класифікації, сегментації, редукування масиву, побудови перерізів та вимірювання деформацій. Функції Cloud-to-Cloud і Cloud-to-Mesh роблять його незамінним у випадках, коли потрібно оцінити зміни геометрії дороги в часі, виконати точне порівняння різних етапів зйомки або перевірити якість моделі. CloudCompare – це ядро аналітики хмар точок.

2. Autodesk Civil 3D

Autodesk Civil 3D – провідне інженерне програмне забезпечення, яке забезпечує повноцінну побудову TIN-поверхонь, трас, поздовжніх профілів, поперечників, коридорів та дорожніх конструкцій. Програма напряму орієнтована на проектування автомобільних доріг і містить інструменти Surface, Corridor Modeling, Alignment, Section Views, що дозволяють відтворити дорожнє полотно як інженерний об'єкт. Civil 3D підтримує роботу з хмарами точок через ReCap, формує тривимірні моделі дорожнього покриття та виконує інженерний аналіз ухилів, об'ємів та геометрії. Це основне ПЗ для побудови цифрової моделі дороги.

3. QGIS

QGIS – універсальна геоінформаційна система, орієнтована на просторовий аналіз, геообробку, картографування, роботу з DEM і тематичними шарами. Вона має широкі можливості для аналізу геометрії дорожнього полотна, побудови аналітичних карт, моделювання сценаріїв та візуалізації результатів у географічному контексті. Завдяки плагінам QGIS частково підтримує роботу з хмарию точок, однак її 3D-моделювання доріг є допоміжним і значно слабшим, ніж у Civil 3D. Основна роль QGIS – аналітична та картографічна.

4. ArcGIS Pro + ArcGIS 3D Analyst

ArcGIS Pro – професійна GIS-платформа, орієнтована на просторову аналітику, 3D-моделювання та роботу з великими наборами геоданих. Модуль

3D Analyst забезпечує побудову TIN-поверхонь, багат шарових 3D-сцен, аналіз ухилів, висот, видимості, об'ємів та морфології рельєфу. ArcGIS Pro підтримує формати LAS/LAZ, виконує класифікацію та візуалізацію хмар точок, побудову профілів і 3D-геометрії дорожнього середовища. Програму застосовують для детальної аналітики та створення топогеодезичних моделей, але її інженерний функціонал дорожнього проектування слабший, ніж у Civil 3D чи OpenRoads. Основна роль - геоаналітика, 3D-візуалізація та робота з великими ГІС-даними. [64]

5. AutoCAD

AutoCAD – базове CAD-середовище, яке використовується для створення високоточних 2D- та 3D-креслень, векторизації та підготовки графічних матеріалів. Воно підтримує формати DWG і DXF, забезпечує роботу з тривимірними об'єктами, але не має вбудованого потужного функціоналу просторової аналітики або дорожнього моделювання. Основне завдання AutoCAD у процесі побудови цифрової моделі дорожнього полотна – геометричне оформлення та структуризація даних, які далі використовуються у Civil 3D або QGIS.

6. Bentley OpenRoads Designer / ContextCapture

OpenRoads Designer – інженерне ПЗ Bentley, спеціалізоване на проектуванні автомобільних доріг, мостів та інфраструктури. Система забезпечує розробку трас, профілів, коридорів, параметричних моделей дорожнього полотна та детальної конструктивної геометрії. OpenRoads є прямим аналогом і конкурентом Civil 3D, але має сильніші можливості для BIM-підходу та узгодження міждисциплінарних моделей. [65]

ContextCapture – програмний модуль Bentley для фотограмметрії, який створює високоточні 3D-сітки, цифрові моделі місцевості та об'єктів на основі фотографій або відео. У зв'язці з OpenRoads забезпечує побудову реалістичних моделей місцевості та інтеграцію з інженерною дорожньою моделлю. Основна роль комплексу – повний цикл від реалістичного 3D-знімання до інженерного проектування.

7. TerraSolid Suite (TerraScan, TerraModeler, TerraRoads)

Програмний комплекс TerraSolid спеціалізується на професійній обробці аеролазерного сканування та хмар точок великої щільності.

- TerraScan – основний модуль для класифікації, фільтрації шумів, сегментації та глибокої обробки великих хмар точок, включаючи ALS, MLS та TLS-знімання.
- TerraModeler – інструмент для побудови TIN-моделей, рельєфів, профілів, перерізів та моделювання поверхонь на основі LiDAR-даних.
- TerraRoads – модуль, орієнтований на дорожню інженерію: формування осей, поперечників, геометрії полотна, обчислення об'ємів та аналізу дорожніх параметрів.

Пакет TerraSolid часто використовується в авіа- та мобільному LiDAR-скануванні, має найточніші алгоритми класифікації, але потребує MicroStation як основної платформи. Основна роль – високоточна обробка та інженерна підготовка LiDAR-даних. [66]

8. Pix4D Survey / Pix4D Mapper

Pix4D – провідне ПЗ у сфері фотограмметрії та UAV-знімання.

Pix4D Mapper виконує створення щільних хмар точок, ортофотопланів, DSM/DTM та 3D-моделей на основі аерофото. Платформа широко використовується для дорожніх об'єктів, будівництва та геодезичних робіт.

Pix4D Survey – інженерний модуль, орієнтований на перенесення фотограмметричних даних у CAD-середовище. Він забезпечує векторизацію, побудову брейклайн-ліній, формування TIN-моделей та експорт у Civil 3D або інші CAD-платформи. У контексті дорожньої моделі Pix4D підходить для отримання вихідних геоданих з UAV-зйомки та швидкої підготовки до подальшого інженерного моделювання. [67]

Ці системи не є конкурентними, а навпаки – використовуються як взаємодоповнюючий програмний комплекс, забезпечуючи повний цикл створення й аналітики цифрової моделі.

Таблиця 1.1

ПЗ	Ключове завдання	Роль у процесі	Обробка хмар точок	Функції моделювання	Просторовий аналіз
ReCap	Очищення й геоприв'язка	Первинна обробка	+	mesh-модель, реєстрація	-
CloudCompare	фільтрація та порівняння	аналіз хмари	+	mesh, DTM, профілі	аналіз відстаней, перетини, різниця поверхонь
AutoCAD	креслення та геометрія	оформлення	-	-	-
ArcGIS Pro / 3D Analyst	аналіз рельєфу, побудова TIN, робота з LAS, просторовий аналіз	геоаналітика та 3D-візуалізація	+	TIN/DTM, 3D-модель	ухили, експозиції, гідромодель, поверхневі потоки
Bentley OpenRoads Designer	проектування трас, профілів, коридорів, геометрії дороги	інженерне моделювання	-	TIN	аналіз траси, профілі, об'єми
ContextCapture	створення 3D-сітки, DTM/DSM, побудова моделі місцевості	генерація моделей та вихідних даних	+	3D-mesh, DTM/DSM	мінімальний (огляд моделі)

TerraScan (TerraSolid)	класифікація, фільтрація, сегментація хмар точок	глибока обробка LiDAR	+	DTM, TIN	-
TerraModeler (TerraSolid)	побудова TIN- поверхні, профілів, поперечників	моделюван ня поверхонь	Частко во	TIN, профілі	рельєф, профілі, об'єми
TerraRoads (TerraSolid)	геометрія полотна, брейклайни, об'єми, аналіз параметрів дороги	дорожня інженерія	-	модель дороги	аналіз дорожніх параметрів
Pix4D Mapper	генерування хмари точок, ортофото, DTM/DSM	UAV- фотограмм етрія	+	DTM/DSM, mesh	аналіз висот, DTM/DSM
QGIS	просторовий аналіз і карти	аналітика	+(обме жено)	DTM (базово)	ухили, експозиції, профілі, поверхневі потоки
Civil 3D	побудова 3D дорожнього полотна	ядро моделі	-	коридор, TIN	профілі, об'єми, аналіз коридору

Таблиця 1.1 «Порівняльний аналіз (суть відмінностей)»

AI-орієнтовані інноваційні рішення

Стрімкий розвиток штучного інтелекту, нейронних мереж та обчислювальних геометричних алгоритмів суттєво розширив можливості побудови цифрових моделей дорожньої інфраструктури. Нові AI-орієнтовані інструменти дозволяють автоматизувати етапи, які раніше виконувалися вручну, що значно скорочує час обробки даних та підвищує точність отриманих результатів. [9]

У дорожньому моделюванні використовуються такі сучасні комплекси:

1. *RoadRunner (MathWorks)* – симуляції дорожньої геометрії на основі LiDAR. RoadRunner підтримує імпорт хмар точок у форматах LAS/LAZ та виконує автоматичне відновлення геометрії дорожнього полотна, розмітки, бордюрів та прилеглих конструкцій.

Інструмент орієнтований на:

- генерацію дорожніх сцен для інженерного моделювання
- симуляції автономного транспорту,
- побудову структурованих 3D-моделей на основі сирих LiDAR-даних,
- інтеграцію з MATLAB/Simulink для подальших розрахунків.

Його ключова перевага – швидке AI-орієнтоване відтворення дорожнього середовища з мінімальною участю оператора. [14]

2. *AI-класифікація та фільтрація хмар точок у сучасних геопросторових платформах.* Низка професійних пакетів уже інтегрує AI-функції у стандартні модулі обробки хмар точок:

- ArcGIS Pro (ModelBuilder + Deep Learning) – сегментація та розпізнавання об'єктів місцевості; [64]
- Bentley ContextCapture / OpenRoads – автоматичне виділення дорожніх елементів, бордюрів, розмітки; [65]

- Pix4D Survey AI-Tools – автоматичне створення ребер, брейклайнів та векторних ліній уздовж дороги. [67]

Ці рішення дозволяють отримати детальні та структуровані моделі значно швидше, ніж при традиційній ручній векторизації.

3. Перспективні інструменти на основі машинного навчання

До новітнього покоління алгоритмів належать:

- Semantic Segmentation of LiDAR Point Clouds (UNet, KPConv) – автоматичне визначення класів точок з точністю 85–95%; [15]
- AI-оптимізація TIN-поверхонь – локальне згладжування, адаптивна триангуляція, виявлення геометричних аномалій;
- ML-аналіз стану покриття – пошук дефектів асфальту, прогнозування зносу.

Ці інструменти дозволяють переходити від статичних 3D-моделей до інтелектуальних цифрових двійників дорожньої інфраструктури.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1

У першому розділі розглянуто сучасний стан, методологічні підходи та програмно-інструментальне забезпечення, що застосовуються для побудови цифрової моделі дорожнього полотна на основі хмари точок. Проаналізовано джерела отримання просторової інформації, серед яких найбільшої актуальності набувають технології LiDAR та наземного лазерного сканування, що забезпечують підвищену деталізацію, високу щільність даних і можливість автоматизованого тривимірного моделювання. Узагальнено, що хмара точок є базовим інформаційним середовищем, здатним найбільш точно відтворювати фактичний стан дорожнього покриття та прилеглої території.

Розглянуто роль геоінформаційних технологій у формуванні, обробці та аналізі просторових даних. Поєднання ГІС-підходів із LiDAR-технологіями

створює передумови для точного, комплексного та оперативного моделювання дорожніх об'єктів у цифровому середовищі.

Проведений порівняльний аналіз програмних засобів AutoCAD, Autodesk Civil 3D, QGIS, CloudCompare та ін. показав доцільність їх комплексного використання. Civil 3D є основним інструментом побудови цифрової моделі дорожнього полотна, CloudCompare та ReCap – спеціалізованими засобами для обробки хмари точок, QGIS – платформою просторового аналізу, а AutoCAD – середовищем векторизації та оформлення креслень.

РОЗДІЛ 2. МЕТОДИЧНІ ЗАСАДИ ПОБУДОВИ ЦИФРОВОЇ МОДЕЛІ ДОРОЖНЬОГО ПОЛОТНА

					ДИПЛОМНИЙ ПРОЕКТ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Застосування геоінформаційних технологій для побудови цифрової моделі дорожнього полотна на основі хмари точок	Літ.	Арк.	Аркушів
						1	14	
Виконала		Рафальська К.Б.				30 КНУБА, ГІСУТ, група ГСТМ-24		
Керівник		Горковчук Ю.В.						
Зав. каф.		Карпінський Ю.О						

2.1 Цифрова модель рельєфу (ЦМР): структура, стандарти та вимоги до точності

Цифрова модель дорожнього полотна (ЦМДП, англ. *Digital Roadway Model*) є комплексною геометричною, семантичною та атрибутивною цифровою структурою, що описує просторову конфігурацію дороги, її поперечний та поздовжній профілі, елементи конструктивного облаштування та характеристики взаємодії з навколишнім рельєфом. На відміну від традиційних проєктних креслень, ЦМР являє собою інтегровану тривимірну інформаційну модель, сформовану на основі хмар точок LiDAR-сканування, фотограмметрії або GNSS- та тахеометричних вимірювань у поєднанні з CAD/GIS технологіями.

У сучасних інженерно-геодезичних та транспортних дослідженнях цифрові моделі дорожніх покриттів застосовуються для:

- проєктування та реконструкції автомобільних доріг;
- аналізу просторової відповідності траси рельєфу;
- моделювання земляного полотна;
- прогнозування деформацій та оцінювання технічного стану;
- створення BIM-орієнтованих цифрових двійників транспортної інфраструктури.

Формування цифрової моделі дороги потребує суворого дотримання вимог точності, структурної ієрархії, стандартизації форматів обміну та методів побудови поверхонь. Ключову роль у цьому відіграють міжнародні стандарти на дані LiDAR (ASPRS LAS 1.4), галузеві дорожні стандарти (AASHTO, FGSV), українські норми (ДБН, ДСТУ), а також вимоги щодо точності геодезичної зйомки та побудови TIN-поверхонь. [29]

Поняття та структура цифрової моделі дорожнього полотна

Цифрова модель дорожнього полотна може розглядатися як сукупність геометрично описаних об'єктів, що репрезентують реальну конструкцію

дороги в її просторовій повноті. Вона створюється на основі таких типів вихідних даних: [43]

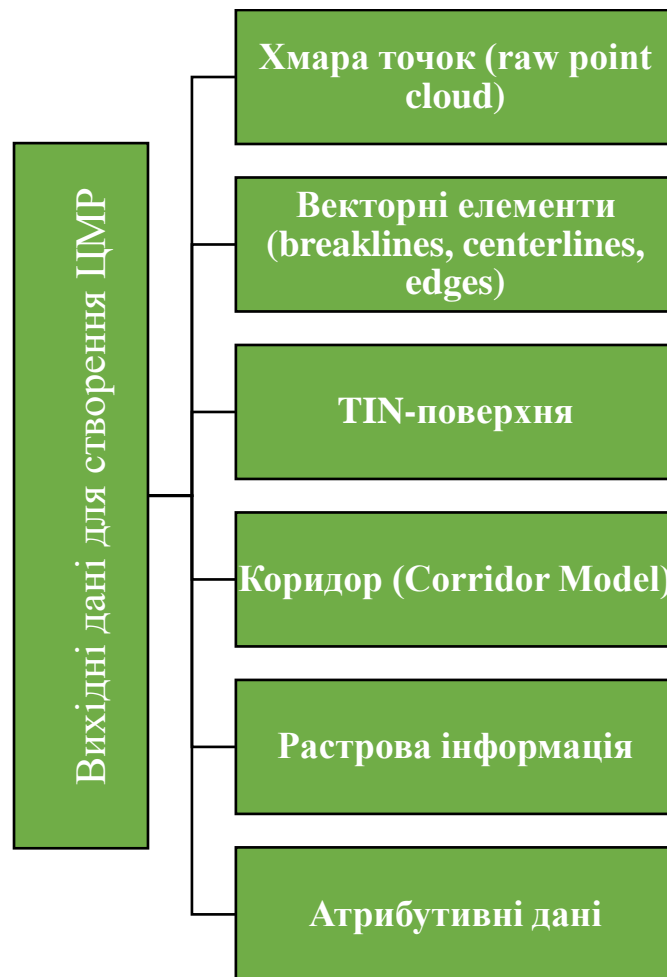


Рис 2.1 «Основні компоненти формування цифрової моделі дороги»

- Хмара точок (raw point cloud) — результати лазерного сканування або фотограмметричних побудов.
- Векторні елементи (breaklines, centerlines, edges) — структурні лінії, що описують ключові сегменти поверхні.
- TIN-поверхня — триангуляційна модель дорожнього полотна, що забезпечує неперервність геометрії.
- Коридор (Corridor Model) — параметрична модель дороги у САД-програмі (Civil 3D, OpenRoads), що містить шаблони конструктивних шарів.
- Растрова інформація — ортофотоплани, DEM, карти ухилів, hillshade.

- Атрибутивні дані — характеристики покриття, конструктивних шарів, ухилів, висотних відміток, поперечних профілів тощо.

У структурному сенсі цифрова модель дорожнього полотна складається з таких ключових елементів:

1. Геометричні елементи

До основних геометричних елементів цифрової моделі дорожнього полотна належить центральна вісь (траса), яка визначає просторове положення дороги і включає кутові точки, криві та перехідні криві. Важливу роль відіграють також кромки проїзної частини, що задають фактичну ширину дорожнього полотна та окреслюють межі руху.

До детальних структурних елементів моделі відносяться бордюри, узбіччя, укоси, відвали та кювети, які формують загальну конструкцію дороги та визначають її інженерні властивості. Окреме значення мають поперечні профілі — перетини траси, за допомогою яких встановлюється форма дорожнього одягу, конфігурація уклонів і взаємодія проїзної частини з прилегливими елементами земляного полотна. [18]

2. Тривимірні поверхні

До тривимірних компонентів цифрової моделі належить TIN-поверхня дорожнього полотна, яка формується на основі брейклайнів і забезпечує коректне відтворення геометрії проїзної частини та прилеглих елементів. Важливим елементом є також цифрова модель рельєфу (DTM), що використовується для аналізу земляних робіт, визначення обсягів переміщення ґрунту та оцінювання взаємодії дороги з природним ландшафтом. Окрему групу становлять моделі конструктивних шарів дорожнього одягу, які описують вирівнювальні, основні та верхні шари покриття та дозволяють відобразити їх просторову структуру у тривимірному середовищі. [52]

3. Семантичні атрибути

Семантичні атрибути цифрової моделі містять класифікацію матеріалів, що використовуються в конструкції, інженерні параметри дороги, зокрема ухили, радіуси кривих і характеристики поздовжнього профілю, а також об'єкти дорожньої інфраструктури, такі як дорожні знаки, бар'єри, системи водовідведення та інженерні мережі. Ці дані забезпечують змістовне наповнення моделі та дозволяють проводити тематичний і технічний аналіз.

4. Моделі взаємодії дороги з рельєфом

Моделі взаємодії дороги з рельєфом охоплюють процеси моделювання земляного полотна, визначення положення конструктивних елементів дороги відносно природного рельєфу, а також обчислення обсягів земляних робіт (cut/fill). Такий підхід дає можливість оцінити ступінь втручання у природний ландшафт, оптимізувати проєктні рішення та забезпечити узгодженість між дорожньою конструкцією і навколишнім середовищем.

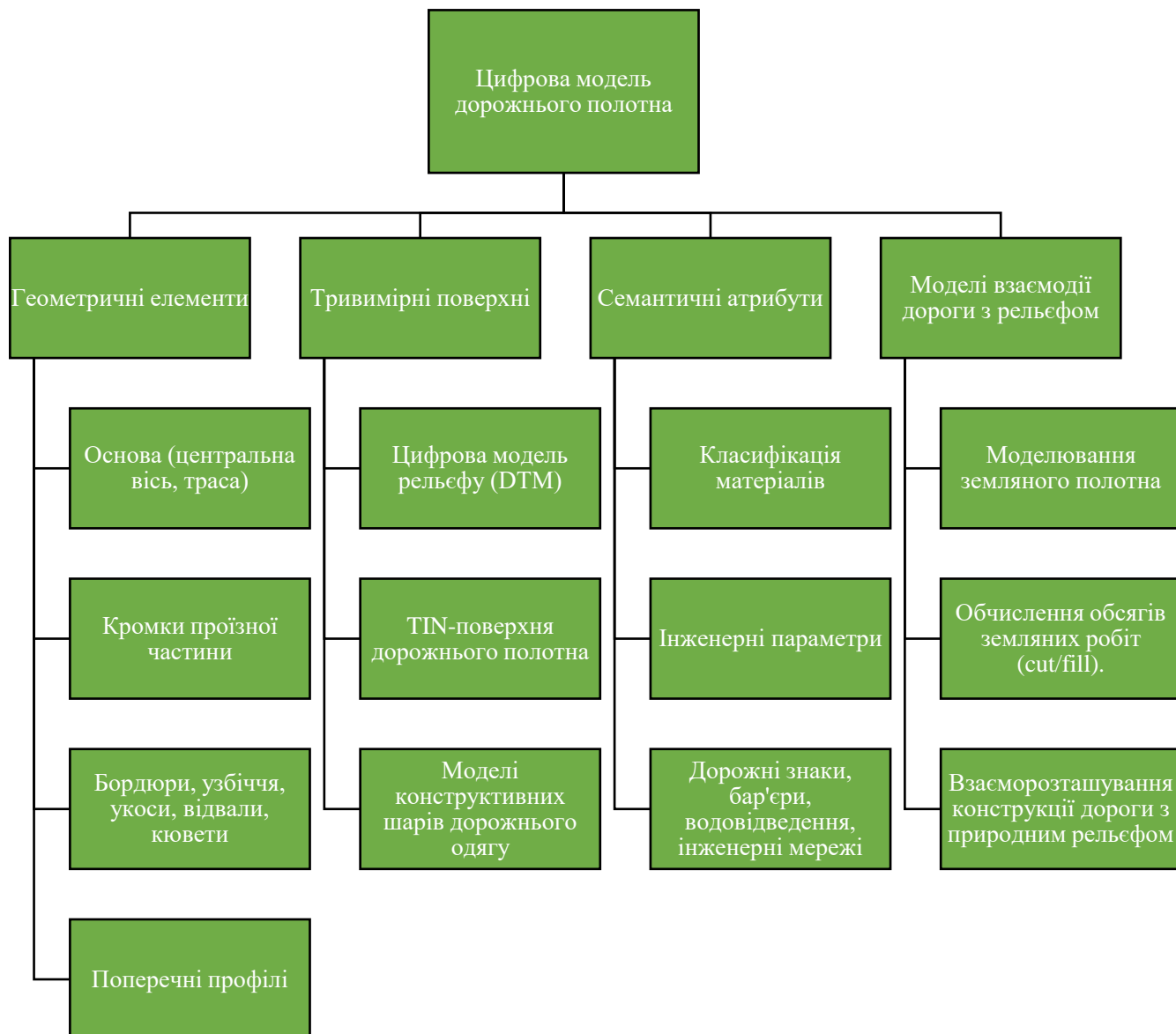


Рисунок 2.2 «Складова цифрової моделі дорожнього полотна»

2.2 Формування ЦМР та вимоги до точності цифрової моделі дорожнього полотна

Точність ЦМР визначається вимогами дорожніх стандартів та норм геодезичних зйомок. Основними параметрами є:

1. Точність планового положення

Для високоточної інженерної зйомки планова точність зазвичай становить 10–20 мм, що відповідає вимогам ДСТУ Б В.2.1-27:2010. Мобільні LiDAR-системи забезпечують точність у межах 20–50 мм залежно від умов

збору даних і конфігурації обладнання. У випадку аерофотозйомки з використанням БПЛА показник планової точності зазвичай перебуває на рівні 20–30 мм, за умови застосування наземних опорних точок (GCP), які дозволяють стабілізувати модель та зменшити похибки геоприв'язки.

2. Точність висотних відміток

Точність висотних відміток у цифровій моделі дорожнього полотна також регламентується відповідними нормами.

Для дорожнього будівництва нормована висотна похибка зазвичай становить близько 10–20 мм, що забезпечує достатню деталізацію при формуванні профілів та TIN-поверхні.

При використанні наземного лазерного сканування (TLS) висотна точність може досягати 3–10 мм локально, завдяки високій щільності та стабільності вимірювань.

У випадку фотограмметрії з використанням БПЛА типові похибки висотного положення перебувають у межах 20–40 мм, залежно від умов зйомки, наявності GCP та якості оптичних даних.

3. Щільність хмари точок

Щільність хмари точок є одним із ключових параметрів, що визначає деталізацію та рівень опрацювання цифрової моделі дорожнього полотна. [54]

Для мобільних LiDAR-систем типовою є щільність у діапазоні 200–1000 точок на квадратний метр, що забезпечує високу деталізацію дорожнього покриття та прилеглих елементів.

Статичне наземне лазерне сканування (TLS) дає значно вищу щільність — від 2000 до 10000 точок на квадратний метр, дозволяючи отримати надзвичайно точну локальну геометрію.

У випадку БПЛА-фотограмметрії щільність зазвичай становить 100–300 точок на квадратний метр, що є достатнім для побудови моделі місцевості та аналізу дорожнього рельєфу за умови наявності якісних знімків та правильних алгоритмів обробки.[54]

Згідно з вимогами **ASPRS Positional Accuracy Standards for Digital Geospatial Data (2014)**, оцінювання точності повинно проводитися методом RMSE та NSSDA.

Стандарти, які регламентують створення ЦМР

Створення цифрової моделі дорожнього полотна має відповідати чинним нормам дорожнього проектування, оскільки саме вони визначають геометричні параметри дороги, вимоги до поздовжніх та поперечних ухилів, радіуси кривих, структуру земляного полотна та загальні правила формування інженерної моделі. У контексті побудови ЦМР ключовим нормативним документом є **ДБН В.2.3-4:2015 «Автомобільні дороги»**, який задає базові параметри, що мають бути враховані при створенні цифрової моделі.

ДБН В.2.3-4:2015 виступає основним регламентом для цифрового моделювання дорожнього полотна, оскільки чітко визначає геометричні, конструктивні та експлуатаційні характеристики автомобільних доріг. Дотримання вимог цього стандарту забезпечує відповідність цифрової моделі державним нормам та гарантує коректне відтворення просторової геометрії траси, її елементів та структурних складових дорожнього полотна. Завдяки цьому цифрова модель може бути використана для подальшої технічної перевірки, аналізу та валідації, а також інтегруватися у професійні середовища CAD, GIS і BIM, що потребують чіткої відповідності нормативним параметрам та стабільної структурної організації даних. [53]

Оскільки цифрова модель дороги повинна відображати реальні або проєктні параметри дорожньої інфраструктури, ДБН фактично визначає

нормативний каркас, на основі якого формуються осі, профілі, брейклайни та TIN-поверхні.

До ключових параметрів, що згідно з ДБН мають обов'язково відображатися у ЦМР, належать:

- **Ширина смуги руху та проїзної частини.** Наприклад, залежно від категорії дороги та інтенсивності руху стандартом передбачено ширину смуги руху — 3,0–3,75 м.
- **Поперечний профіль, узбіччя, укоси та крайні елементи.** Конфігурація поперечного профілю (нерівності, укоси, узбіччя) повинна відповідати нормам, що передбачають безпечні параметри уклону, ширини та форми.
- **Поздовжній профіль, криві і переходи.** Стандарт визначає допустимі радіуси кривих, перехідні криві, нахили, плавність траси, що має бути відображено у цифровій моделі.
- **Структура земляного полотна та конструктивні шари.** При проектуванні дороги передбачено необхідні шари (підготовчий, основний, покриття), їх товщини, ухили, дренаж та водовідведення. Ці дані важливі для побудови 3D-моделі полотна, особливо коли створюють ЦМР, яка включає не лише поверхню, а й конструкцію дороги.

Роль стандарту ДБН у побудові ЦМР

ДБН В.2.3-4:2015 виконує ключову функцію у створенні цифрової моделі дорожнього полотна, забезпечуючи:

- визначення нормативних геометричних параметрів, що мають відображатися в моделі;
- узгодженість між цифровою моделлю та вимогами дорожніх норм;

- регламентацію формування поперечних і поздовжніх профілів, що впливають на точність TIN-поверхні; [53]
- можливість оцінити відповідність фактичних даних стану дороги нормативам;
- інтеграцію ЦМР у професійні середовища дорожнього проектування.

Таким чином, саме ДБН В.2.3-4:2015 формує нормативну основу побудови цифрової моделі дорожнього полотна, визначаючи її структуру, точність, геометрію та функціональну придатність.

Валідація цифрової моделі дорожнього полотна

Валідація цифрової моделі дорожнього полотна є обов'язковим етапом, що підтверджує достовірність отриманої моделі та її готовність до подальших інженерних розрахунків. Контроль якості здійснюється послідовно і охоплює кілька основних перевірок, спрямованих на виявлення можливих неточностей у геометрії, класифікації точок та структурі TIN-поверхні. [52]

Етап 1: Перевірка точності хмари точок

На цьому етапі хмара точок порівнюється з контрольними опорними даними (GCP, GPS-пікетами), щоб оцінити відхилення та переконатися у правильності просторового положення. Використовують базові показники точності, зокрема RMSE по горизонталі та вертикалі. Це дозволяє виявити можливі зміщення, помилки вирівнювання або локальні неточності, які можуть вплинути на форму дорожнього полотна.

Етап 2: Перевірка правильності класифікації

На цьому етапі контролюється, чи правильно точки віднесені до відповідних класів, особливо класів 2 (ground) і 11 (road surface). Некоректна класифікація може спричинити викривлення TIN-поверхні, появу артефактів

або включення до моделі сторонніх об'єктів, тому важливо переконатися, що всі точки дорожньої поверхні відібрані коректно, а зайві класи — виключені.

Етап 3: Оцінка топологічної коректності

Завершальний етап включає перевірку структури побудованої TIN-поверхні: її неперервності, відсутності дірок та самоперетинів, а також відповідності лінійних елементів — таких як кромки, вісь дороги та брейклайни. Коректність топології гарантує, що модель правильно відтворює геометрію дорожнього полотна і не містить спотворень, які можуть вплинути на інженерні розрахунки.

Формування базової цифрової моделі дорожнього полотна

Формування базової цифрової моделі дорожнього полотна є послідовним та взаємопов'язаним процесом, у якому результати кожного етапу впливають на якість наступних. За необхідності окремі кроки можуть бути повторені (наприклад, очищення чи уточнення геоприв'язки), проте пропуск ключових елементів обробки є неможливим. Процес включає підготовку вихідних даних, їх аналітичну обробку та побудову точної й структуровано узгодженої цифрової поверхні, придатної для подальшого інженерного аналізу, проєктування, моделювання транспортних навантажень або моніторингу технічного стану дороги.



Рис.2.3 «Блок-схема формування базової цифрової моделі дорожнього полотна»

Блок-схема процесу формування базової цифрової моделі дорожнього полотна (рис. 2.1) відображає загальну послідовність виконання робіт, зокрема:

1. Створення брейклайнів та структурних ліній (breaklines)

Брейк лайни фіксують критичні зміни форми рельєфу. Без них TIN-поверхня «згладить» реальну форму дороги, що призведе до помилок у розрахунках ухилів і параметрів профілю. [69]

Тому виділяються: край проїзної частини, верхня і нижня грань бордюру, межа узбіччя, лінії кюветів та укосів, вісь дороги. Брейклайни можуть створюватись автоматично або вручну після аналізу хмари.

Як результат, ми отримуємо структурні геометричні контури, які забезпечують точне формування поверхні дороги.

2. Формування поперечних та поздовжніх профілів дороги

На базі осі дороги через певний інтервал (5–20 м) будуються поперечні профілі. Вони дозволяють визначити поперечні ухили, різницю висот між смугами руху, параметри укріплень узбіч. Поздовжній профіль відображає загальні зміни висоти вздовж траси та використовується для аналізу проєктних ухилів, хвилястості покриття та ділянок деформації. [17]

Таким чином, ми отримуємо інженерні профілі, що дають точне уявлення про геометрію дороги.

3. Побудова TIN-поверхні (у Civil 3D / InfraWorks)

Поверхня створюється на основі хмари точок + брейклайнів + профілів.

TIN (Triangulated Irregular Network) забезпечує: коректне відображення місцевих перепадів висоти, можливість аналізу фухилів, відводів води, колійності, підготовку даних для проектування ремонту або розрахунку обсягів матеріалів. Формується скелет геометрії дороги: осьова лінія, краї проїзної частини, верхні та нижні грані бордюру, межа узбіч, укоси та кювети.

На основі цих даних виконується триангуляція – створення TIN-

поверхні (Triangulated Irregular Network), яка відтворює реальну форму рельєфу в цифровому вигляді. [31]

Для побудови TIN-поверхні самої наявності хмари точок недостатньо. Вона повинна бути структурована, очищена та доповнена геометричними контурами, що відображають реальні межі дорожнього полотна. Кожен етап перетворення хмари точок виконує свою функцію та впливає на точність кінцевої цифрової моделі.

Як результат, формується точна цифрова поверхня дорожнього полотна, готова до інженерного аналізу.

4. Верифікація точності, експорт моделі

Модель перевіряється шляхом порівняння її з контрольними точками та нормативними допусками. Після підтвердження коректності, поверхня експортується у формати, сумісні з інженерними та GIS-платформами. [70]

Як результат, отримуємо перевірену і готову до застосування цифрову модель дороги.

5. Результат створення цифрової моделі дорожнього полотна

Це фінальний продукт, що є основою для реконструкції, контролю технічного стану, 3D-візуалізації, розрахунків параметрів та моделювання.

Таким чином, послідовність операцій, відображена у блок-схемі, формує цілісну методичну структуру побудови базової цифрової моделі дорожнього полотна. Кожен із розглянутих етапів виконує власну функцію у забезпеченні точності, просторової узгодженості та інженерної придатності кінцевої поверхні. Однак ключовим джерелом інформації, що визначає якісні характеристики всієї моделі, є вихідна хмара точок, оскільки саме вона містить просторову деталізацію реальної геометрії дорожнього покриття та прилеглих елементів.

Тому подальший підрозділ присвячено більш детальному аналізу хмари точок як основи цифрового моделювання місцевості, її властивостям, структурі, методам обробки та факторам, що впливають на точність цифрової моделі дороги. Це дозволить глибше зрозуміти роль вихідних даних у процесі 3D-моделювання та оцінити значення коректної підготовки хмари точок для подальших інженерних розрахунків.

ВИСНОВОК ДО РОЗДІЛУ 2

У розділі 2 було детально розглянуто структуру, принципи формування та нормативні вимоги до цифрової моделі дорожнього полотна. ЦМР є комплексною багаторівневою системою, яка включає геометричні об'єкти, поверхневі моделі, семантичні атрибути та елементи взаємодії дороги з рельєфом. Якість і достовірність цифрової моделі безпосередньо залежать від точності вихідної хмари точок, коректності класифікації, дотримання нормативів ДБН і галузевих стандартів, а також від правильності побудови брейклайнів, профілів і TIN-поверхонь.

Встановлено, що мобільні та наземні LiDAR-технології, а також фотограмметрія з використанням БПЛА забезпечують різний рівень точності та щільності даних, що визначає можливості застосування ЦМР у дорожньому проєктуванні, реконструкції та моніторингу. Значну роль відіграє нормативна база (ДБН В.2.3-4:2015, ДСТУ, ASPRS LAS), яка визначає допустимі похибки, геометричні характеристики дороги та вимоги до структури цифрової моделі.

Послідовність побудови ЦМР, представлена у цьому розділі, демонструє логічно узгоджений процес: від підготовки вихідних даних і створення структурних ліній до фінальної верифікації й експорту моделі. Кожен етап виконує критично важливу функцію, забезпечуючи точність геометрії, топологічну коректність та інженерну придатність цифрової моделі.

**РОЗДІЛ 3. РОЗРОБЛЕННЯ АЛГОРИТМІВ СТВОРЕННЯ ЦИФРОВОЇ
МОДЕЛІ ДОРОНЬОГО ПОЛОТНА НА ОСНОВІ ХМАРИ ТОЧОК**

					ДИПЛОМНИЙ ПРОЕКТ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Виконала		Рафальська К.Б.			Застосування геоінформаційних технологій для побудови цифрової моделі дорожнього полотна на основі хмари точок	Літ.	Арк.	Аркушів
.							1	12
Керівник		Горковчук Ю.В.				КНУБА, ГІСУТ, група ГСТМ-24		
Зав. каф.		Карпінський Ю.О			45			

Розділ 3 присвячений комплексному опису технологічного процесу створення цифрової моделі дорожнього полотна (ЦМДП) на основі хмари точок у середовищі ГІС та САД. Сучасні геоінформаційні технології дозволяють інтегрувати результати лазерного сканування та фотограмметричної зйомки в інженерні моделі, забезпечуючи високу точність, деталізацію та структурну узгодженість даних. На відміну від традиційних методів топографічних вимірювань, хмара точок містить мільйони вимірювань, що вимагає застосування спеціалізованих алгоритмів очищення, сегментації, векторизації та моделювання поверхонь.

У даному розділі розглянуто повний алгоритм побудови цифрової моделі дорожнього полотна у ГІС — від імпорту та нормалізації хмари точок до формування структурованих даних для Civil 3D. Окрему увагу приділено процесу векторизації дорожніх елементів, що забезпечує перехід від неструктурованих тривимірних даних до впорядкованої геометрії, придатної для створення TIN-поверхонь, профілів та коридорів. Завершальним етапом є інтеграція побудованої САД-моделі в ГІС, що відкриває можливості для просторового аналізу, 3D-візуалізації, оцінювання проєктних рішень і формування цифрового двійника дорожньої інфраструктури.

Таким чином, розділ 3 демонструє взаємозв'язок між ГІС, САД-середовищами та алгоритмами обробки хмар точок, підкреслюючи їхню роль у створенні високоточних цифрових моделей, необхідних для проєктування, експлуатації та моніторингу автомобільних доріг.

3.1. Алгоритм створення цифрової моделі дорожнього полотна на основі хмари точок в ГІС

Перший етап включає завантаження хмари точок у геоінформаційну систему (QGIS або ArcGIS Pro). (рис.3.1.). Для забезпечення коректної подальшої інтеграції обов'язково перевіряється:

- відповідність системи координат файлу;
- наявність вертикальної компоненти (геоїд, ортометричні висоти);
- необхідність трансформації координат до єдиної проєктної системи.

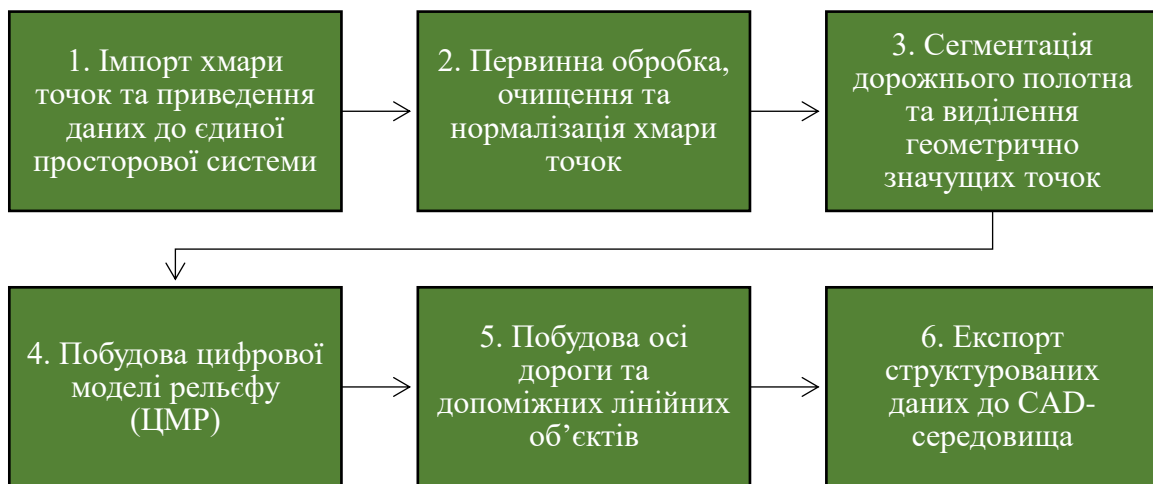


Рис. 3.1 «Алгоритм створення цифрової моделі дорожнього полотна на основі хмари точок »

Етап 1. Імпорт хмари точок та приведення даних до єдиної просторової системи

На цьому етапі виконуються операції первинної візуальної перевірки даних: обстеження щільності, висотного діапазону, виявлення можливих геометричних зсувів та накладень між ділянками. GIS надає можливість відобразити хмару у класифікаційному та інтенсивнісному вигляді, оцінити структуру покриття і визначити області, що потребують очищення. [33]

Етап 2. Первинна обробка, очищення та нормалізація хмари точок

Очищення хмари точок є критично важливим, оскільки її якість визначає точність майбутніх моделей. На цьому етапі використовуються методи:

- *Статистична фільтрація шумів (SOR)* – Алгоритми Statistical Outlier Removal дозволяють виявити й видалити точки, що суттєво відхиляються від локальної щільності. Це особливо актуально для даних, отриманих у складних міських умовах, де можливі артефакти від скла, металу або транспорту. [34]
- *Ручна сегментація та видалення артефактів* – У CloudCompare здійснюється ручне окреслення та видалення об'єктів, що не належать до конструкції дороги (перехожі, автомобілі, тимчасові споруди, рослинність, дрони тощо). [35]
- *Геометричне вирівнювання (registration)* – У разі наявності декількох проходів сканування застосовується ICP-регістрація, яка забезпечує точне поєднання хмар точок і мінімізує міжсканові розбіжності.
- *Базова класифікація* – Хмара точок сегментується на класи: ground, vegetation, road surface, buildings. Ця класифікація є основою для подальшої побудови моделі рельєфу та дорожнього полотна. Після очищення дані повертаються у GIS для структурної й геометричної інтерпретації.

Етап 3. Сегментація дорожнього полотна та виділення геометрично значущих точок

GIS надає потужні інструменти просторової сегментації, необхідної для виокремлення точок, що належать саме дорожньому полотну.

Основні методи:

- *Фільтрація за висотою* – Дорожня поверхня характеризується незначною дисперсією висот, тому точки з близькими Z-координатами легко виокремити
- *Аналіз інтенсивності LiDAR-відбиття* – Асфальт має характерну інтенсивність сигналу, що дозволяє відділити його від ґрунтів, рослинності та бетонних конструкцій.
- *Модель ухилів (slope raster)* – Різкі перепади ухилу дозволяють визначити краї проїзної частини, бордюри, тротуари, кювети та укоси. Цей метод є одним із ключових для структурного виокремлення меж дорожнього полотна. [36]
- *Профільний аналіз уздовж передбачуваної осі* – Створюються вертикальні поперечні січення, що допомагають ідентифікувати ліву та праву бровки дороги, верхні та нижні точки узбіч, границі земляного полотна.

У результаті формується сегментована підмножина точок, що точно описує дорожнє покриття та прилеглі елементи конструкції дороги.

Етап 4. Побудова цифрової моделі рельєфу (ЦМР)

На основі очищених точок класу ground у GIS формується цифрова модель рельєфу (DTM/TIN). Інтерполяційні алгоритми дозволяють відтворити реальну геометрію місцевості, враховуючи нерівності, укоси, насипи, виїмки та інші елементи дорожньої інфраструктури.

GIS забезпечує:

- побудову TIN за алгоритмами Delaunay triangulation; [37]
- генерацію моделей ухилів, експозиції, кривизни;
- аналіз напрямків стоку й виявлення водовідвідних зон;
- візуалізацію локальних деформацій дорожнього покриття.

Створена поверхня рельєфу використовується як базова опорна модель для подальшого інженерного моделювання у Civil 3D.

Етап 5. Побудова осі дороги та допоміжних лінійних об'єктів

GIS дозволяє побудувати математично коректну осьову лінію дороги шляхом аналізу середнього положення сегментованих точок, згладжування полілайна, визначення радіусів кривих і характерних точок.

Крім того, у GIS формується повний векторний каркас дороги, який включає крайки проїзної частини, бровки земляного полотна, лінії укосів, межі тротуарів, брейклайни перелому рельєфу. Ці дані є основою для побудови поверхні дороги в Civil 3D.

Етап 6. Експорт структурованих даних до CAD-середовища

GIS забезпечує експорт усіх отриманих даних у формати, сумісні з CAD:

- **LAS/LAZ** – очищена хмара точок;
- **LandXML** – TIN-поверхня, осьові лінії, брейклайни;
- **DWG/DXF** – векторні об'єкти;
- **SHP** – топологічно структуровані просторові елементи.

Експортовані дані є вихідною інформацією для побудови цифрової моделі дороги у Civil 3D, включаючи створення TIN-поверхні, коридору, поперечних профілів та геометричних елементів дорожньої конструкції. [38]

3.2. Особливості векторизації об'єктів дорожнього полотна

Векторизація об'єктів дорожнього полотна (5й етап) є одним із ключових етапів у процесі переходу від неструктурованих хмар точок до геометрично впорядкованої цифрової моделі дороги. Вона забезпечує перехід від набору тривимірних вимірювань до структурованих лінійних, площинних та топологічних об'єктів, які описують геометрію дорожнього покриття,

земляного полотна та його конструктивних елементів. На основі векторизованих об'єктів формуються TIN-поверхні, коридори, профілі та модельні елементи в CAD, а також здійснюється інтеграція з GIS для аналітичних та картографічних завдань. [39].

Нижче наведено детальний опис особливостей, принципів та алгоритмів векторизації, що використовуються при створенні цифрової моделі дорожнього полотна.

Загальні принципи векторизації дорожніх об'єктів

Векторизація дорожніх об'єктів у середовищі GIS/CAD передбачає поетапне перетворення сегментованих точок хмари на впорядковані геометричні об'єкти, здатні точно описувати конструктивні елементи дороги. Спочатку з хмари точок виокремлюються ті, що належать певним елементам дорожнього полотна – осі, краю проїзної частини, бровкам, укосам або тротуарам.[39] На основі їх просторового положення формується послідовність точок, яка об'єднується у лінію. Ця лінія, як правило, проходить через щільні зони даних, повторює геометрію дороги та потім згладжується математичними методами, щоб позбутися випадкових шумів, отримуючи форму, яка відповідає реальній інженерній кривій. Так утворюються основні лінійні об'єкти – ось дороги, крайки покриття, верхні та нижні бровки земляного полотна або лінії перелому рельєфу. [40]

Паралельно формується й площинна геометрія. Коли потрібно векторизувати поверхню — наприклад, тротуар, узбіччя або зону земляного полотна – на основі сегментованих точок створюється їхня "оболонка", яка описує крайні точки поверхні. Ця оболонка перетворюється на полігон із замкнутим контуром, що відтворює форму площинного об'єкта, після чого очищається від самоперетинів або надлишкових точок. Особливу роль відіграє створення брейклайнів — ліній перелому рельєфу, які зберігають різкі зміни

висот або нахилів. Їх формують шляхом вибору точок на межах різних поверхонь: між проїзною частиною та узбіччям, на верхніх і нижніх бровках укосів, на бордюрах і переходах до тротуарів. Далі ці точки об'єднують у тривимірні лінії з точними значеннями висот, що дозволяє під час побудови TIN-поверхні забезпечити правильний розподіл трикутників і уникнути спотворень рельєфу. [41]

Фінальним етапом векторизації стає формування каркасної моделі дороги, яка складається з впорядкованої системи ліній та контурів, що описують усі її функціональні елементи. Всі векторизовані об'єкти структуруються за окремими шарами, отримують атрибутивні властивості, перевіряються на топологічну правильність та підготовляються до подальшого використання у Civil 3D для побудови поверхонь, коридорів і аналітичних моделей. Такий підхід забезпечує високу точність, геометричну узгодженість і придатність моделі для інженерного проєктування та GIS-аналізу. [42]

Векторизація у контексті дорожньої інженерії передбачає перетворення сегментованих точок хмари на лінійні об'єкти, контури поверхонь, брейклайни, каркасні моделі. Основна мета векторизації – відтворити логічну структуру дороги, яка коректно моделює її поперечний, поздовжній і просторовий профілі.

Векторизація дорожнього полотна на основі хмари точок

Виокремлення ключових елементів конструкції дороги

Хмара точок містить різні типи поверхонь, кожна з яких має індивідуальні геометричні характеристики. Під час векторизації виділяють такі об'єкти як осьова лінія дороги, крайки проїзної частини, верхні та нижні бровки земляного полотна, бордюри, поребрики та тротуари, укоси насипів та

виїмок, контури кюветів і водовідвідних лотків. [43] Кожен із цих елементів потребує різного підходу до сегментації та подальшої лінійної інтерпретації.

Методи визначення лінійних елементів:

1. Векторизація осі дороги формується на основі: мінімальних змін висот уздовж проїзної частини, середньої лінії сегментованої хмари, згладженого полілайну.

2. Векторизація країв дорожнього покриття визначаються за різкими змінами інтенсивності або кольору (асфальт → ґрунт), стрибком висот у зоні бордюрів, аналізом ухилу.

3. Визначення бровок земляного полотна за характерними перегинами рельєфу: верхня бровка – перехід з узбіччя до укосу, нижня бровка – перехід укосу до природного рельєфу. Ці елементи є ключовими для формування TIN-поверхні з коректною геометрією. [44]

4. Векторизація укосів насипів і виїмок для відтворення геометрії укосів застосовується для аналізу нахилу (slope), побудови профільних січень, визначення переломів рельєфу.

5. Векторизація водовідвідних елементів такі як кювети та лотки ідентифікуються за різким локальним мінімумом у Z, V- або U-подібними поперечними формами, характерним напрямком ухилу.

3.3. Інтеграція CAD моделі дорожнього полотна в ГІС

Інтеграція CAD-моделі дорожнього полотна в ГІС є заключним етапом технологічного процесу створення цифрової моделі дороги, що забезпечує поєднання інженерної точності CAD-середовищ з аналітичними, картографічними та візуалізаційними можливостями геоінформаційних систем. [45]

На цьому етапі дорожній коридор, побудований у Autodesk Civil 3D, перетворюється у формат, придатний для просторового аналізу, інтегрується в єдину геопросторову модель території та може використовуватися у широкому спектрі задач – від проєктування до експлуатаційного моніторингу.

1. Експорт ЦМР та векторних об'єктів із Civil 3D

Після завершення побудови дорожнього коридору у Civil 3D необхідно експортувати всі ключові елементи у формати, сумісні з ГІС. До таких належать: TIN-поверхня дороги, Alignment (вісь), Profile (поздовжній профіль), поперечні профілі, Feature Lines, брейклайни та контури земляного полотна. [46]

Для експорту застосовуються формати LandXML, DWG, DXF, SHP, які забезпечують збереження геометрії та топології моделі. Формат LandXML є ключовим, оскільки коректно передає структуру поверхні та параметри проєктної геометрії. [46]

2. Імпорт CAD-даних до ГІС та приведення координат

Перед імпортом у ГІС перевіряється відповідність систем координат. Civil 3D може використовувати як проєктні, так і локальні системи, тому важливо застосувати єдину геопросторову прив'язку, яку коректно розпізнає ГІС. У QGIS чи ArcGIS Pro імпорт здійснюється через: Add CAD Data, Import LandXML, CAD-to-Feature conversion. [47] Після імпорту встановлюється CRS та проводиться перевірка співпадіння CAD-даних з іншими геопросторовими шарами.

3. Конвертація CAD-геометрії у GIS-структури

Імпортована CAD-модель зазвичай складається з необроблених геометрій (polyline, block, hatch), тому її необхідно перетворити у повноцінні GIS-об'єкти: [48]

- Лінійні об'єкти - ось дороги, крайки, брейклайни перетворюються на LineString, зберігаючи просторову точність.
- Полігональні об'єкти - межі земляного полотна, зони відведення формуються як Polygon.
- Точкові об'єкти - характерні точки профілів та переломів рельєфу імпортуються у вигляді Point-версій.

Ця структуризація є необхідною для подальших GIS-аналітичних операцій.

4. Формування растрових і векторних поверхонь у ГІС

Імпортована через LandXML поверхня коридору конвертується у DEM, mesh або multipatch. У GIS-середовищі виконуються: Slope –(карти ухилів), Hillshade – (3D-візуалізація), Cut/Fill –(аналіз земляних робіт), Raster Difference – (порівняння проєктної та фактичної (LiDAR) поверхонь), Hydrological Modeling – (аналіз поверхневого стоку). [49]

Після імпорту поверхні коридору як DEM (растр або mesh), у GIS можливо генерувати такі похідні шари та виконувати аналіз: карту ухилів (slope), hillshade-візуалізацію, гідрологічне моделювання (сток, водозбори) [50], cut/fill-аналіз для оцінки земляних робіт, а також порівняння проєктної поверхні з фактичною (LiDAR) через різницю растрових шарів. Це стандартні функції сучасних GIS-пакетів (ArcGIS Pro, QGIS).

5. 3D-візуалізація та об'єднання з іншими геопросторовими даними

GIS дозволяє інтегрувати CAD-модель дороги з ортофото, хмарою точок, інженерними мережами, кадастровими шарами, DEM місцевості, екологічними та гідрологічними даними.

У 3D Scene (ArcGIS) або QGIS 3D View можна виконувати вимірювання, аналіз поперечних та поздовжніх характеристик, виявлення

узгодженості коридору з рельєфом, а також створювати презентаційні 3D-моделі. [51]

6. Аналітичне використання CAD-моделі у ГІС



Рис. 3.2 Аналітичне використання CAD-моделі у ГІС

GIS надає ті аналітичні можливості, яких немає в CAD, роблячи модель частиною єдиного цифрового середовища управління інфраструктурою.

7. Переваги інтеграції CAD → GIS

Переваги інтеграції CAD → GIS полягає в об'єднанні інженерних і просторових моделей, створенні цифрового двійника дороги, можливості багаторівневої аналітики, підвищенні точності прийняття рішень, спрощенні комунікації між службами та автоматизації експлуатаційного моніторингу.

ВИСНОВОК ДО РОЗДІЛУ 3

У розділі 3 представлено цілісний підхід до створення цифрової моделі дорожнього полотна, який поєднує обробку хмари точок, векторизацію та інтеграцію CAD-моделей у ГІС. Розглянутий алгоритм показує, що точність, структурна узгодженість і коректність просторових зв'язків формуються на всіх етапах – від первинного очищення хмари точок до побудови дорожнього коридору та його аналітичного використання в геоінформаційному середовищі.

Векторизація дорожніх елементів відіграє ключову роль у перетворенні великої кількості неструктурованих вимірювань на впорядковані лінійні та площинні об'єкти, що формують каркас майбутньої моделі.

Інтеграція CAD → GIS розширює аналітичні можливості отриманої моделі, робить її частиною цифрового двійника дороги, забезпечує підтримку прийняття рішень та відкриває потенціал для експлуатаційного моніторингу, моделювання сценаріїв та картографічної візуалізації.

Узагальнюючи, можна стверджувати, що поєднання ГІС-технологій та інженерних CAD-інструментів формує сучасний підхід до моделювання дорожньої інфраструктури, який відповідає вимогам точності, надійності та масштабованості, що необхідним для сучасних проектних і аналітичних задач.

РОЗДІЛ 4. АПРОБАЦІЯ АЛГОРИТМУ СТВОРЕННЯ ЦИФРОВОЇ МОДЕЛІ
ДОРОЖНЬОГО ПОЛОТНА НА ОСНОВІ ХМАРИ ТОЧОК

					ДИПЛОМНИЙ ПРОЕКТ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Виконала	Рафальська К.Б.				Застосування геоінформаційних технологій для побудови цифрової моделі дорожнього полотна на основі хмари точок	Літ.	Арк.	Аркушів
.							1	40
Керівник	Горковчук Ю.В.					58		
Зав. каф.	Карпінський Ю.О				КНУБА, ГІСУТ, група ГСТм-24			

4.1. Вихідні дані та структура хмари точок

4.1.1. Об'єкт дослідження

Об'єктом дослідження є ділянка автомобільної дороги, розташована в умовах гірського рельєфу Швейцарських Альп, у районі з географічними координатами 46.825583°N, 8.382203°E (рис.4.1). Дорога належить до магістральної транспортної інфраструктури та має стратегічне значення для регіону, забезпечуючи рух між населеними пунктами, розташованими у складних природних умовах.

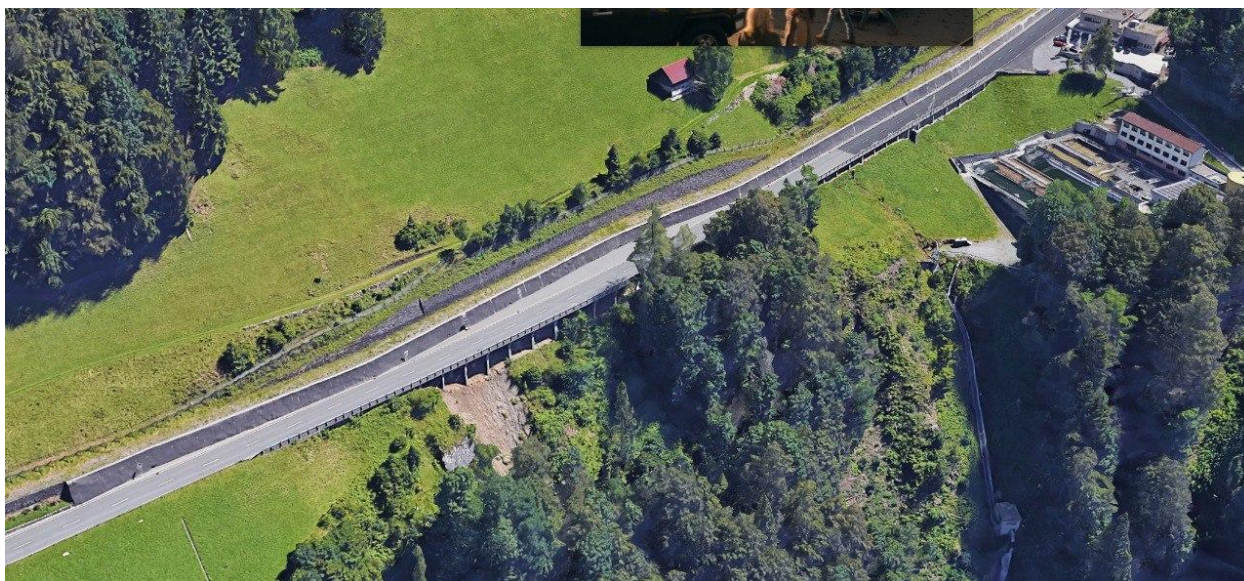


Рисунок 4.1 «Фрагмент хмари точок із зміною рельєфу»

Досліджувана ділянка становить 318 метрів і має багатокомпонентну інженерну структуру. Частина дороги проходить по естакаді, що перетинає яр та природні нерівності місцевості. Наявність естакади зумовлена потребою забезпечити стабільний поздовжній профіль дороги у зоні складного рельєфу, де перепади висот досягають значних величин.

Уздовж дорожнього полотна розташовані системи підпірних стінок, виконані з кам'яного або залізобетонного матеріалу. Ці конструкції утримують укоси та захищають полотно від зсувних процесів, характерних для гірських територій. З південної та північної сторін дороги наявні круті схили, вкриті лісом, що створює додаткові інженерно-геологічні виклики при проєктуванні та експлуатації транспортної мережі.

Комплексний характер цього об'єкта зумовлює необхідність виконання високоточного геодезичного моніторингу. Гірська місцевість, наявність штучних споруд, значні перепади висот, ризик розвитку поверхневих та глибинних деформацій, а також чутливість дорожнього полотна до кліматичних впливів роблять дану ділянку особливо показовою для апробації сучасних технологій просторового моделювання.

Вибір дослідної ділянки обґрунтовується саме її складними інженерними умовами. Саме тут методи наземного лазерного сканування проявляють свої ключові переваги порівняно з традиційними геодезичними вимірюваннями: можливість збирати дані великої щільності, фіксувати складну геометрію конструкцій, укосів та естакад, а також виконувати моніторинг поперечних і поздовжніх змін протягом часових інтервалів.

4.1.2. Обладнання та параметри отримання хмари точок

Для обстеження досліджуваної ділянки було застосовано високоточний геодезичний сканер Leica ScanStation P40 — флагманську модель лінійки лазерних систем швейцарської компанії Leica Geosystems, призначену для інженерних знімачів з міліметровою точністю (рис.4.2)(табл.4.1).



Рисунок 4.2 «Геодезичний сканер Leica ScanStation P40»

Сканування виконувалося зі середньої відстані приблизно 35 м між станціями, що забезпечило оптимальне перекриття секторів огляду та високу якість фіксації геометрії об'єкта. Завдяки цьому поверхня дорожнього полотна, естакади, підпірні стінки та прилеглі укоси були зафіксовані з максимальною деталізацією.

Хмара точок була зібрана в режимі високої щільності та містить у середньому близько 50 000 точок на 1 м², що значно перевищує стандартні показники для дорожніх робіт (зазвичай 5–20 тис. точок/м²)(рис.4.3). Така щільність дозволила отримати детальну цифрову модель складних елементів, включно з естакадними конструкціями, кам'яними укосами та інженерними переходами.



Рисунок 4.3 «Приклад кількості точок на 1м²»

Обробка даних та реєстрація множинних станцій сканування була виконана підрядником із середньою похибкою зшивання 0,003 м (3 мм). Висока точність реєстрації відповідає вимогам до деформаційного моніторингу та дозволяє виконувати коректні порівняння геометрії у часовому розрізі.

Хмара точок містить також RGB-забарвлення, отримане за допомогою інтегрованої камери сканера. Це полегшує інтерпретацію матеріалів, аналіз геометрії укосів та ідентифікацію типів покриття.

Параметр	Значення
Тип сканера	Терестріальний лазерний сканер високої точності
Точність вимірювання відстані	$\pm 1,2$ мм на 50 м
Точність визначення координат точки	до ± 3 мм
Кутова точність	8"
Дальність сканування	до 270 м (природні поверхні)
Максимальна швидкість сканування	1 000 000 точок/с
Роздільність хмари на об'єкті	$\approx 50\,000$ точок/м ²
Похибка зшивання станцій	0,003 м
Наявність RGB зображення	Так, інтегрована камера
Призначення	інженерні знімання, моніторинг, BIM/CIM моделювання

Таблиця 4.1 «Загальні технічні характеристики сканера Leica P40»

Завдяки використанню Leica P40 та високій щільності даних вдалося сформувати надточну цифрову основу для подальшої побудови TIN-поверхні та виконання порівняльного аналізу між моделями різних років. Отримана хмара точок повністю відповідає вимогам до геодезичного моніторингу об'єктів транспортної інфраструктури і створює якісний фундамент для точного аналізу деформацій.

4.1.3. Загальна характеристика вихідних даних

Для виконання апробації алгоритму цифрового моделювання дорожнього полотна були використані просторові дані, отримані за допомогою наземного лазерного сканування (TLS) . Цей метод забезпечує

формування високоточної та надзвичайно деталізованої тривимірної інформації про поверхні, зокрема про конструктивні елементи дорожнього покриття та прилеглі території. Вибір саме TLS визначався необхідністю отримання максимально достовірних даних про фактичну геометрію дороги, включаючи дрібномасштабні нерівності, які не завжди доступні при використанні інших технологій (наприклад, GNSS або аерофотознімання).

Вихідною основою для моделювання стала хмара точок, надана за сприяння Trigonet AG [54] для некомерційного використання, що охоплює ділянку дороги довжиною близько 300 метрів. Такий обсяг дозволив отримати репрезентативний фрагмент реального дорожнього полотна, у межах якого наявні як прямолінійні, так і потенційно складні геометричні ділянки з природними зміненнями рельєфу. Крім самого дорожнього полотна, хмара містила інформацію про узбіччя, укоси, елементи водовідведення, прилеглий ґрунтовий масив та інші компоненти (рис.4.4), необхідні для подальшого аналізу просторової структури.



Рисунок 4.4 «Фрагмент хмари точок із зміною рельєфу»

Особливістю використаних даних є те, що вони були надані у вже завершеному вигляді — після виконання повного циклу польових вимірювань. Тобто ми отримали не сирі дані із сканера, а сформований набір TLS-точок у форматі E57, який є стандартом для обміну результатами лазерного сканування. Такий формат дозволяє зберігати не лише координатну інформацію, а й інтенсивність лазерного сигналу та RGB-значення, що значно

полегшує візуальний аналіз і допомагає розпізнавати елементи поверхні у процесі побудови цифрової моделі.

Хмара точок характеризувалася високою щільністю, що є типовою ознакою TLS-технології. Висока дискретизація поверхні забезпечує можливість детально оцінювати її мікрогеометрію, виявляти пошкодження або нерівності, відстежувати схеми стоку води та локальні зміщення покриття. Такий рівень деталізації особливо важливий під час аналізу дорожніх конструкцій, оскільки навіть незначні відхилення можуть бути ознаками повільних деформацій або наслідком експлуатаційного навантаження.

Структурно хмара точок не містила попередньої класифікації, тобто дані представляли собою суцільну множину просторових точок без розподілу на тематичні групи. До такої ситуації вдається у більшості випадків, коли метою TLS-зйомки є фіксація максимально точного цифрового образу реального об'єкта, а не автоматизована аналітика. Наявність неструктурованої хмари не є недоліком у контексті даного дослідження, оскільки сегментація та виокремлення інженерно значущих ліній профілю виконуються на етапі роботи в Autodesk Civil 3D шляхом побудови брейклайнів і структурних ребер.

Таким чином, вихідні дані, використані для апробації запропонованого алгоритму, являють собою комплексний набір просторової інформації високої точності та повноти. Вони дозволяють не лише сформувати цифрову модель поверхні дороги, але й виконати глибокий багатопараметричний аналіз — від реконструкції поперечного та поздовжнього профілів до визначення просторових змін, що накопичилися протягом 20-річного періоду.

4.1.4. Спосіб отримання та формат вихідної хмари точок

Хмара точок, використана в даному дослідженні, була сформована за результатами наземного лазерного сканування, виконаного фахівцями відповідної організації. На відміну від інших методів збору просторової інформації, TLS забезпечує можливість фіксації поверхонь з високою геометричною точністю та деталізацією, оскільки вимірвальний прилад розташований безпосередньо на землі та працює з мінімальним впливом

атмосфери або великої відстані до об'єкта. Таке розташування дає змогу отримувати дані, у яких навіть дрібні нерівності покриття або незначні зміни у конфігурації узбіч відображаються з надзвичайно високою точністю.

Основою технології TLS є реєстрація променів, що випромінюються сканером з великою частотою та повертаються після відбиття від поверхні. Кожен відбитий імпульс формує у цифровому просторі точку з трьома координатами X, Y, Z

Це дає змогу створити детальну тривимірну модель місцевості, яку об'єднує велика кількість точок — від сотень тисяч до десятків мільйонів. Для дорожньої інфраструктури така технологія є надзвичайно цінною, оскільки дозволяє відобразити:

- фактичний стан поверхні покриття,
- дрібні випадки та нерівності у межах дорожнього полотна,
- геометрію узбіч, укосів та водовідвідних каналів,
- взаємне положення доріжніх елементів у просторі.

Отримана під час сканування інформація була конвертована та надана у форматі E57, який є одним із найпоширеніших і найбільш універсальних форматів зберігання результатів лазерного сканування. Його застосування забезпечує кілька важливих переваг. По-перше, E57 підтримує збереження геометричних даних високої точності без втрати інформації, що є критично важливим для подальшого моделювання. По-друге, формат дозволяє інтегрувати в один файл не тільки просторове положення точок, але й метадані — інтенсивність поверненого сигналу, освітлення, кольорову інформацію RGB тощо. Це значно підвищує інформативність візуального аналізу та дає змогу більш точно ідентифікувати різні типи поверхонь.

Особливо корисною для даного проекту була наявність кольорової інформації RGB, що дозволяє безпосередньо відрізнити дорожнє покриття від ґрунтових ділянок або рослинності (рис.4.5). Кольори не лише покращують візуальне сприйняття моделі, але й підвищують точність ручної сегментації, коли здійснюється побудова брейклайнів у Civil 3D. Наприклад, межа між асфальтовим полотном і ґрунтовим узбіччям у більшості випадків відрізняється за кольором, що полегшує ідентифікацію характерних елементів.

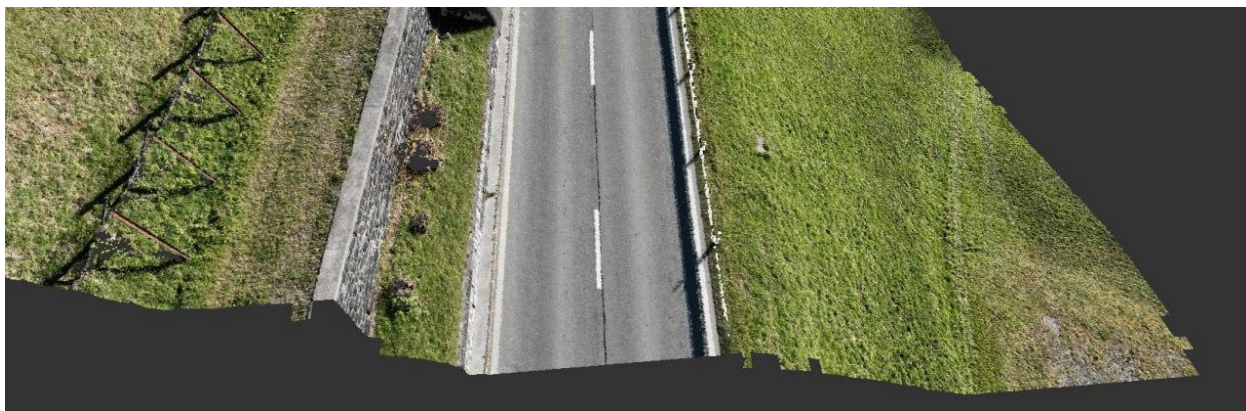


Рисунок 4.5 «Кольорова інформація хмари точок (RGB)»

Перед передачею даних хмари точок пройшла початкову технічну підготовку — доопрацювання, яке традиційно включає перевірку правильності запису, структурування файлів та експорт у формат, зручний для подальшої роботи у Civil 3D. Формат E57 також вирізняється сумісністю з більшістю сучасних програм для роботи з хмарами точок, що значно спростило інтеграцію даних у програмні продукти Autodesk ReCap та Autodesk Civil 3D. ReCap використовується як проміжне середовище для підготовки великомасштабних хмар точок: воно зчитує E57 без втрати точності, відображає дані у 3D-виді та дозволяє виконувати базові операції з аналізу. Після цього дані можуть бути імпортовані у Civil 3D для створення поверхні та подальшого просторового аналізу.

Отже, спосіб отримання та формат хмари точок у даному дослідженні повністю відповідають вимогам щодо точності, деталізації та сумісності з інженерно-геоінформаційними системами. TLS-технологія забезпечила необхідний рівень достовірності для побудови цифрової моделі дороги, а

використання формату E57 гарантує збереження всіх ключових параметрів сканування при перенесенні даних у подальші етапи моделювання.

4.1.5. Особливості структури хмари точок та принципи її подальшої організації

Хмара точок, сформована в результаті наземного лазерного сканування, являє собою вхідний просторовий масив даних, який зберігає реальну геометрію поверхонь без попередньої семантичної інтерпретації. На відміну від структурованих геоданих, у яких кожен елемент має атрибутивний опис, хмара точок у вихідному вигляді — це сукупність мільйонів незалежних точок, що не групуються за категоріями та не містять інформації про належність до конкретних об'єктів місцевості. Структурна особливість саме такої неінтерпретованої хмари визначає специфіку її використання на подальших етапах моделювання. [56] [57]

Подібна неструктурованість TLS-даних є типовою і не вважається недоліком, адже первинною метою лазерного сканування є точне відтворення геометрії, а не автоматичний поділ об'єктів. Саме тому багато досліджень у галузі обробки хмар точок підкреслюють, що класифікація та сегментація мають виконуватися вже на етапі інженерного аналізу, коли відомі задачі моделювання [58] [68].

Наявність RGB-інформації у хмарі точок покращує можливості візуальної оцінки, однак кольори залежать від умов освітлення, тіней та інтенсивності відбиття. Через це в автоматичному режимі вони не можуть надійно слугувати основою для поділу поверхонь. У сучасних роботах, що аналізують дорожню інфраструктуру за даними TLS, підкреслюється важливість опори на геометричні особливості, а не лише на колір. [62] [65]

Одним із ключових етапів структурування хмари точок є виокремлення характерних ліній, які визначають форму дорожнього полотна: країв проїзної частини, осі дороги, ліній перелому укосів, границь водовідвідних елементів тощо. У TLS-даних такі лінії не задані явно, проте їх можна відновити за допомогою аналізу локальних змін висот, нахилів та різких переходів у

поверхні. Методологічні основи таких підходів ґрунтовно описані у літературі з цифрового моделювання поверхонь. [63]

Для побудови інженерної TIN-поверхні у Civil 3D важливим є формування брейклайнів (рис.4.6), які забезпечують коректну топологію моделі та уникнення небажаних спотворень триангуляції. Структуровані лінії дозволяють алгоритмам формувати трикутники на основі реальних геометричних особливостей дороги, що неможливо при використанні сирих, неупорядкованих даних. Саме тому інженерні рекомендації Autodesk підкреслюють необхідність ручного або напівавтоматичного створення брейклайнів у випадку складних об'єктів. [59] [60]

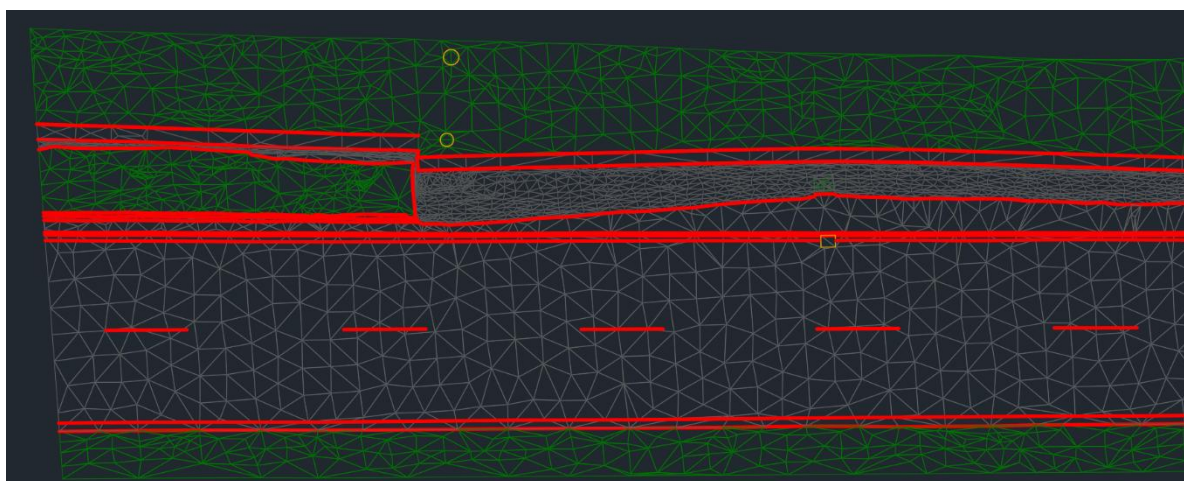


Рисунок 4.6 «TIN-поверхня з брейклайном»

У хмарі можуть міститися і неінформативні точки — рослинність, шумові відбиття, тимчасові предмети. Такі дані потрібно відсікати або ігнорувати, аби уникнути викривлень моделі. Сучасні інструменти обробки, зокрема CloudCompare, передбачають низку алгоритмів для видалення шумів, статистичної фільтрації та відокремлення локальних кластерів (рис.4.7-4.8).

Дослідження, що аналізують точність TLS, також вказують на необхідність попереднього очищення даних перед побудовою моделі. [61] [69]

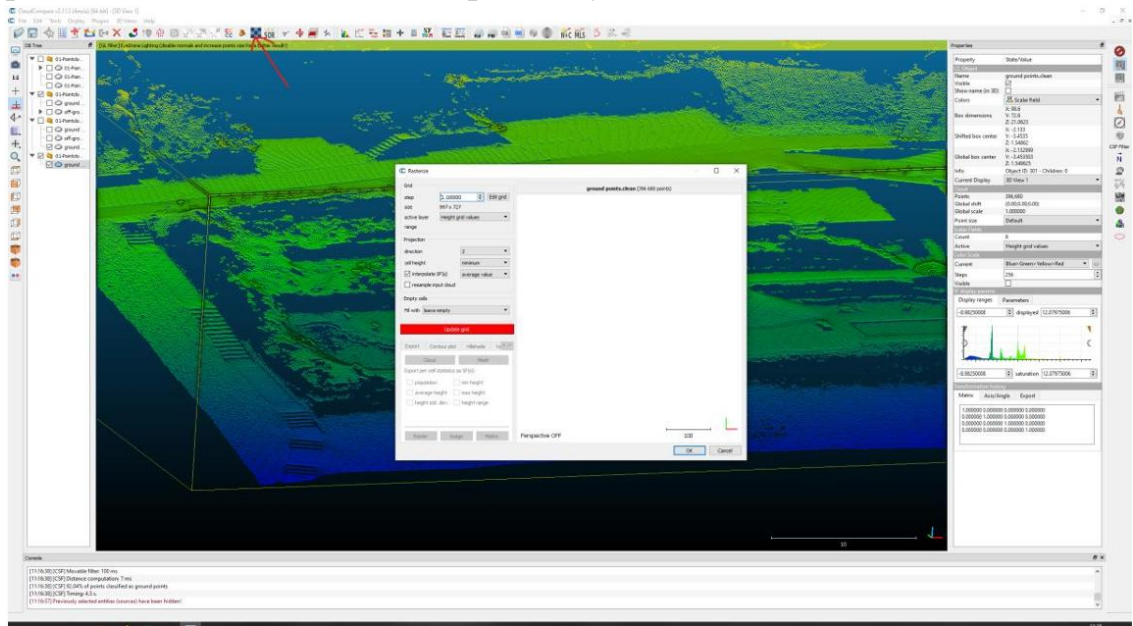


Рисунок 4.7 «Растрезація, для прорідження хмари»

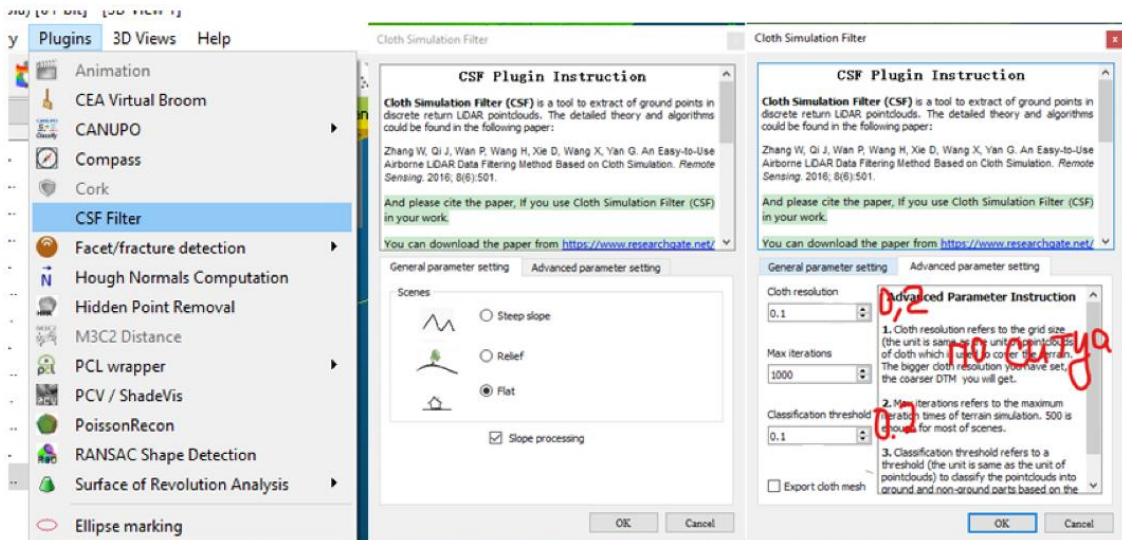


Рисунок 4.8 «Плагін CloudCompare для фільтрації точок»

У контексті моніторингу стану дороги та аналізу деформацій структура хмари точок відіграє ключову роль. Завдяки високій щільності та точності TLS можливе виявлення навіть незначних змін поверхні, таких як колійність, дрібні просідання або локальні підйоми. Різні дослідження демонструють успішність використання TLS для визначення геометричних змін дорожнього полотна з високою точністю. [64] [65]

4.2. Імпорт хмари точок, створення базової та робочої 3D моделі

4.2.1. Попередня підготовка даних перед імпортом

Обробка хмари точок у Autodesk ReCap Pro є фундаментальним етапом перед створенням інженерної TIN-поверхні в Civil 3D. ReCap виконує роль проміжної платформи, у якій сирі дані лазерного сканування приводяться до стану, придатного для САD-моделювання. Такий підхід відповідає сучасним рекомендаціям виробника програмного забезпечення Autodesk та загальноприйнятим методикам роботи з TLS-даними.

Першим кроком є завантаження первинного файлу E57, який містить точки, інтенсивність, RGB-значення та дані щодо просторового позиціонування (рис4.9-4.12).

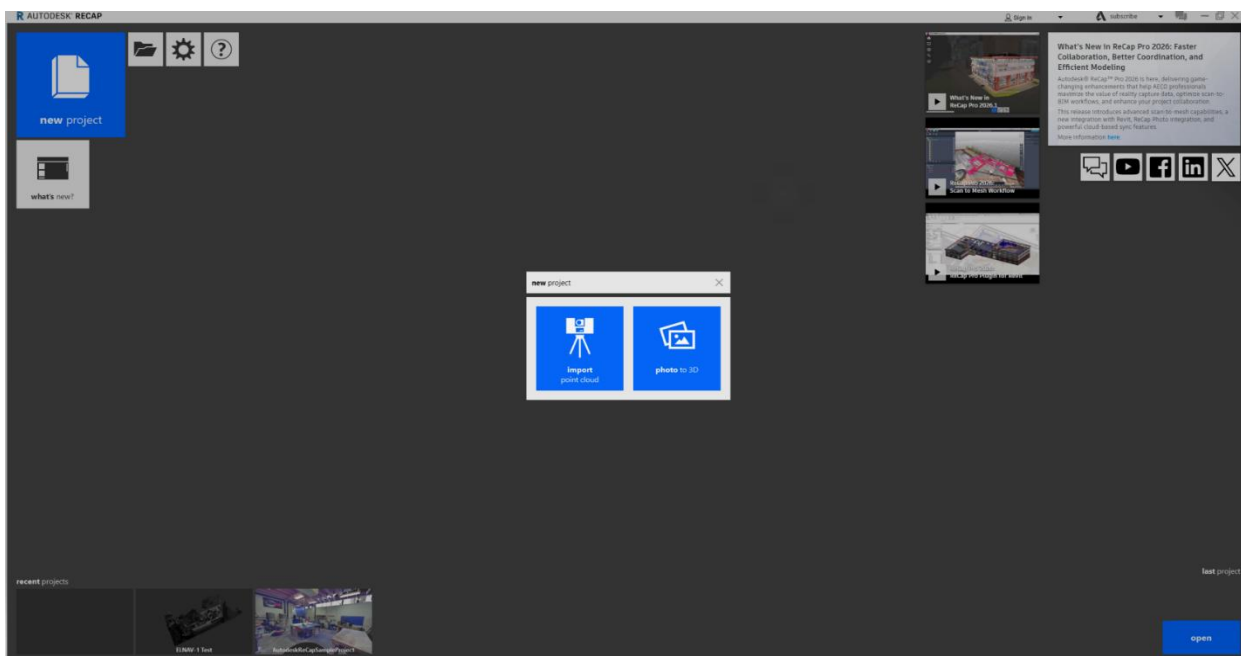


Рисунок 4.9 «Процес імпорту хмари точок»

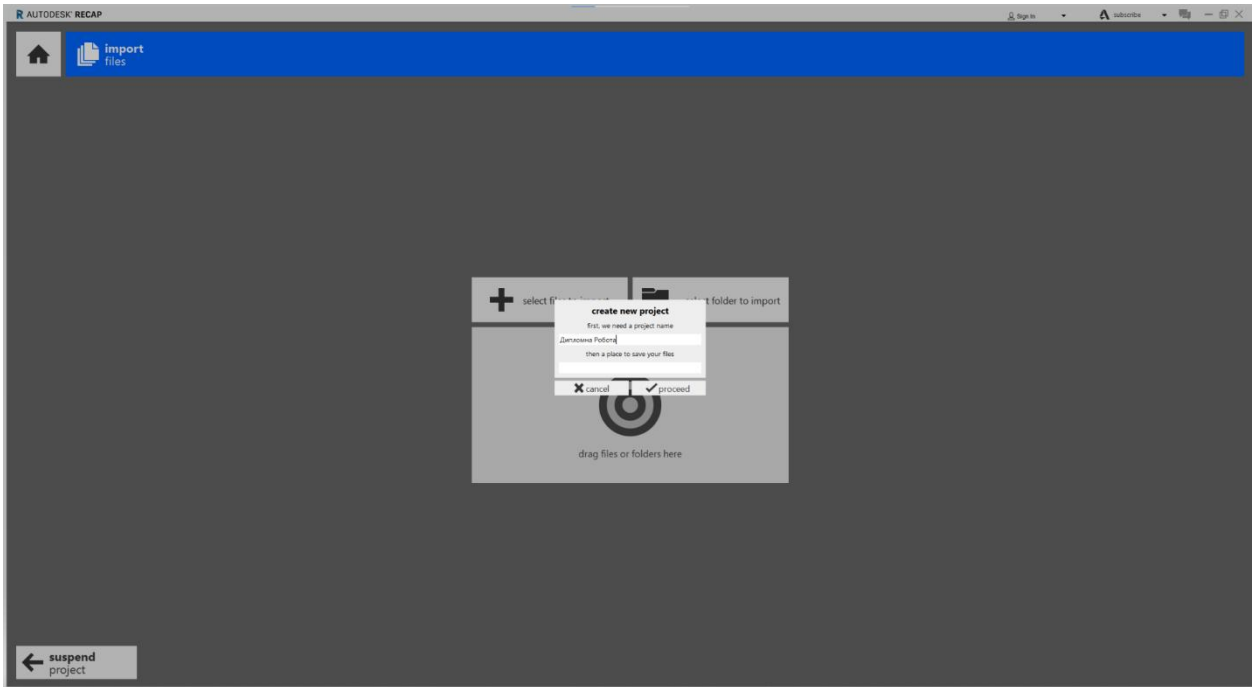


Рисунок 4.10 Підписання файлу хмари точок та вибору місця збереження

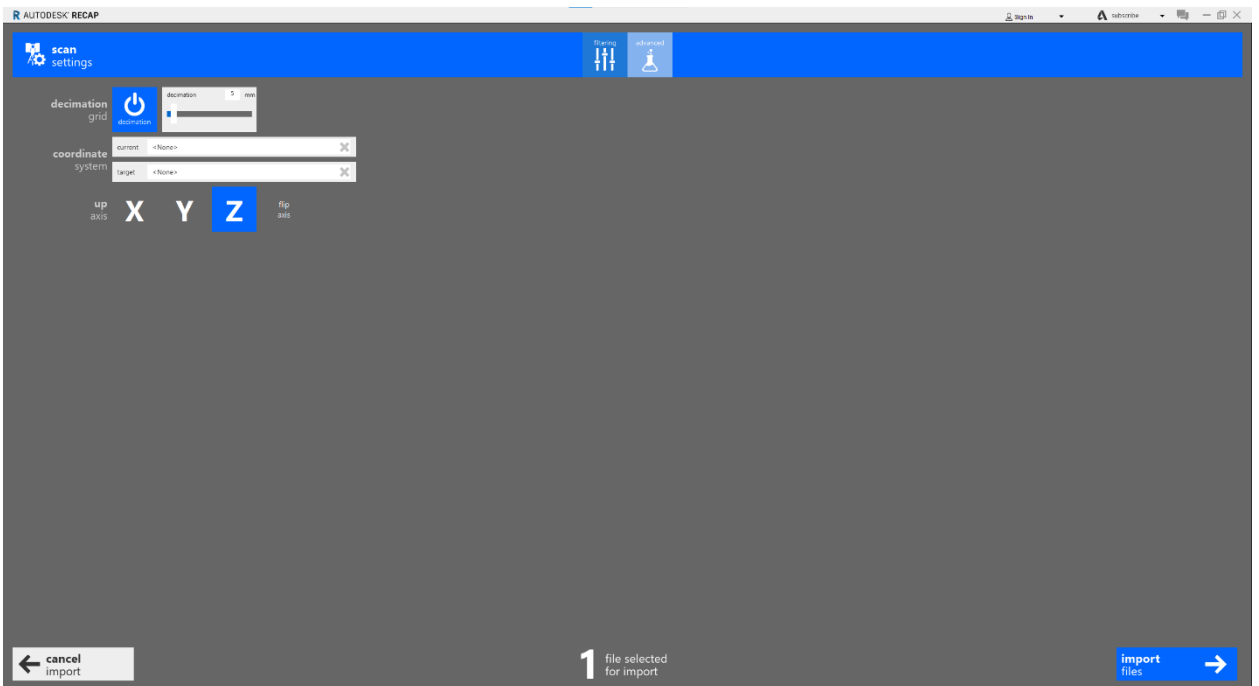


Рисунок 4.11 «Вибір налаштувань конвертації хмари точок»

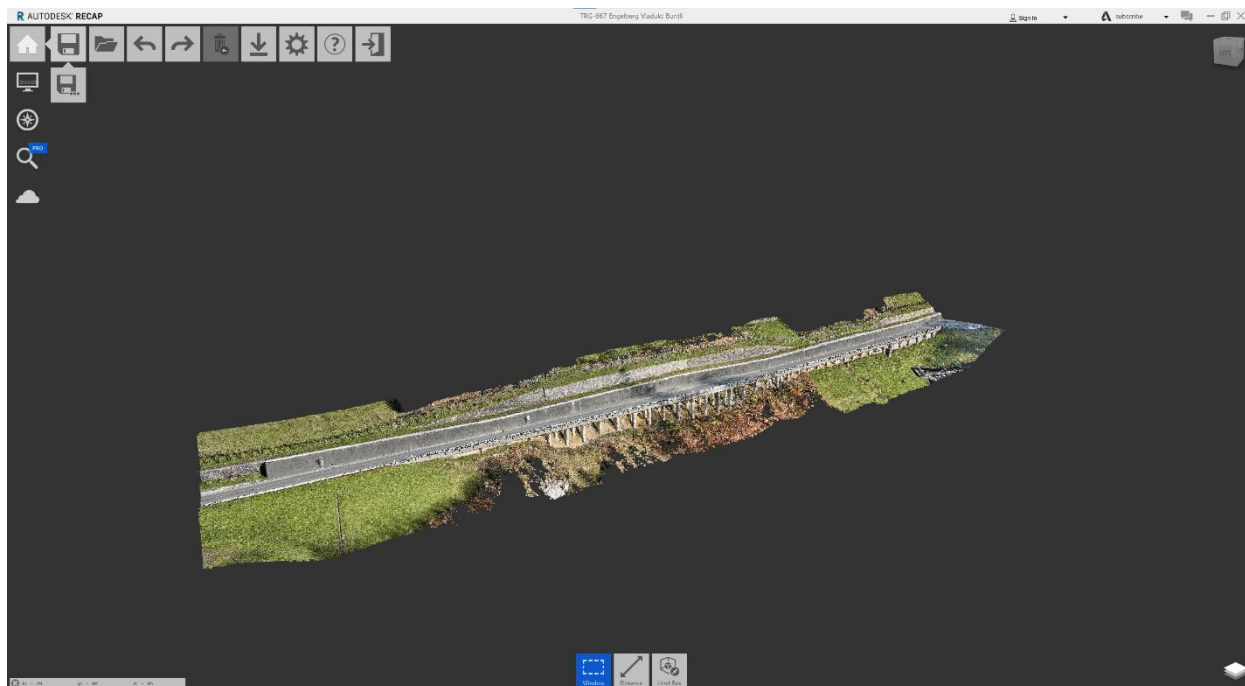


Рисунок 4.12 «Конвертована хмара точок для продуктів Autodesk»

Виконана у середовищі Autodesk ReCap Pro первинна обробка хмари точок дала змогу перетворити вихідний файл E57 на оптимізований та структурований набір даних, придатний для подальшого інженерного моделювання. На етапі імпорту, очищення, фільтрації та обрізки було усунуто шумові компоненти, видалено зайві ділянки та забезпечено коректність просторового вирівнювання сканів. Застосовані інструменти ReCap дозволили сформувати компактний, однорідний та якісно підготовлений масив точок, який точно відображає геометрію дорожнього полотна. Це стало необхідною передумовою для подальшої побудови TIN-поверхні у Civil 3D та проведення аналізу деформацій у наступних розділах роботи.

4.2.2. Імпорт хмари точок у Civil 3D

Після завершення попередньої обробки даних у Autodesk ReCap Pro сформована хмара точок експортується у форматах RCP/RCS, які є нативними для інженерних продуктів Autodesk. Формати забезпечують збереження повної геометричної структури, кольорової інформації, системи координат та оптимізованої індексації, що значно прискорює подальшу роботу у Civil 3D. На цьому етапі відбувається безпосереднє інтегрування підготовленої хмари

точок у середовище Civil 3D, яке слугує основною платформою для побудови інженерних поверхонь та подальшого аналізу. [59] [60] [61]

Перед імпортом хмари точок було створено робочий файл (DWG) із заздалегідь налаштованою локальною системою координат, одиницями вимірювання та стилями відображення поверхні та профілів (рис.4.13). Це відповідає рекомендаціям Autodesk щодо роботи з просторовими даними великого обсягу [59].

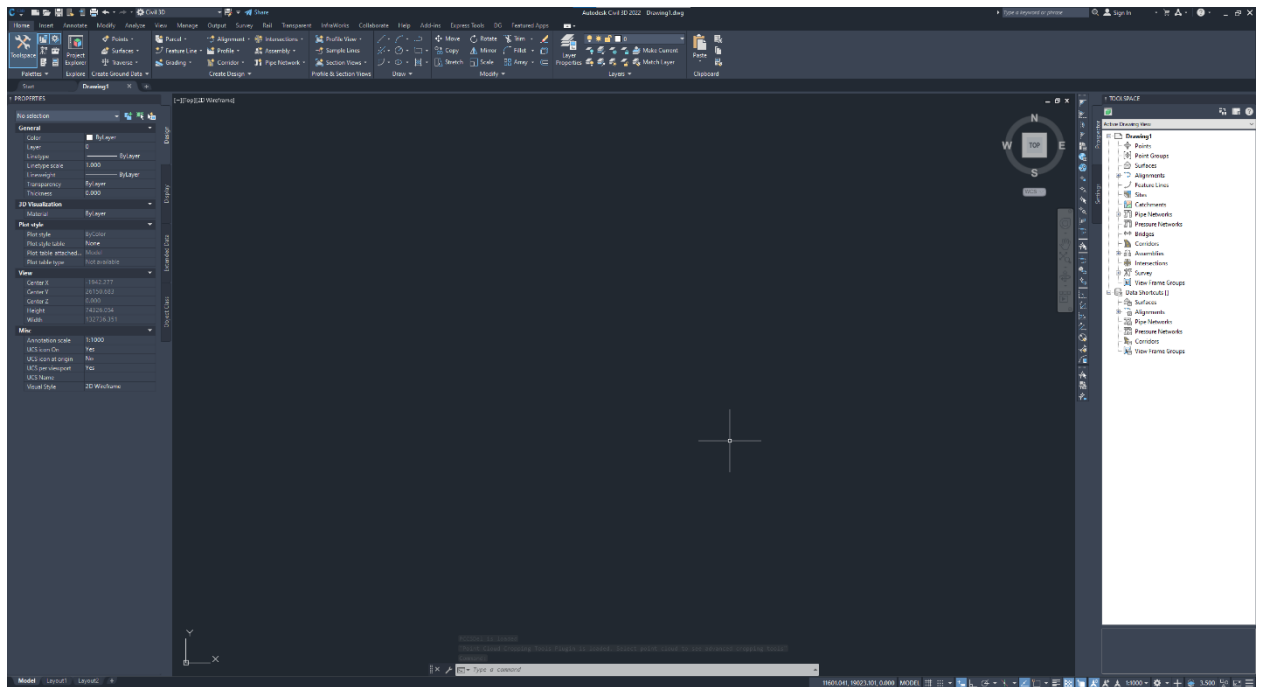


Рисунок 4.13 «Файл .dwg із усіма налаштуваннями»

На цьому етапі:

- активується необхідний шаблон Civil 3D,
- визначаються стилі поверхонь (Surface Styles),
- налаштовуються стилі точок (Point Cloud Styles) для зручності подальшої візуалізації,
- задаються висотні та горизонтальні одиниці — метри, відповідно до вихідних даних проєкту.

Заздалегідь налаштоване середовище дозволяє уникнути похибок у масштабуванні та некоректного інтерпретування висотних значень, що особливо важливо при подальшій побудові профілів дороги. [58]

Civil 3D підтримує роботу з RCP/RCS через модуль Insert → Point Cloud, який виконує автоматичне підключення та індексацію даних. Імпорт відбувався в такій послідовності (рис.4.14-4.15):

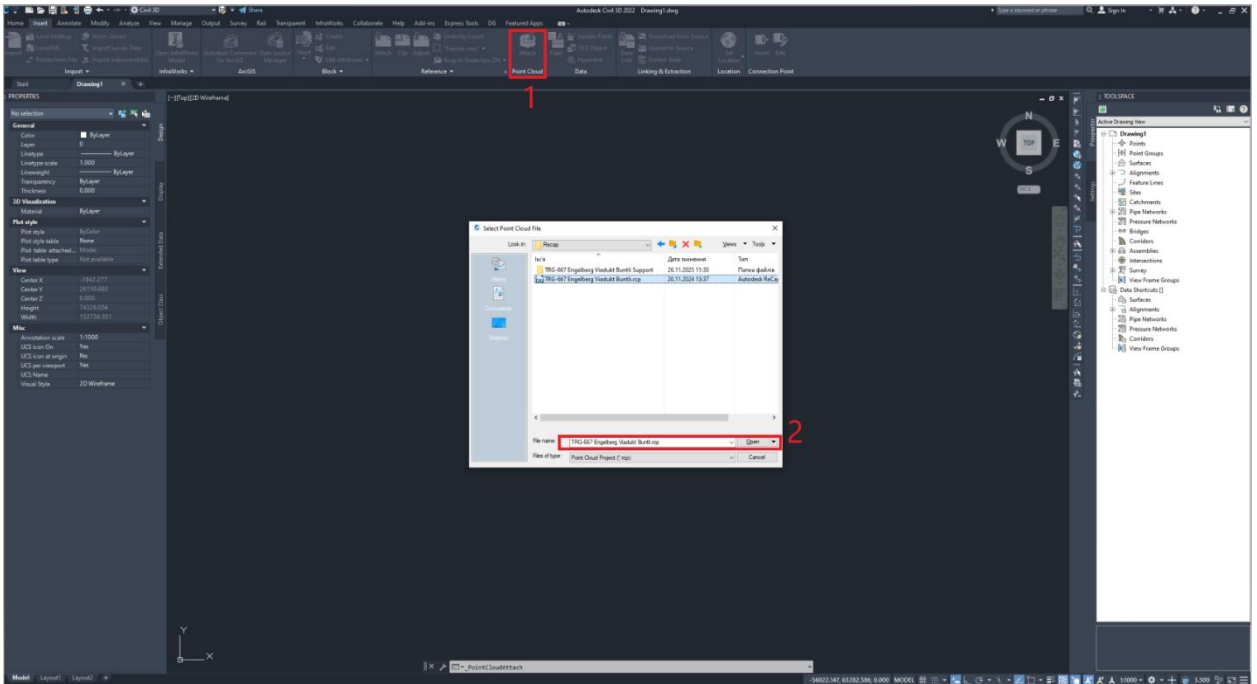


Рисунок 4.14 «Виклик команди імпорту (Insert → Point Cloud)»

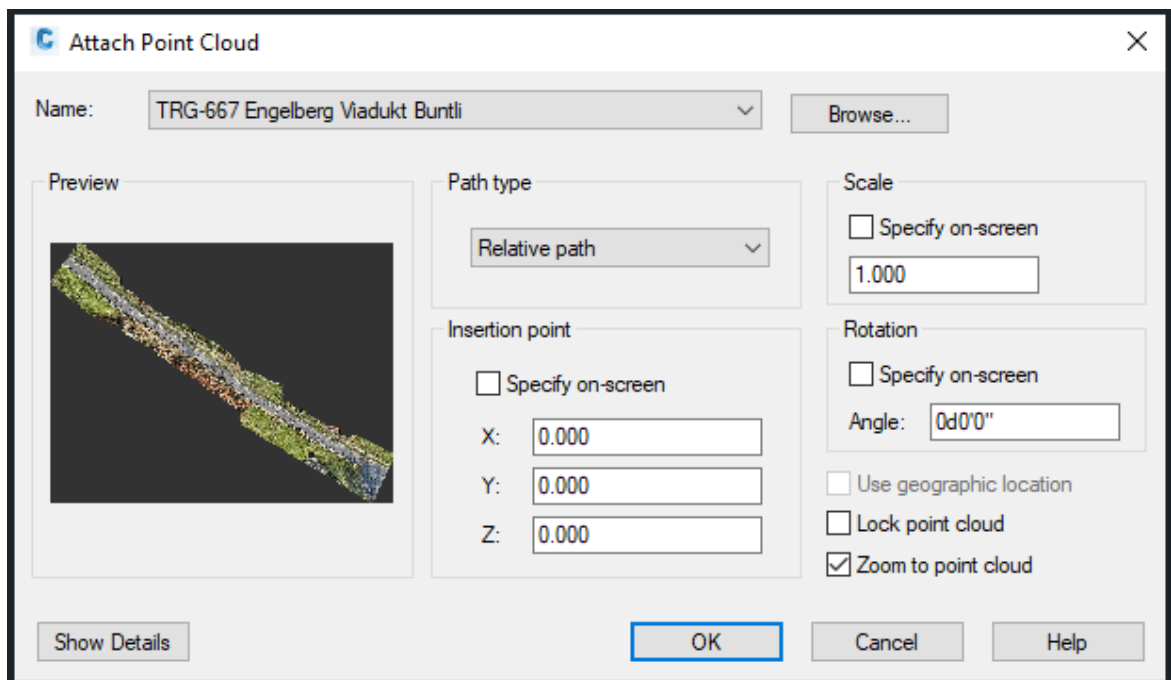


Рисунок 4.15 «Підтвердження координатної системи»

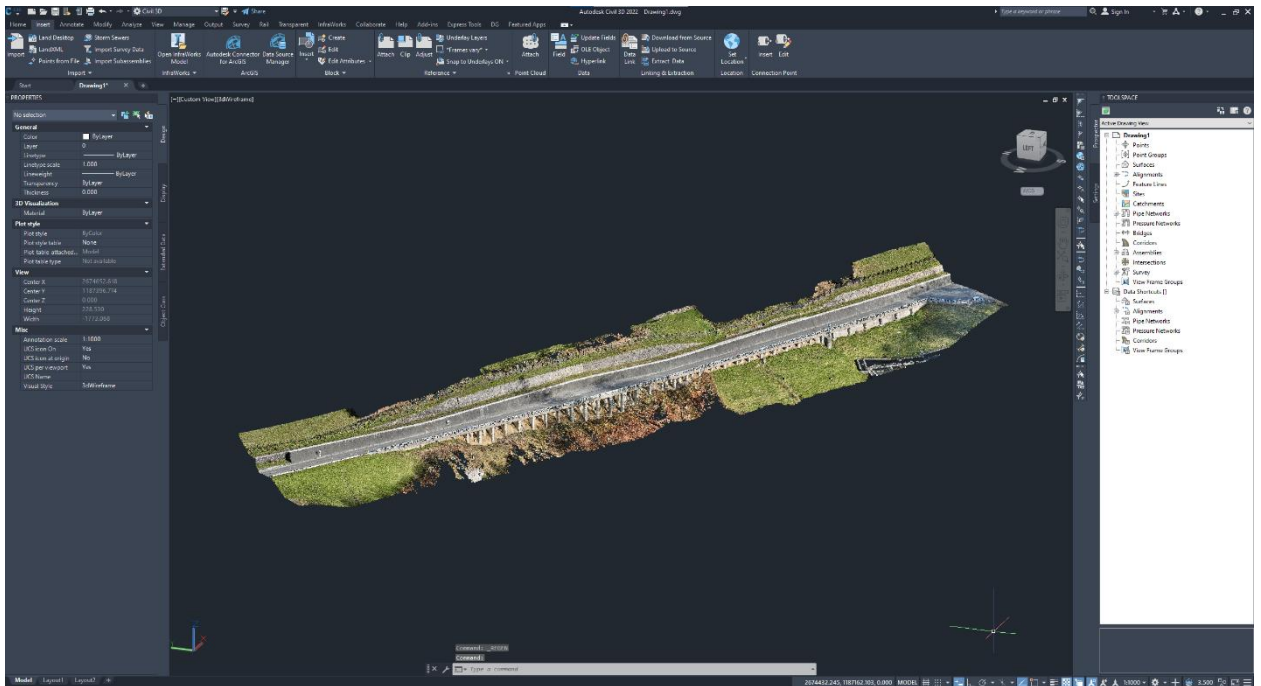


Рисунок 4.16 «Об’єкт Point Cloud в Civil 3D»

Після імпорту важливо забезпечити коректну візуалізацію даних. Civil 3D дозволяє застосовувати різні стилі до об’єкта хмари точок:

- RGB Style - дозволяє бачити фактичне кольорове зображення поверхні, що зручно при визначенні меж дороги (рис.4.16).
- Elevation Style - показує висотні діапазони градієнтами кольору — допомагає швидко визначити (рис.4.17): переломи укосів, перепади рельєфу, зони різкої зміни ухилів.

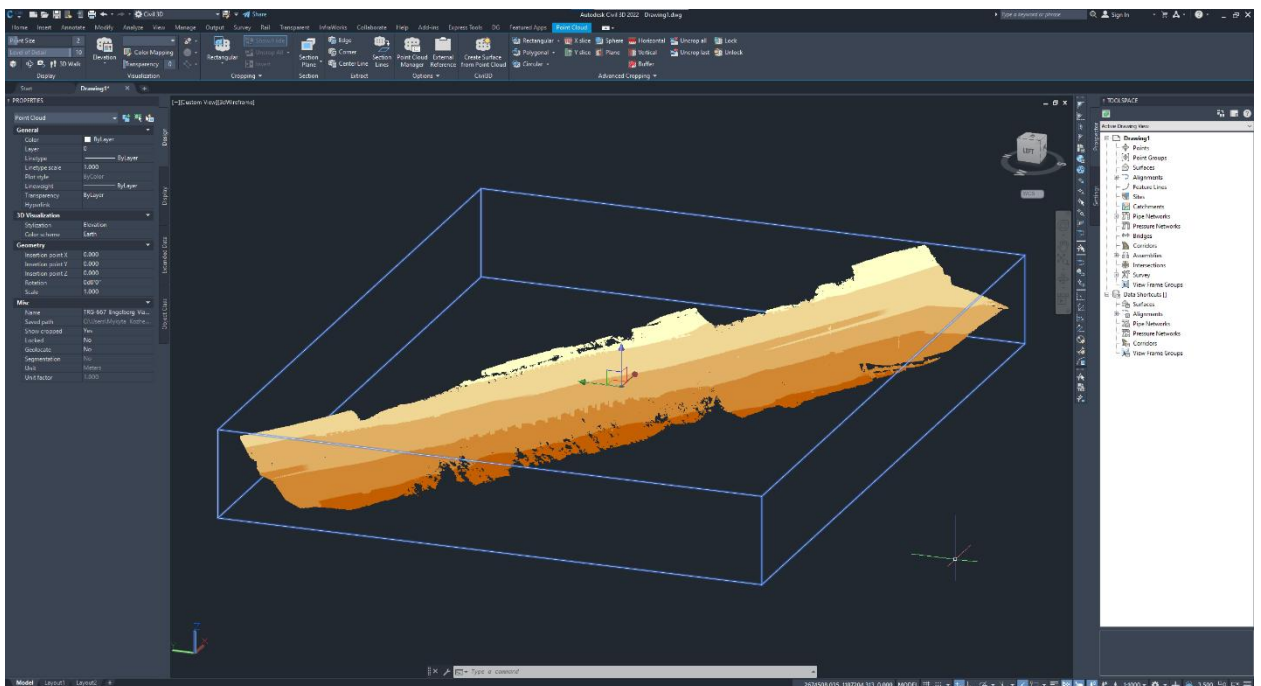


Рисунок 4.17 «Режим Elevation Style»

- Intensity Style - корисний для аналізу фактури дорожнього покриття (рис.4.18).

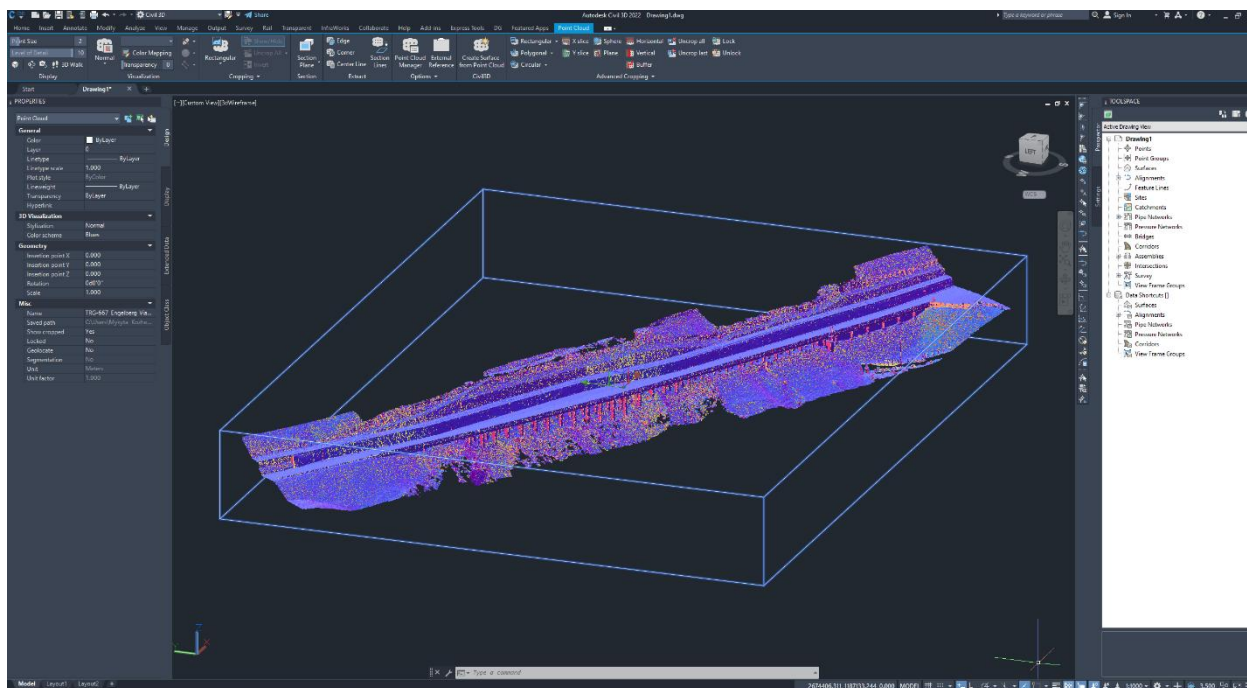


Рисунок 4.18 «Режим Intensity Style»

Ці стилі дозволяють робити попередню інженерну оцінку поверхні ще до побудови TIN-моделі, що відповідає науковим рекомендаціям із сегментації та аналізу хмар точок. [67] [68]

Перед початком формування поверхні виконуються такі кроки:

- візуальна оцінка правильності позиціонування хмари в робочому просторі,
- перевірка орієнтації осі дороги,
- порівняння висотних значень із контрольними реперами або архівними даними 2005 року,
- аналіз особливостей рельєфу за допомогою поперечних зрізів (Section → Create Point Cloud Section).

Цей етап підтверджує, що дані імпортовані коректно, і що TIN-поверхня буде побудована на достовірній геометричній основі. У дослідженнях щодо моніторингу дорожніх деформацій особливо наголошується на важливості контролю координатної узгодженості на етапі імпорту. [64] [65]

4.2.3. Створення первинної TIN-поверхні з хмари точок

Після формування оглядової 3D-моделі наступним ключовим етапом є побудова первинної поверхні типу TIN (Triangulated Irregular Network), яка стане основою для подальшого інженерного аналізу. У середовищі Autodesk Civil 3D процес створення TIN-поверхні передбачає використання алгоритмів триангуляції Делоне, що дозволяють формувати набір суміжних трикутників, які точно відтворюють рельєф місцевості. Використання TIN-моделі є стандартним підходом у дорожній геодезії та цифровому моделюванні рельєфу завдяки її високій точності, гнучкості та здатності адаптуватися до нерівномірної щільності хмари точок. [56] [62] [63]

Autodesk Civil 3D реалізує побудову поверхні на основі класичного алгоритму Делоне, який залишається найбільш придатним для інженерних задач завдяки низці властивостей:

- створення «максимально рівносторонніх» трикутників, що мінімізують довгі тонкі елементи;
- збереження локальних змін рельєфу, навіть якщо щільність точок неоднорідна;
- унеможливлення перетину ребер трикутників, що гарантує топологічну правильність моделі;
- придатність для великих даних, що є важливим для TLS-хмар.

У наукових роботах з моделювання рельєфу (Li, Zhu & Gold, 2005; Žalik & Kolvoord, 2019) підкреслюється, що TIN-поверхні точніше відтворюють дорожні та інженерні об'єкти порівняно з регулярними GRID-моделями, оскільки здатні підлаштовуватися під геометричну складність об'єкта. [71] [72]

Створення поверхні в Civil 3D це є першим моментом, коли хмара точок перестає бути просто візуалізацією і стає цифровою інженерною моделлю.

Для створення поверхні необхідно виділити хмару, після чого з'явиться додаткове меню, в якому обираємо «Create Surface from Point Cloud» (рис.4.19).

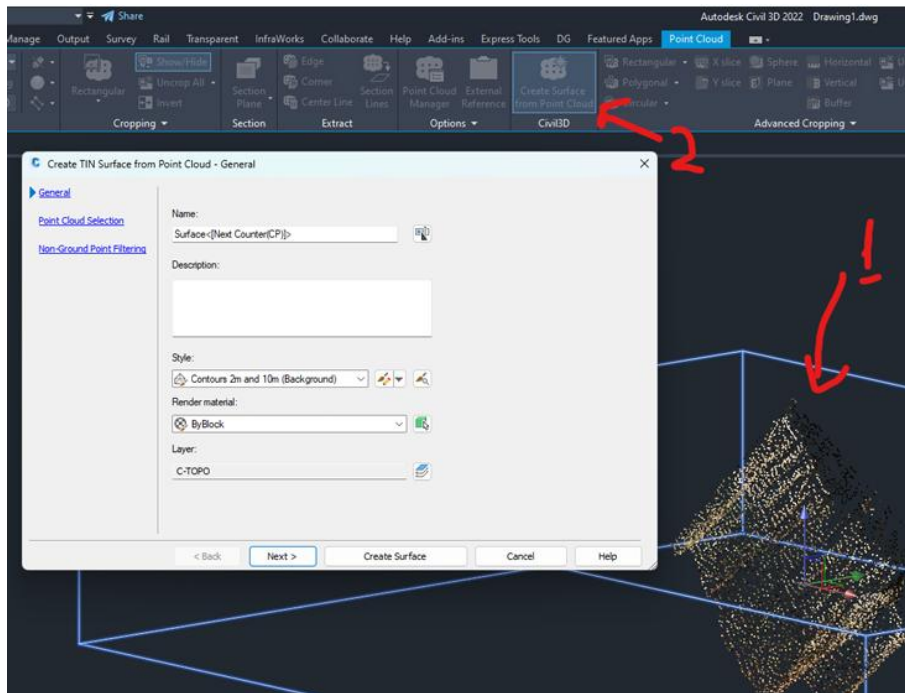


Рисунок 4.19 «Процес створення TIN-поверхні»

Для редагування стандартних профілів заходимо у додаткове меню, де у вкладці Contours редагуємо відстань та згладжування майбутніх горизонталей (рис.4.20).

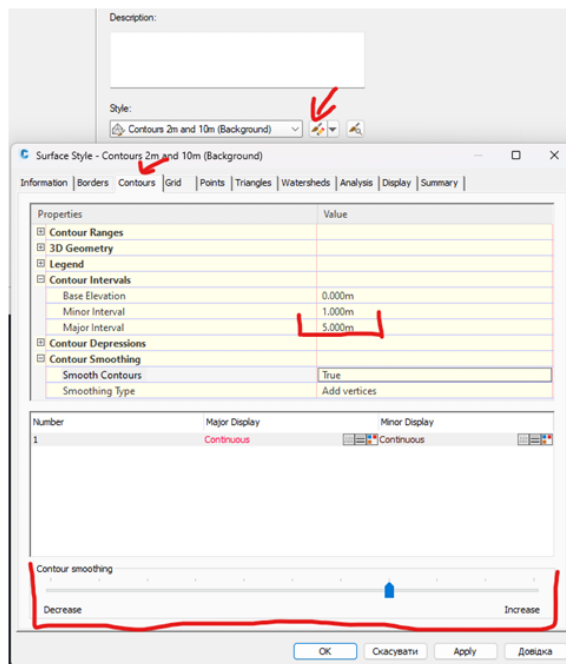


Рисунок 4.20 «Процес редагування параметрів TIN-поверхні»

У вкладці фільтрування обираємо No Filter, якщо хмара була відредагована заздалегідь. Якщо ні, можна спробувати вбудовану фільтрацію (рис.4.21).

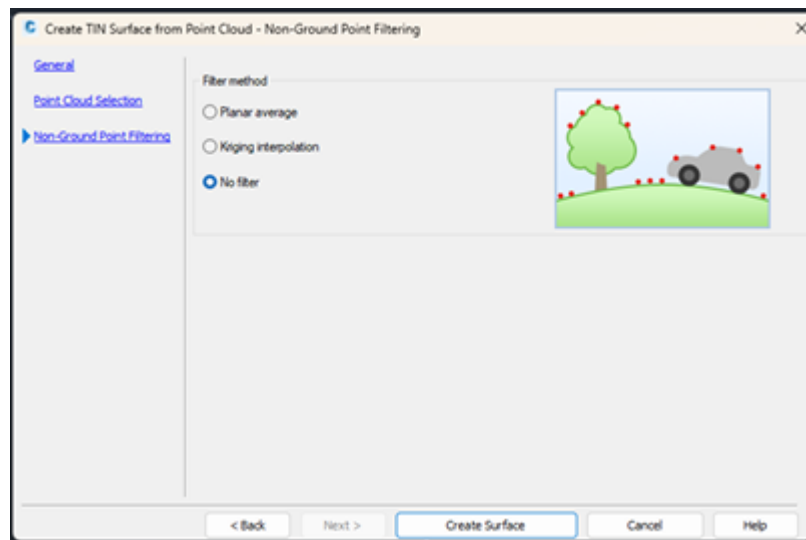


Рисунок 4.21 «Процес фільтрування хмари точок для TIN-поверхні»

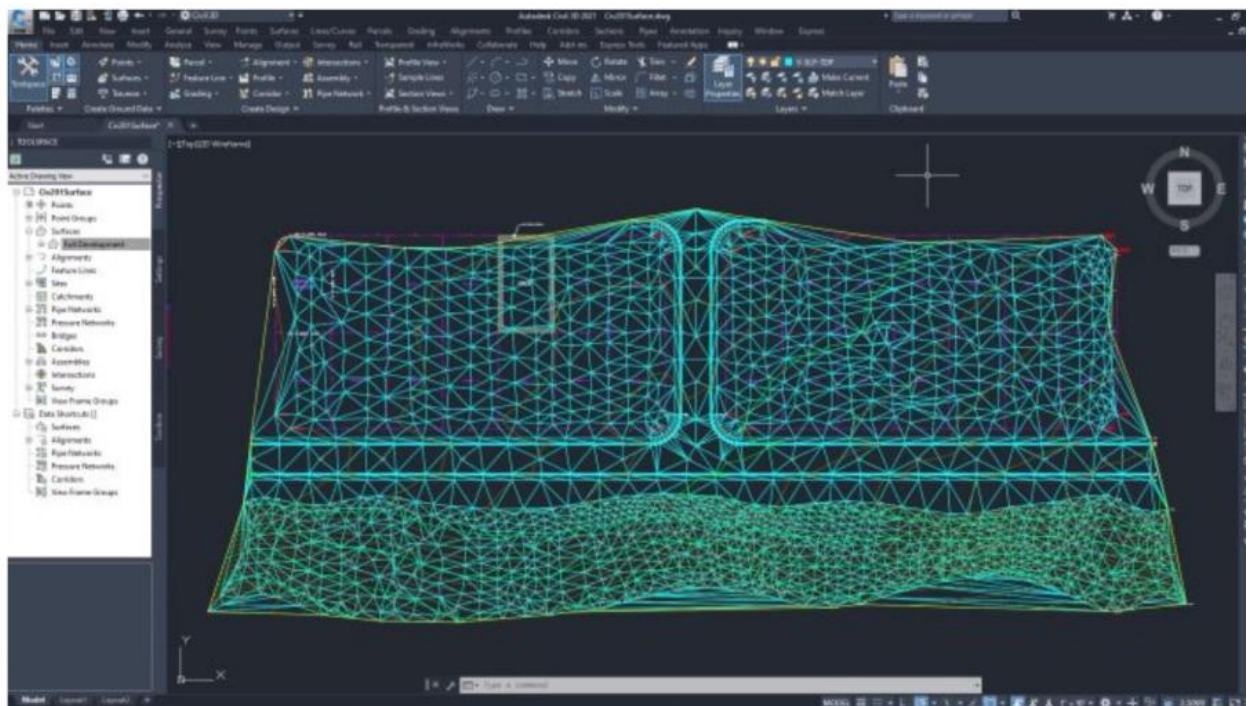


Рисунок 4.22 «Первинна TIN-поверхня»

Первинна TIN-поверхня (рис.4.22) є фундаментальною інженерною моделлю, що вперше перетворює точкові дані TLS на структурований цифровий рельєф. Хоча така поверхня ще не містить інженерних ліній обмеження та може містити локальні похибки триангуляції, вона забезпечує повне уявлення про геометрію дорожнього полотна та дозволяє визначити

ключові елементи, що потребують уточнення. Саме на основі первинної TIN-поверхні формується система брейклайнів, створюється фінальна інженерна поверхня та виконується порівняльний аналіз стану дороги за різні роки.

4.2.4. Формування брейклайнів (Breaklines) для уточнення моделі

Уточнення TIN-поверхні потребує точного визначення інженерних елементів, які впливають на геометрію рельєфу та формують конструктивний профіль дороги. Хмара точок містить величезну кількість геометричної інформації, проте без правильно виділених структурних ліній поверхня не відобразить реальний характер дорожнього полотна. Саме тому брейклайни створюються не довільно, а на основі конкретних елементів, які визначають геометрію автомобільної дороги: бордюрів, меж зміни покриття, верхів і підошв укосів, крайок узбіч, водовідвідних каналів та інших бетонних конструктивних елементів. [62] [66]

Бордюр є одним із найважливіших лінійних елементів дорожнього полотна. У хмарі точок він часто читається чітко завдяки різкій зміні висоти між асфальтом і тротуаром або між проїзною частиною та технічною смугою (рис.4.23).

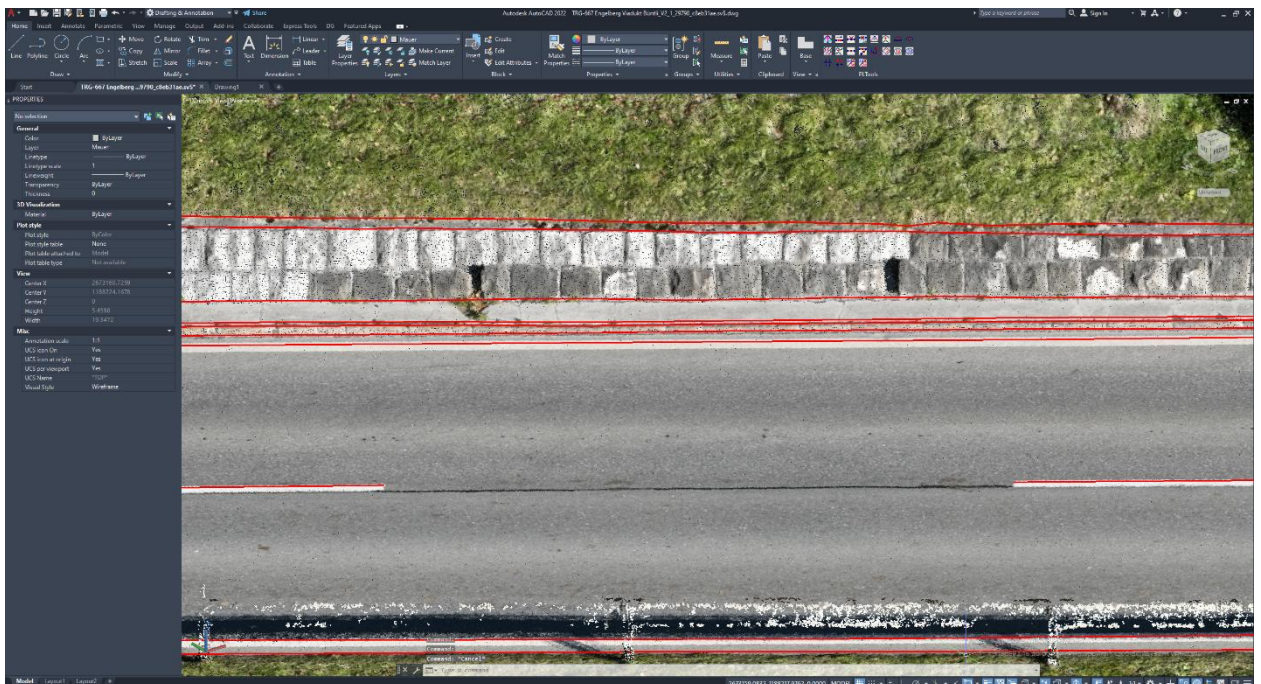


Рисунок 4.23 «Малювання брейклайнів на елемент Бордюр»

Без брейклайна по бордюру триангуляція:

- «зрізає» перепад,
- створює довгі похилі трикутники,
- спотворює форму поперечного профілю дороги.

У наукових роботах Pu, Rutzinger & Vosselman (2011) підкреслюється, що бордюрні лінії є одними з найстабільніших елементів у TLS-моделях дороги і повинні завжди використовуватися для уточнення поверхні [68].

На досліджуваних ділянках можуть зустрічатися переходи між (рис.4.22):

- асфальтом і бетонним покриттям,
- основним полотном і латками,
- основним полотном та технічними майданчиками.

Хоча такі переходи інколи малопомітні у хмарі точок, на висотах вони дають різкі локальні зміни, які при поганій триангуляції:

- викликають появу «ступенів»,
- порушують поздовжній профіль,
- зменшують точність деформаційного аналізу.

У роботах Mahmud & Mia (2020) та Zeybek (2015) наголошується, що аналіз деформацій дороги неможливий без чіткого відокремлення зон різного покриття [64], [65].

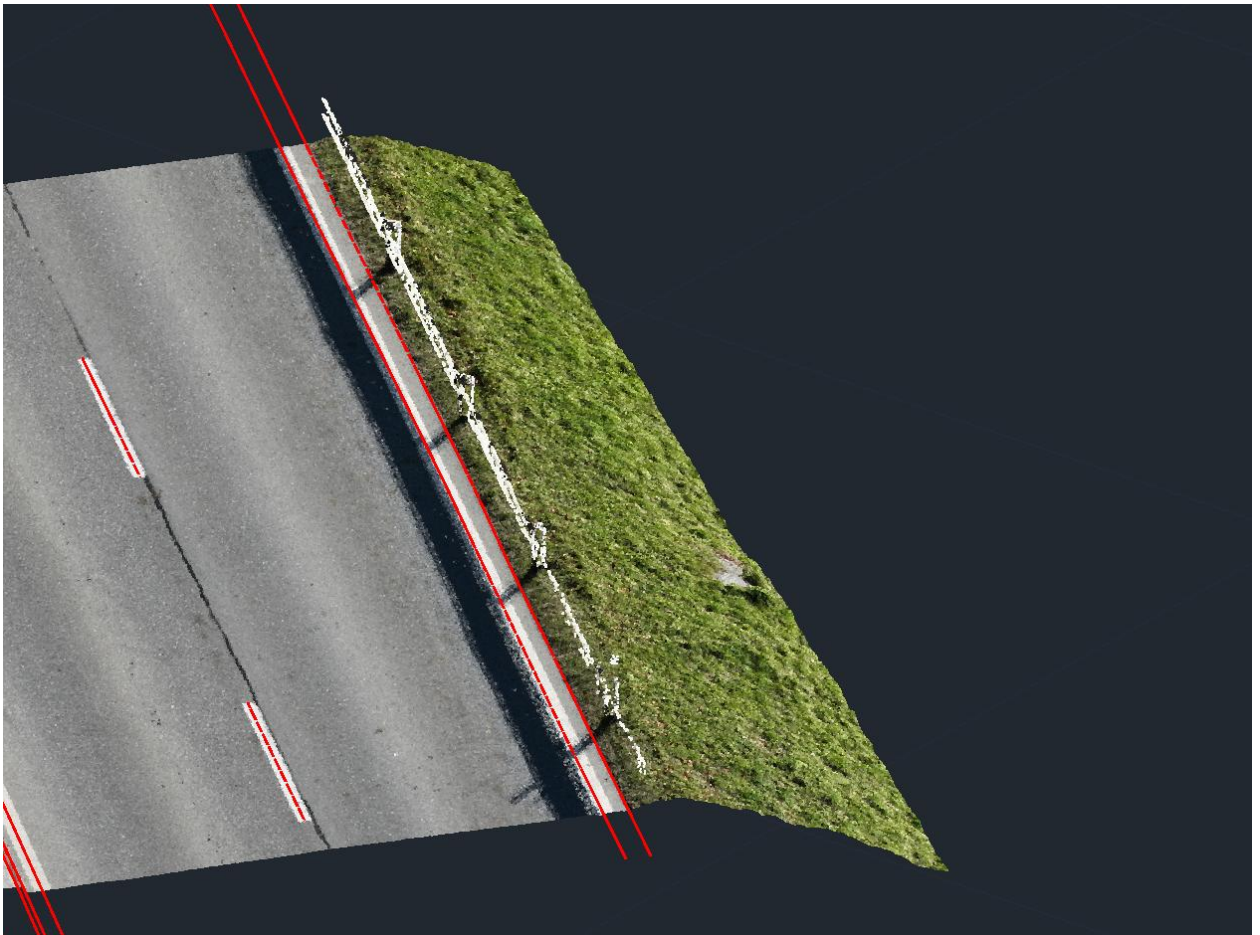


Рисунок 4.24 «Проведення брейклайнів по зміні матеріалу»

Під час роботи з інфраструктурними об'єктами дорожнього полотна особливе місце займають мостові конструкції, оскільки вони мають складну геометрію, вертикальні елементи та різкі перепади висот, які не можуть бути коректно відтворені за допомогою TIN-поверхні. На відміну від укосів, бордюрів та зміни покриття, опори мосту мають твердотільну форму з чіткою геометрією, і тому для їх відтворення використовувалося моделювання типу 3D Solid.

3D Solid — це твердотільний об'єкт, який містить повний математичний опис об'єму та форми конструкції. На відміну від:

- меш-об'єктів, що складаються з трикутників,
- поверхонь TIN, що відображають рельєф,
- пустотілих 3D поверхонь,

3D Solid є повноцінним об'ємним геометричним тілом, яке:

- має товщину,

- не спотворюється інтерполяцією,
- повністю повторює форму реального бетонного елемента,
- може взаємодіяти з BIM-моделлю або інженерною документацією.

У контексті AutoCAD і Civil 3D це найточніший тип об'єктів для відтворення мостів, опор, стінок та інших інженерних споруд.



Рисунок 4.25 «Створені 3D Solid опор мосту»

Уточнення цифрової моделі дорожнього полотна на основі хмари точок стало можливим завдяки комплексному підходу, що поєднує використання брейклайнів та твердотільних 3D-моделей. Сформовані брейклайни на основі бордюрів, меж зміни покриття, верхів і підшвів укосів, а також бетонних конструктивних елементів забезпечили правильну інтерпретацію рельєфу та дозволили Civil 3D коректно відтворити реальну інженерну структуру дороги. Завдяки цьому TIN-поверхня набула геометричної стабільності, а поперечні та поздовжні профілі — інженерної достовірності, необхідної для подальшого аналізу.

У результаті сформована модель поєднує точність TLS-даних, інженерну логіку брейклайнів та стабільність твердотільних елементів. Такий підхід відкриває можливість для глибокого аналізу деформацій, побудови

детальних 3D-візуалізацій і забезпечує високу якість цифрової реконструкції дорожньої інфраструктури. Це створює надійну основу для наступних етапів роботи — формування фінальної поверхні, коридорного моделювання та порівняння дорожніх моделей різних часових періодів.

4.2.5. Отримання фінальної базової 3D-поверхні

Після формування первинної TIN-поверхні, уточнення її за допомогою брейклайнів та інтеграції твердотільних елементів (3D Solid) наступним етапом є отримання фінальної базової 3D-поверхні, яка відображає реальну геометрію дорожнього полотна і слугує основою для інженерного аналізу та подальшого моделювання. На цьому етапі TIN-модель доводиться до інженерної точності, усуваються залишкові похибки триангуляції, виконується корекція меж поверхні, а також здійснюється узгодження з мостовими спорудами та іншими конструктивними елементами.

Фінальна поверхня є результатом комплексного поєднання даних TLS-зйомки, структурних брейклайнів і твердої геометрії, що дозволяє відтворити дорожню ділянку з високою точністю та деталізацією. У наукових працях (Li, Zhu & Gold, 2005; Žalik & Kolvoord, 2019) наголошується, що саме якість завершальної поверхні визначає точність усіх подальших аналізів — профільних, об'ємних і деформаційних.

У Civil 3D фінальна поверхня формується шляхом об'єднання:

- уточненої TIN-поверхні,
- брейклайнів, що визначають конструктивні переломи дороги,
- меж поверхні (Boundaries),
- обмежувальних ліній у місцях примикання до штучних споруд,
- 3D Solid-елементів (опор мосту, бетону, лотків), які задають жорсткі границі.

TIN-поверхня після додавання брейклайнів перебудовується автоматично, але для досягнення максимальної точності застосовується розширений комплекс налаштувань:

- датум-корекція у зонах шумів,
- локальна згущеність триангуляції вздовж брейклайнів,
- вилучення небажаних трикутників,
- обмеження області побудови через Boundaries.

Усе це дозволяє видалити дефекти первинної поверхні та забезпечити її інженерну коректність.

В кінцевому результаті було створено 3д модель дорожнього покриття та основних конструктивних елементів мосту (рис.4.26-4.27).

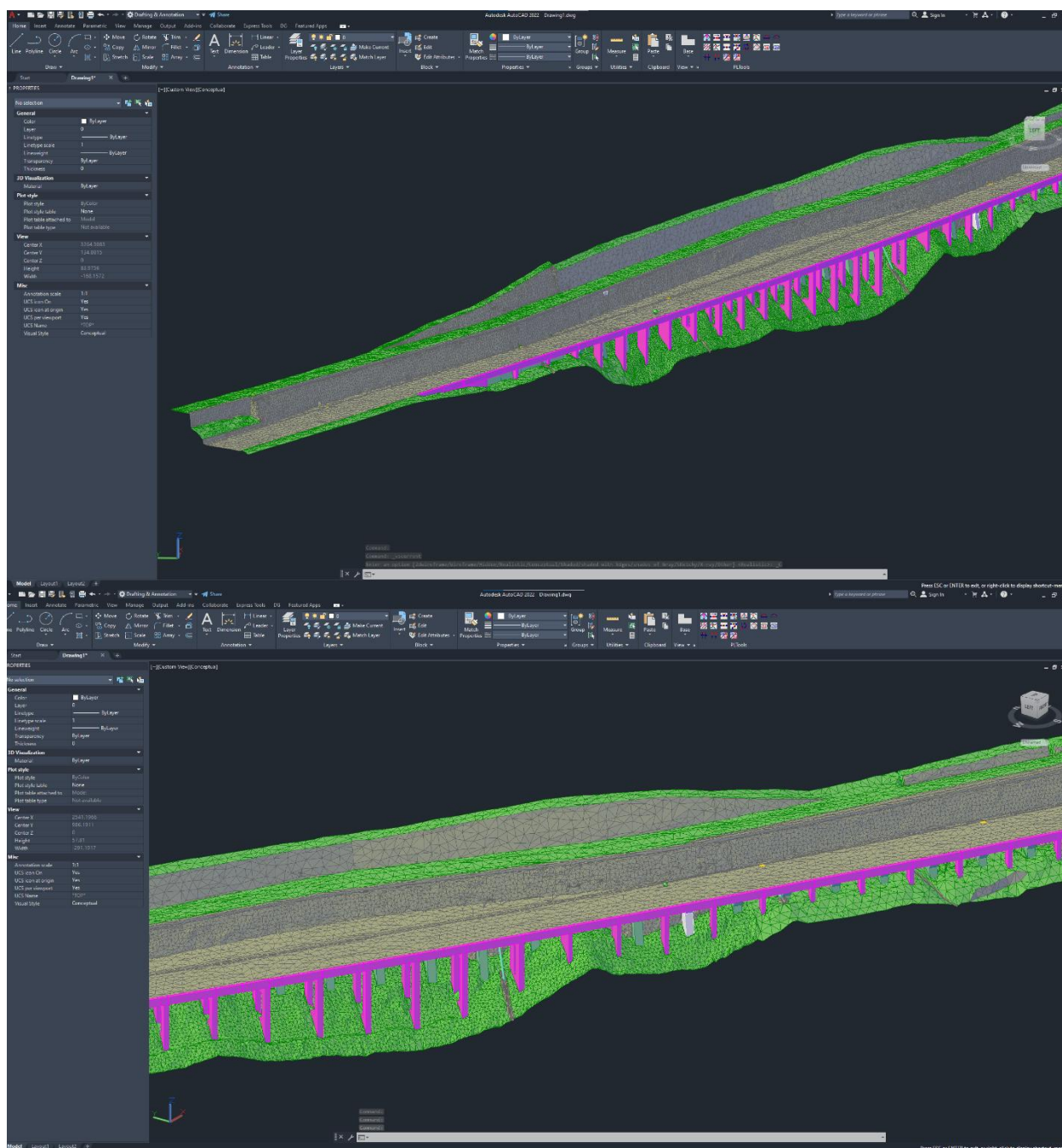


Рисунок 4.26 «3D Модель мосту на основі хмари точок»

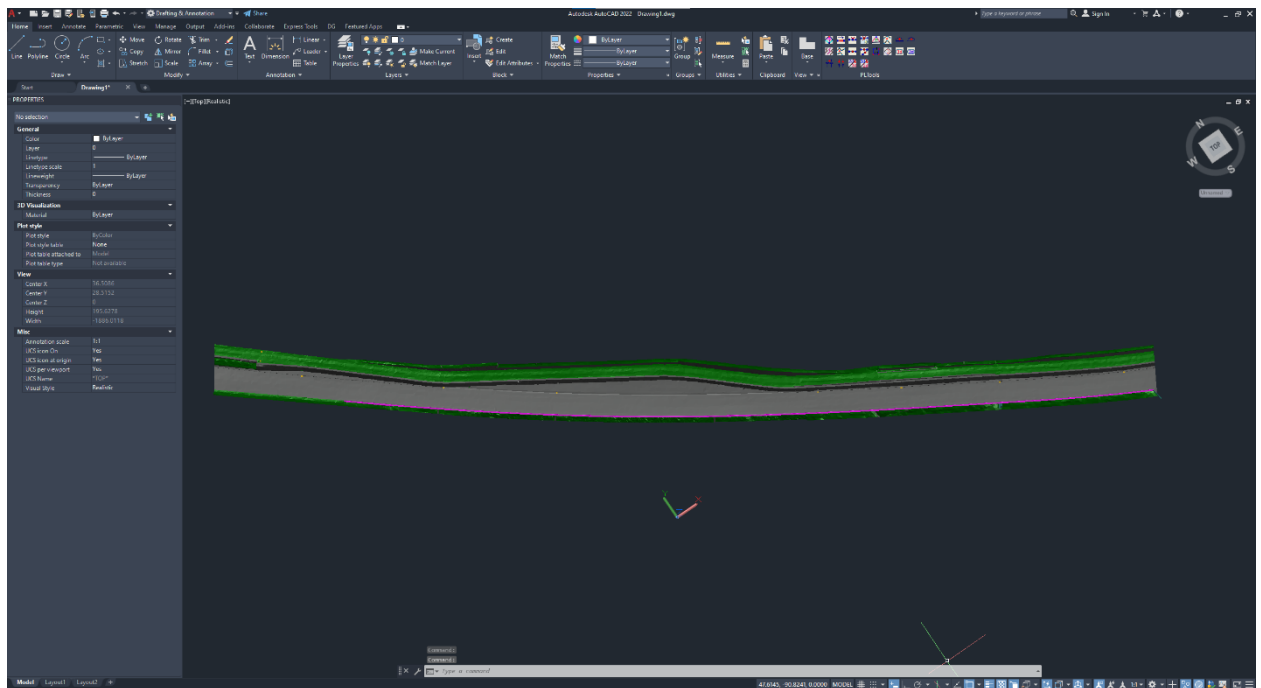


Рисунок 4.27 «TIN-поверхня вид Зверху»

4.2.6. Метричні параметри цифрової моделі дорожнього полотна та оцінка точності побудови

Після формування TIN-поверхні, побудови брейклайнів та інтеграції окремих конструктивних елементів було виконано метрологічну оцінку точності отриманої цифрової моделі дорожнього полотна. Аналіз точності є необхідним етапом, оскільки від нього залежить достовірність подальшого профільного порівняння та визначення можливих деформацій.

Висока якість вихідної хмари точок, щільність сканування до 50 000 т/м², а також точність реєстрації даних у межах 0,003 м забезпечили можливість побудувати стабільну та деталізовану цифрову геометрію досліджуваної ділянки. У ході моделювання оцінювалися точність фіксації поверхні полотна, укосів, бровок дороги, підпірних стінок та елементів естакади.

У результаті комплексної оцінки встановлено, що середня похибка побудованої моделі становить:

$$\varepsilon_{\text{серед}} \approx \pm 5 \text{ мм}$$

Це значення отримано шляхом вибіркової перевірки контрольних точок у межах моделі та порівняння їхніх висотних значень із даними TIN-поверхні. Такий рівень точності відповідає вимогам інженерно-геодезичних робіт

високої деталізації та дозволяє застосовувати модель для моніторингу змін у вертикальному та горизонтальному положенні дорожнього полотна.

Незважаючи на загальну стабільність, на деяких ділянках моделі було зафіксовано локальні відхилення, що не перевищують:

$$\varepsilon_{\text{лок}} \leq 1 \text{ см}$$

Такі відхилення характерні для зон:

- складної геометрії укосів;
- кам'яних підпірних стінок із нерівномірною текстурою;
- ділянок, де відстань між станціями сканування була максимальною;
- поверхонь із низьким коефіцієнтом відбиття лазерного сигналу.

Однак навіть у цих місцях похибка залишалася в межах, прийнятних для аналізу транспортних інфраструктурних об'єктів.

Для об'єктів із чіткими геометричними межами — таких як: бровки проїзної частини, верх і низ укосу, грані підпірних стінок, елементи естакади та опор, точність моделювання досягала $\pm 3\text{--}6$ мм, що свідчить про високу ефективність застосування брейклайнів та точне відтворення переломів рельєфу. Особливо високий рівень точності зафіксовано на твердих конструкціях, де повторюваність вимірювань є найкращою.

Було виконано додаткову перевірку за допомогою програмного забезпечення CloudCompare, що є одним із найпоширеніших інструментів для аналізу та порівняння хмар точок. Перевірка включала декілька етапів, спрямованих на визначення відхилень між TIN-поверхнею та вихідними лазерними даними.

Зокрема, були використані такі модулі та плагіни CloudCompare:

Cloud-to-Mesh Distance (C2M) — для обчислення відстаней між хмарою точок та поверхнею, що дозволило оцінити локальні похибки моделі у міліметровому діапазоні;

Statistical Outlier Removal (SOR) — для виявлення і виключення потенційних шумових точок перед розрахунками;

Density Map Tool — для перевірки рівномірності щільності сканування та визначення областей із можливими похибками через низьку кількість точок;

Scalar Field Analysis — для побудови карт відхилень та аналізу розподілу похибок по всій площині моделювання.

Результати обробки підтвердили стабільність побудованої TIN-поверхні: більшість значень відхилень перебувають у діапазоні ± 5 мм, а локальні пікові відхилення не перевищують 8–10 мм, що повністю відповідає інженерним вимогам до геодезичного моніторингу дорожнього полотна. Таким чином, аналіз у CloudCompare підтвердив високу метрологічну якість цифрової моделі та її придатність для подальшого порівняння профілів різних років.

4.3. Моніторинг стану дорожнього покриття на основі результатів моделювання

4.3.1. Формування моделей двох часових періодів

Для виконання порівняльного аналізу та визначення змін у геометрії дорожнього полотна було побудовано дві незалежні моделі, що представляють стан дороги у різні часові періоди — 2005 рік та 2025 рік. Обидві моделі створені за єдиним принципом просторової прив'язки та проходять по осі дороги, що забезпечує коректність подальшого аналізу деформацій та зміщень.

В основу історичної моделі покладено профіль дороги, виконаний у 2005 році під час інженерно-геодезичних робіт.

Профіль містив:

- дані про відмітки землі вздовж осі дороги;
- величини ухилів на кожному пікеті;
- інформацію про переломи поздовжнього рельєфу;
- метричні параметри у локальній системі координат.

Для моделювання архівного стану полотна ці дані були перенесені у Civil 3D та відтворені у вигляді цифрової лінії профілю. Профіль

розташований строго по осі дороги, що дозволяє використовувати його як базову інженерну лінію для порівняння з сучасним станом покриття (рис.4.29).

Таким чином модель 2005 року виступає еталонною геометрією, яка відображає стан полотна до проведення реконструктивних робіт та укладання нового асфальтобетонного шару.

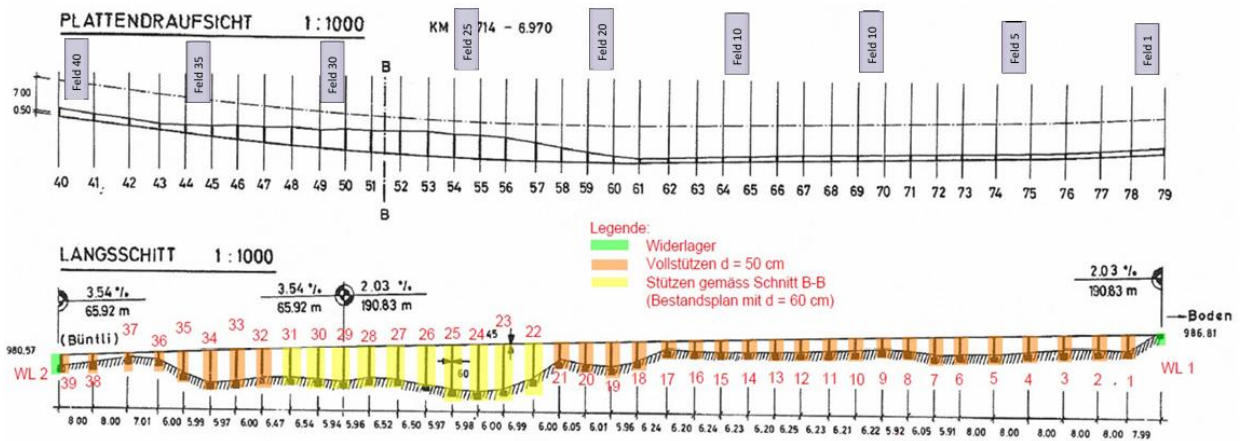


Рисунок 4.28 «Викопіювання з архівних документів дорожнього полотна»

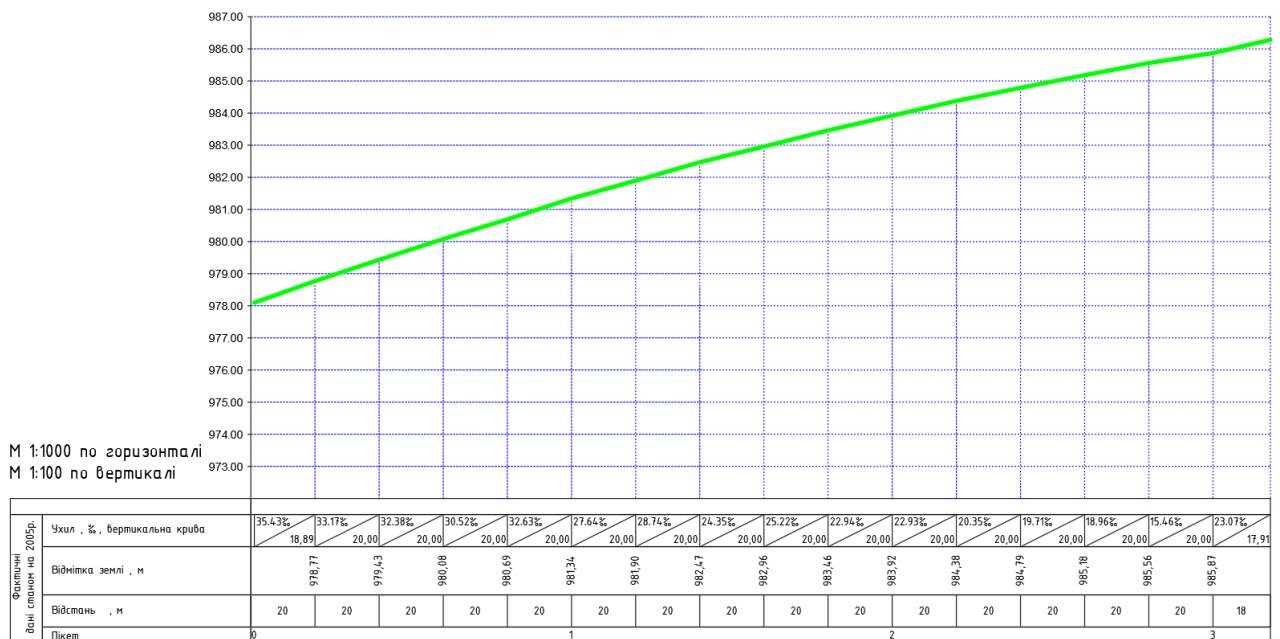


Рисунок 4.29 «Профіль дороги станом на 2005р.»

У 2025 році стан дороги був зафіксований методом наземного лазерного сканування (TLS), після чого на основі отриманої хмари точок сформовано високоточну TIN-поверхню, що передає реальну форму дорожнього полотна з точністю до міліметрів.

Процес створення сучасної моделі включав:

- очищення та підготовку хмари точок у Autodesk ReCap;
- імпорт даних у Civil 3D;
- створення TIN-поверхні;
- уточнення поверхні за допомогою брейклайнів та меж;
- інтеграцію з твердотільними моделями штучних споруд (3D Solid).

Для того щоб забезпечити коректність порівняння з архівною моделлю 2005 року, у Civil 3D була побудована нова траса, що проходить у тому ж місці, де було виконано вимірювання у 2005 році.

Після цього створено поздовжній профіль за даними TIN, що представляє фактичний стан дороги у 2025 році.

Таким чином і профіль 2005 року, і профіль 2025 року: проходять по одній лінії — осі дороги; розташовані в єдиній координатній системі; узгоджені між собою за довжиною (318 м); містять відмітки через однакові інтервали. Це робить можливим точне порівняння висот, ухилів та деформацій між двома часовими періодами.

Порівняння профілів, а не просто TIN-поверхонь, дозволяє:

- виконати моніторинг у форматі «по лінії руху автомобіля»;
- оцінити зміни, що мають значення для експлуатації дороги;
- чітко визначити підняття чи просідання полотна;
- відобразити зміну ухилів, переломів та вертикальних кривих;
- виключити бокові зсуви або шумові ефекти хмари точок.

Профіль є однією з найбільш стабільних та інформативних інженерних форм аналізу транспортних споруд, що підтверджується сучасними дослідженнями з моніторингу дорожніх деформацій. [73] [74] [75]

4.3.2. Методика порівняння профілів 2005 та 2025 років

Порівняння геометрії дорожнього полотна між двома часовими моделями — це ключовий етап моніторингу, що дозволяє визначити характер змін, спричинених як природними процесами, так і експлуатаційними чи реконструктивними роботами.

У даній роботі порівняння виконувалося між архівним профілем 2005 року та сучасним профілем 2025 року, отриманим на основі ТІН-поверхні, сформованої з TLS-хмари точок. Обидва профілі проходять точно по осі дороги, що забезпечує коректність аналізу.

Методика порівняння включала кілька послідовних етапів, кожен з яких спрямований на отримання повної картини зміни геометрії полотна за 20-річний проміжок (рис.4.30).

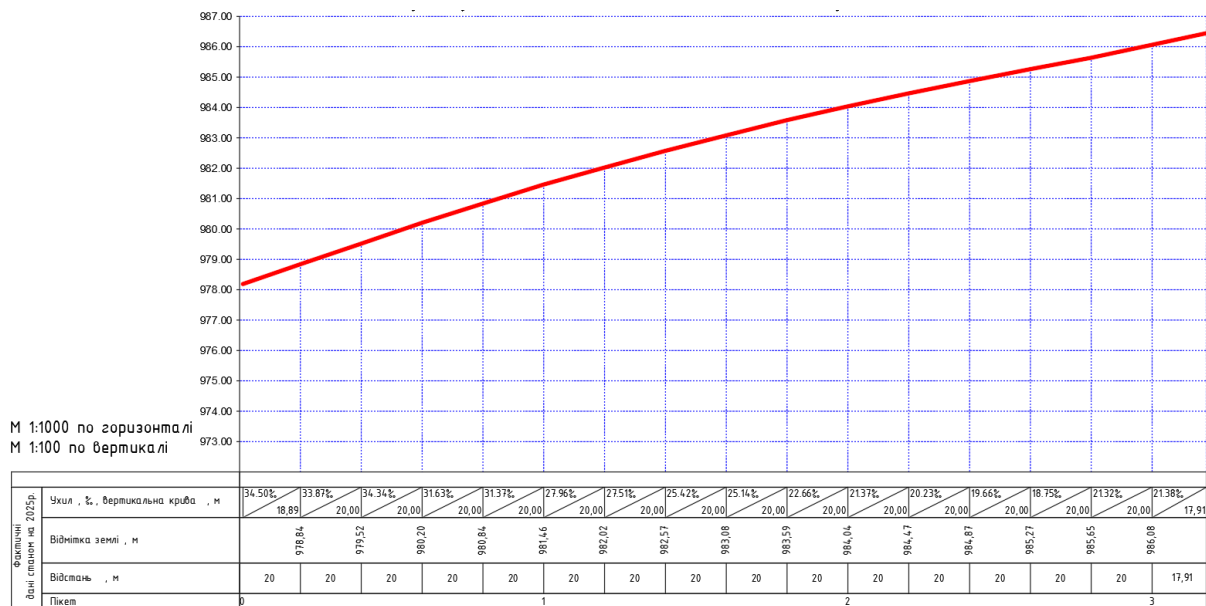


Рисунок 4.30 «Профіль дороги станом на 2025р.»

Основним методом аналізу є накладання профілів у Civil 3D, що дозволяє візуально оцінити:

- розбіжності у висотах,

- зміну форми поздовжнього рельєфу,
- зміни величини ухилів,
- появу локальних підняттяв або просідань.

Цей метод є одним із базових у геодезичному моніторингу інженерних споруд. [73]

На графіку видно, що профіль 2025 року розташований вище за профіль 2005 року майже на всій протяжності ділянки, що свідчить про підняття дороги через оновлення покриття (рис.4.31).

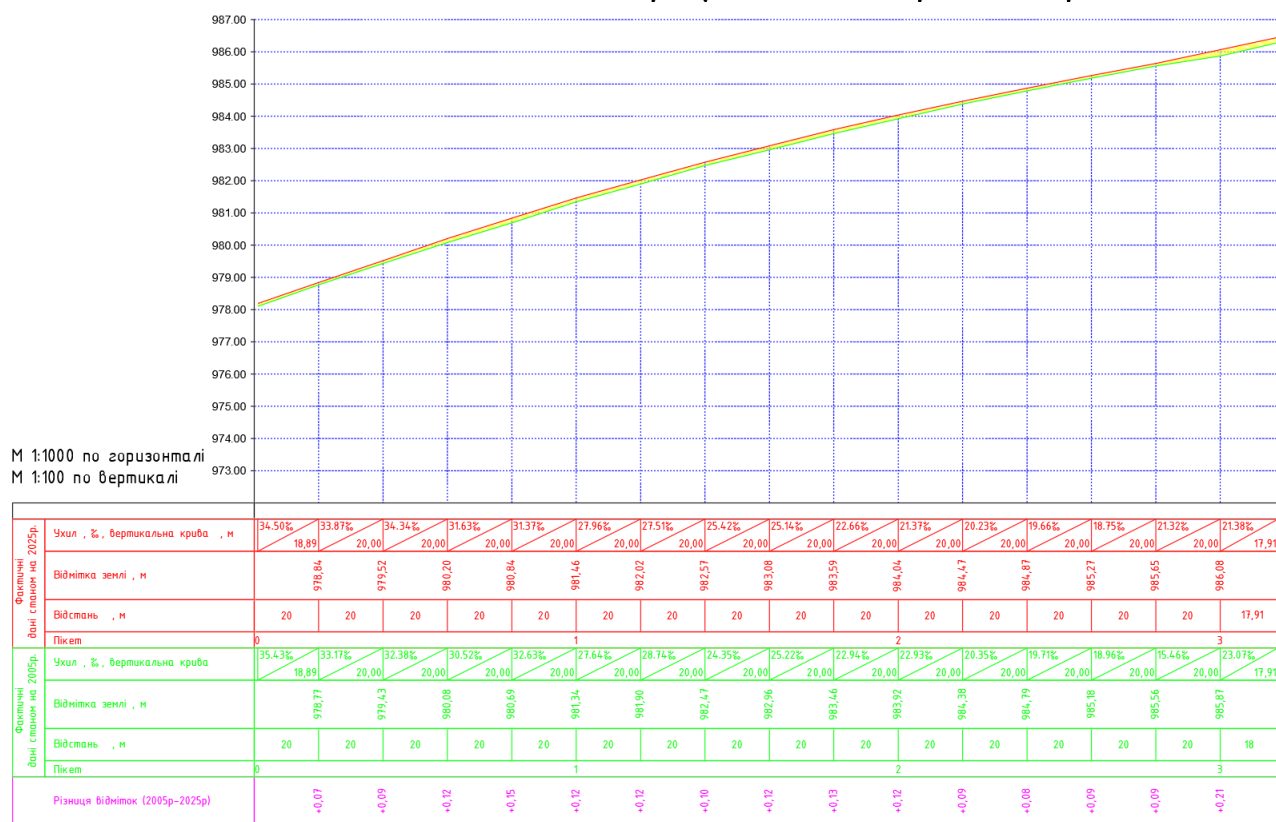


Рисунок 4.31 «Поєднання профілів 2005р. та 2025р.»

Різниця відміток (2005р-2025р)	+0,07	+0,09	+0,12	+0,15	+0,12	+0,12	+0,10	+0,12	+0,13	+0,12	+0,09	+0,08	+0,09	+0,09	+0,21
--------------------------------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

Рисунок 4.32 «Різниця висот профілів 2005р. та 2025р.»

Для кожного пікету через 20 м було обчислено:

$$\Delta H = H_{2025} - H_{2005}$$

Таблиця різниць, отримана у Civil 3D, показала:

- середнє підняття дорожнього полотна $\approx +12$ см,
- мінімальні значення: $+8...+9$ см,

- максимальні: +20...+21 см.

Подібні регулярні зміни характерні саме для реконструкції дорожнього покриття, а не для деформаційних процесів. [75]

Наступним етапом було дослідження змін у величині ухилів.

Для цього у Civil 3D порівнювалися: ухили на кожній ділянці, місця перелому рельєфу, довжини та величини вертикальних кривих.

Було встановлено:

- у 2025 році ухили стали більш вирівняними,
- мінімальні ухили збільшилися,
- перепади між ділянками зменшилися.

Це свідчить про вирівнювання поздовжнього профілю перед укладанням нового шару асфальту, що є типовою інженерною практикою.

Такий аналіз відповідає рекомендаціям щодо використання профільних моделей для оцінки довготривалих геометричних змін. [74]

Методика порівняння профілів дозволила ствердно визначити: зміна геометрії за 20 років має штучний характер, зміни спричинені оновленням асфальтобетону, дорожнє полотно стало вищим та рівнішим, конструктивних деформацій не виявлено.

Поздовжній профіль продемонстрував повну стабільність дорожньої основи, що є важливим для оцінки подальших термінів експлуатації покриття.

Методика порівняння профілів 2005 та 2025 років, що включає накладання профілів, розрахунок різниць відміток та аналіз ухилів, дозволила отримати повну картину змін геометрії дороги за двадцятирічний період. Усі встановлені зміни мають рівномірний характер і пов'язані з реконструкцією дорожнього покриття, а не з деформаціями. Це свідчить про стабільний технічний стан досліджуваної ділянки та підтверджує ефективність застосованої методики моніторингу.

4.3.3. Аналіз просторової стабільності дорожнього полотна

Окрім оцінювання вертикальних змін, що відображають підняття або просідання дорожнього полотна, важливою складовою моніторингу є визначення планової стабільності (горизонтальних зміщень) осі дороги. Геометрична сталість у плані є критичною для інженерних споруд, оскільки навіть незначні бокові зміщення можуть свідчити про розвиток зсувних процесів, деформацію земляного полотна або порушення структури основи дороги. Тому аналіз просторової стабільності є обов'язковою частиною комплексного порівняння моделей 2005 і 2025 років.

Для визначення горизонтальної стабільності було проведено порівняння: положення осьової лінії профілю 2005 року; траси 2025 року, побудованої на основі TIN-поверхні сучасної геодезичної моделі.

Оскільки профілі обох періодів були побудовані по одній і тій самій осі, виконувалася перевірка: збігу місця проходження профілю; стабільності відстані між крайками покриття; симетричності поперечних форм відносно осі.

Такі підходи широко застосовуються під час моніторингу транспортної інфраструктури, де важливо забезпечити точність планового положення дороги. [73]

За результатами аналізу встановлено:

- вісь дороги 2025 року повністю збігається з архівною в межах точності вимірювання,
- бокових зміщень не виявлено,
- форма дороги збереглася стабільною у плані,
- не зафіксовано зміни ширини полотна або порушення симетрії.

Це свідчить, що дорожнє полотно впродовж 20 років не зазнавало зсувних або горизонтальних деформацій.

У практиці геодезичного моніторингу такі результати свідчать про стабільність земляного полотна, особливо на довгих прямолінійних ділянках, де будь-яке бокове зміщення було б легко помітним у профільному аналізі

4.3.4. Локалізація та оцінка зон потенційних ризиків

Навіть за умови відсутності явних деформацій дорожнього полотна важливим елементом моніторингу є визначення ділянок, які можуть становити підвищений інженерний ризик у майбутньому. До таких зон відносять відрізки, де фіксуються аномальні або перевищені зміни висот, різкі відхилення у величині ухилів, технічні стики та конструктивно складні перехідні ділянки.

У транспортній геодезії такі сегменти класифікують як зони потенційної геометричної нестабільності, що потребують періодичного контролю.

Хоча загальна тенденція змін — це рівномірне підняття дорожнього полотна приблизно на +12 см, аналіз локальних ΔH показав, що на окремих ділянках значення досягають +18...+21 см.

Такі відрізки не є фактичною деформацією, проте:

- інженерна практика вказує, що локально збільшена товщина нового шару покриття може надалі призводити до нерівномірного зношування;
- у місцях значного нарощування шару можливі зміни у роботі водовідведення, що впливає на довгострокову стійкість полотна;
- при наступних реконструкціях такі ділянки вимагатимуть додаткового коригування профілю.

Згідно з практики українських та закордонних колег, саме локальні підвищення, навіть якщо вони не є деформаціями, потрібно включати у список пріоритетного моніторингу.

Фактичних деформацій дорожнього полотна не виявлено, детальний геометричний аналіз дозволив визначити ділянки, які мають інженерне

значення і потребують періодичного спостереження. Виявлені потенційні ризики не є критичними, але їхнє своєчасне розпізнавання підвищує надійність експлуатаційного моніторингу та дозволяє прогнозувати можливі зміни у поведінці дорожнього полотна в майбутньому. Саме такий превентивний підхід відповідає сучасним європейським практикам контролю транспортної інфраструктури та повністю узгоджується з методологією TLS-моніторингу.

4.4. Застосування цифрової моделі дорожнього полотна

Отримана цифрова модель дорожнього полотна є не лише результатом геодезичного моделювання, а й фундаментальною основою для подальшого моніторингу стану транспортної інфраструктури. Завдяки високій точності відтворення геометрії, деталізації рельєфу та конструктивних елементів досліджуваної ділянки, модель може бути використана як універсальний аналітичний інструмент для тривалого спостереження за поведінкою дорожнього полотна та естакади в умовах складного гірського рельєфу.

Досліджувана естакада розташована у потенційно небезпечній зоні, що пов'язано з крутим схилом із південного боку дороги, наявністю кам'яних укосів, підпірних стін і природних умов, схильних до періодичних обвалів та осипів. Безперервний вплив гірських порід, зміна вологості, сезонні процеси морозного здимання, а також імовірність локальних зрушень ґрунту створюють додаткове навантаження на дорожню конструкцію. У таких умовах точна цифрова модель стає важливою основою для інженерного контролю, оскільки дозволяє фіксувати навіть мінімальні зміни у положенні дорожнього полотна та елементів штучної споруди (рис.4.33).



Рисунок 4.33 «Представлення зон потенційних ризиків»

Побудована модель дозволяє виконувати як періодичний моніторинг у динаміці, так і разові експертні аналізи після небезпечних подій, таких як сильні дощі, сніготанення або локальні зсуви. Завдяки можливості створення нових моделей за даними повторних TLS-знімань та їх точного порівняння з сучасним станом, інженери отримують можливість оперативно відстежувати вертикальні та горизонтальні переміщення, локальні деформації, зміни профілю естакади та прилеглих укосів.

Ця модель є чудовою вихідною точкою для довготривалого моніторингу естакади, оскільки дозволяє не лише реєструвати зміни геометрії полотна, а й оцінювати поведінку конструктивних елементів у місцях їх взаємодії з природним рельєфом. Особливо важливо, що модель точно відтворює ділянки переходу від насипу до штучної споруди — саме ці місця найчастіше є зонами концентрації напружень і потенційними точками виникнення деформацій.

Окрім моніторингових задач, цифрова модель може використовуватися для подальшого проектування ремонтних або реконструктивних заходів. Детальне відтворення рельєфу та конструкцій дозволяє розраховувати об'єми земляних робіт, оцінювати ухили, аналізувати дренажні умови та виявляти можливі проблемні ділянки ще до початку фізичного втручання. Модель також може служити точним джерелом даних для геотехнічних досліджень, зокрема для аналізу стійкості схилів і прогнозування їх подальшої поведінки.

ВИСНОВОК ДО РОЗДІЛУ 4

У розділі 4 було проведено апробацію алгоритму створення цифрової моделі дорожнього полотна на основі хмари точок, що дозволило перевірити його ефективність у реальних інженерно-геодезичних умовах. На прикладі складної гірської ділянки дороги Швейцарських Альп продемонстровано повний цикл перетворення TLS-даних у високоточну ЦМДП, придатну для аналізу, моніторингу та подальшого використання у проєктних задачах. У ході моделювання було реалізовано ключові етапи алгоритму: попередню підготовку хмари точок у Autodesk ReCap, імпорт та створення TIN-поверхні в Civil 3D, формування структурних брейклайнів та інтеграцію твердотільних 3D-елементів мостової частини. Ці процедури забезпечили коректну інтерпретацію рельєфу та достовірне відображення конструктивних переломів дорожнього полотна.

Початкові дані, отримані за допомогою високоточного лазерного сканера Leica P40, забезпечили надзвичайно детальне відтворення фактичної геометрії дороги, її конструктивних елементів та природного рельєфу. Завдяки високій щільності хмари точок ($\approx 50\,000$ т/м²) та точності реєстрації (3 мм) стало можливим виконати побудову моделі з метрологічною похибкою, що не перевищує ± 5 мм. Це підтверджує здатність TLS-технології забезпечувати рівень точності, необхідний для інженерного моніторингу.

Порівняння моделей 2005 та 2025 років дозволило визначити, що зміни у геометрії мають техногенний характер і зумовлені реконструктивними роботами — середнє підняття полотна становить близько +12 см. При цьому ознак деформацій чи нестабільності дорожньої конструкції не виявлено: вісь дороги залишилася незмінною, горизонтальні зміщення відсутні, а поздовжній профіль демонструє стабільність основи. Водночас вдалося ідентифікувати локальні зони потенційного інженерного ризику, що є важливим для наступного моніторингу.

ВИСНОВОК

У дипломній роботі виконано комплексне дослідження та вдосконалення методології створення цифрової моделі дорожнього полотна на основі хмар точок із застосуванням сучасних ГІС- і САD-технологій. У процесі теоретичного аналізу, розглянутого в перших трьох розділах, було встановлено, що наявні підходи до обробки хмар точок та моделювання дорожніх об'єктів часто є фрагментованими та не забезпечують достатньої узгодженості між ГІС- і інженерними середовищами. Це стало підґрунтям для розроблення та впровадження удосконаленого алгоритму, який забезпечує цілісний, системний і технологічно оптимізований процес побудови цифрової моделі дорожнього полотна.

Запропоноване удосконалення полягає у створенні інтегрованого алгоритму, що поєднує етапи очищення, сегментації хмари точок, формування векторних об'єктів, генерації TIN-поверхні та подальшого експорту структурованих даних у Civil 3D, а також їх повторного включення у ГІС для аналітики та візуалізації. На відміну від традиційних підходів, у роботі запропоновано узгоджену схему передачі даних між програмними середовищами, чіткий порядок формування брейклайнів та структурних ліній, а також оптимізовані критерії сегментації дорожнього полотна на основі аналізу ухилів, інтенсивності та профільних характеристик. Це дозволило мінімізувати втрати точності під час міжпрограмної інтеграції та підвищити стабільність моделі на етапах подальшої аналітики.

Практична апробація у четвертому розділі підтвердила ефективність алгоритму. Вихідні дані лазерного сканування характеризувалися високою якістю — щільність хмари точок становила близько 50 000 т/м², похибка сканування перебувала в межах 2–3 мм, а похибка реєстрації сканів — близько 3 мм. Завдяки впровадженим методичним покращенням вдалося отримати цифрову модель дороги зі середньою геометричною точністю близько ± 5 мм,

а точність визначення брейклайнів становила 5–8 мм при точності TIN-поверхні до 1 см. Порівняльний аналіз моделей різних періодів дав змогу встановити вертикальні зміни дорожнього полотна з максимальним підняттям до 12 см та відсутністю горизонтальних зміщень, що підтверджує високу стабільність конструкції. Локальні відхилення у межах 5–15 мм відповідають нормам для гірської місцевості й не мають деформаційного характеру.

Алгоритм формування ЦМДП на основі хмар точок довів свою високу ефективність: забезпечує точну, структурно узгоджену та аналітично придатну цифрову модель, яка може бути використана для моніторингу стану дорожньої інфраструктури, прогнозування деформацій, планування ремонтних заходів і створення цифрових двійників транспортних об'єктів. Результати роботи підтверджують доцільність застосування сучасних ГІС і САД-технологій та демонструють можливість їх методичного поєднання в єдиний оптимізований процес, що може бути використаний у практичній діяльності організацій, відповідальних за будівництво та експлуатацію автомобільних доріг.

Таким чином, розроблене в дипломній роботі удосконалення вносить реальний внесок у підвищення точності, надійності та аналітичної цінності цифрових моделей дорожнього полотна та формує методологічну основу для подальших досліджень у сфері автоматизації аналізу хмар точок, інтелектуального виділення елементів дорожньої інфраструктури та повноцінної реалізації концепції цифрових двійників у дорожньому господарстві.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Road extraction in remote sensing data: A survey [Електронний ресурс]. — Режим доступ: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1569843222000358>
2. An Introduction to Lidar Technology, Data, and Applications [Електронний ресурс]. — Режим доступ: <https://coast.noaa.gov/data/digitalcoast/pdf/lidar-101.pdf>
3. A Review of GIS Technology Applications in Transportation Planning and Management [Електронний ресурс]. — Режим доступ: https://www.researchgate.net/publication/380562077_A_Review_of_GIS_Technology_Applications_in_Transportation_Planning_and_Management
4. Pelden, S., Vanhashemi, S., Mohandes, S. R., Arashpour, M., & Kalantari, M. (2025). Enhancing infrastructure planning and design through BIM-GIS integration. Structure and Infrastructure Engineering, 1-20 [Електронний ресурс]. — Режим доступ: https://www.researchgate.net/publication/388819208_Enhancing_infrastructure_planning_and_design_through_BIM-GIS_integration
5. Optimization of Road Construction Planning Using GIS and Remote Sensing Technologies [Електронний ресурс]. — Режим доступ: <https://journals.e-palli.com/home/index.php/ajgt/article/view/5844/2648>
6. Tumpa, R. J., & Naeni, L. (2025). Improving decision-making and stakeholder engagement at project governance using digital technology for sustainable infrastructure projects. Smart and Sustainable Built Environment, 14(4), 1292-1329 [Електронний ресурс]. — Режим доступ: https://www.researchgate.net/publication/395844029_From_diversity_to_social_value_insights_from_infrastructure_project_professionals
7. Геоінформаційні системи (ГІС) [Електронний ресурс]. — Режим доступ: <https://geoguide.com.ua/survey/survey.php?part=gis>
8. USAGE OF GIS IN ENGINEERING AND GEODETIC SURVEYS FOR ROAD DESIGN [Електронний ресурс]. — Режим доступ: https://www.researchgate.net/publication/396707433_USAGE_OF_GIS_IN_ENGINEERING_AND_GEODETIC_SURVEYS_FOR_ROAD_DESIGN
9. Machine Learning in ArcGIS [Електронний ресурс]. — Режим доступ: <https://www.esri.com/about/newsroom/arcuser/machine-learning-in-arcgis>
10. ArcGIS Pro + ArcGIS 3D Analyst [Електронний ресурс]. — Режим доступ: <https://www.esri.com/en-us/arcgis/products/arcgis-pro/overview>

11. Bentley OpenRoads Designer [Електронний ресурс]. — Режим доступ: <https://www.bentley.com/software/openroads-designer/>
12. TerraSolid Suite (TerraScan, TerraModeler, TerraRoads) [Електронний ресурс]. — Режим доступ: <https://terrasolid.com/>
13. Pix4D Survey / Pix4D Mapper [Електронний ресурс]. — Режим доступ: <https://www.pix4d.com/product/pix4dsurvey>
14. RoadRunner (MathWorks) [Електронний ресурс]. — Режим доступ: <https://www.mathworks.com/products/roadrunner.html>
15. Semantic Segmentation of LiDAR Point Clouds (UNet, KPConv) [Електронний ресурс]. — Режим доступ: <https://isprs-annals.copernicus.org/articles/V-2-2020/281/2020/isprs-annals-V-2-2020-281-2020.pdf>
16. USACE – Engineering and Design: Photogrammetric Mapping (EM 1110-1-1000) [Електронний ресурс]. — Режим доступ: https://www.publications.usace.army.mil/Portals/76/Publications/EngineerManuals/EM_1110-1-1000.pdf
17. Laser Scanners and Software [Електронний ресурс]. — Режим доступ: <https://leica-geosystems.com/products/laser-scanners>
18. A Policy on Geometric Design of Highways and Streets [Електронний ресурс]. — Режим доступ: https://kankakeerecycling.com/wp-content/uploads/2023/04/THE_GREEN_BOOK_A_Policy_on_Geometric_Des.pdf
19. Geospatial Positioning Accuracy Standards [Електронний ресурс]. — Режим доступ: <https://www.fgdc.gov/standards/projects/FGDC-standards-projects/accuracy/part3/chapter3>
20. Point cloud [Електронний ресурс]. — Режим доступ: https://en.wikipedia.org/wiki/Point_cloud
21. USACE – Photogrammetric Mapping (EM 1110-1-1000) [Електронний ресурс]. — Режим доступ: https://www.publications.usace.army.mil/Portals/76/Publications/EngineerManuals/EM_1110-1-1000.pdf
22. Система наземного лазерного сканування TLS [Електронний ресурс]. — Режим доступ: http://www.demetra5.kiev.ua/ua/catalog/n_s_1_s/TLS-M3

23. Мобільне лазерне сканування (MMS) [Електронний ресурс]. — Режим доступ: https://www.prin.ru/blog/mobil_noe_lazernoe_skanirovanie_novyj_trend_polucheniya_geoprostranstvennoj_informacii/
24. What is UAV LiDAR? [Електронний ресурс]. — Режим доступ: <https://www.routescene.com/resources/what-is-uav-lidar/>
25. Фотограмметрія з БПЛА [Електронний ресурс]. — Режим доступ: <https://softline.ru/about/blog/Kartografiya-po-bespilotnikam#bpla-dlya-fotogrammetrii-i-3d-kartografirovaniya>
26. ACCURACY AND POINT DENSITY SPECIFICATION [Електронний ресурс]. — Режим доступ: <https://learnmobilelidar.com/guidance-document/chapter-12-accuracy-and-point-density-specification/>
27. Lidar Base Specification. USGS [Електронний ресурс]. — Режим доступ: https://pubs.usgs.gov/tm/11b4/pdf/tm11-B4.pdf?utm_source=
28. Manual On Uniform Traffic Control Devices [Електронний ресурс]. — Режим доступ: <https://www.scribd.com/document/39567273/Manual-on-Uniform-Traffic-Control-Devices>
29. LAZ Specification 1.4 [Електронний ресурс]. — Режим доступ: https://downloads.rapidlasso.de/doc/LAZ_Specification_1.4_R1.pdf
30. Breaklines in surface modeling [Електронний ресурс]. — Режим доступ: <https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/extensions/3d-analyst/breaklines-in-surface-modeling.htm>
31. Triangular Irregular Networks – TIN [Електронний ресурс]. — Режим доступ: <https://desktop.arcgis.com/ru/arcmap/latest/manage-data/tin/fundamentals-of-tin-surfaces.htm>
32. Point Clouds in GIS: Accurate 3D Mapping Explained [Електронний ресурс]. — Режим доступ: <https://www.uavsphere.com/post/point-clouds-in-gis-accurate-3d-mapping-explained>
33. Create Point Cloud Scene Layer Content (Data Management) [Електронний ресурс]. — Режим доступ: https://pro.arcgis.com/en/pro-app/3.4/tool-reference/data-management/create-point-cloud-scene-layer-package.htm?utm_source=chatgpt.com
34. Removing outliers using a StatisticalOutlierRemoval filter [Електронний ресурс]. — Режим доступ: https://pcl.readthedocs.io/projects/tutorials/en/latest/statistical_outlier.html

35. Interactive Segmentation Tool [Электронный ресурс]. — Режим доступ: https://www.cloudcompare.org/doc/wiki/index.php/Interactive_Segmentation_Tool
36. Slope (Spatial Analyst) [Электронный ресурс]. — Режим доступ: <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/3.4/tool-reference/spatial-analyst/slope.htm>
37. Delaunay triangles [Электронный ресурс]. — Режим доступ: <https://support.esri.com/en-us/gis-dictionary/delaunay-triangles#:~:text=Delaunay%20triangles%20cannot%20exist%20alone,the%20collection%20in%20its%20interior.>
38. Convert TIN surfaces from a LandXML file to a raster dataset in ArcGIS Pro [Электронный ресурс]. — Режим доступ: <https://support.esri.com/en-us/knowledge-base/how-to-convert-tin-surfaces-from-a-landxml-file-to-a-raster-dataset-in-arcgis-pro/000032967>
39. DETECTION AND VECTORISATION OF ROADS FROM LIDAR DATA [Электронный ресурс]. — Режим доступ: https://www.researchgate.net/publication/37619043_Detection_and_Vectorisation_of_Roads_from_Lidar_Data
40. Recognising basic structures from mobile laser scanning data for road inventory studies [Электронный ресурс]. — Режим доступ: https://www.researchgate.net/publication/303855877_Recognising_basic_structures_from_mobile_laser_scanning_data_for_road_inventory_studies
41. About Surface Breakline Tools [Электронный ресурс]. — Режим доступ: <https://help.autodesk.com/view/CIV3D/2025/ENU/?guid=GUID-DF0D9C8E-F428-42EF-8A4B-1D8F5390DCD4>
42. ROAD TYPE CLASSIFICATION OF MLS POINT CLOUDS USING DEEP LEARNING [Электронный ресурс]. — Режим доступ: <https://isprs-archives.copernicus.org/articles/XLIII-B2-2021/115/2021/>
43. Airborne and Terrestrial Laser Scanning [Электронный ресурс]. — Режим доступ: https://www.researchgate.net/publication/220690347_Airborne_and_Terrestrial_Laser_Scanning
44. An automated algorithm for extracting road edges from terrestrial mobile LiDAR data [Электронный ресурс]. — Режим доступ: <https://mural.maynoothuniversity.ie/id/eprint/6945/1/PL-Automated-Algorithm.pdf>
45. ArcGIS for AutoCAD: CAD and GIS working together [Электронный ресурс]. — Режим доступ: <https://www.esri.com/arcgis-blog/products/autocad/aec/arcgis-for-autocad-cad-and-gis-working-together>

46. To Export Drawing Data to LandXML [Електронний ресурс]. — Режим доступ: <https://help.autodesk.com/view/CIV3D/2024/ENU/?guid=GUID-D72C7B0E-387B-496C-9843-F9AF2857B55B>
47. CAD data as ArcGIS Pro layers [Електронний ресурс]. — Режим доступ: <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/help/data/cad/cad-data-in-arcgis-pro.htm>
48. CAD To Geodatabase (Conversion) [Електронний ресурс]. — Режим доступ: https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/conversion/cad-to-geodatabase.htm?utm_source=chatgpt.com
49. Hillshade function [Електронний ресурс]. — Режим доступ: https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/help/analysis/raster-functions/hillshade-function.htm?utm_source=chatgpt.com
50. An overview of the Hydrology toolset [Електронний ресурс]. — Режим доступ: https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/spatial-analyst/an-overview-of-the-hydrology-tools.htm?utm_source=chatgpt.com
51. 3D object scene layer [Електронний ресурс]. — Режим доступ: <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/help/mapping/layer-properties/the-3d-objects-scene-layer-in-arcgis-pro.htm>
52. USGS LiDAR Base Specification 2.1 [Електронний ресурс]. — Режим доступ: <https://d9-wret.s3.us-west-2.amazonaws.com/assets/palladium/production/s3fs-public/atoms/files/Lidar-Base-Specification-version-2-1.pdf>
- 53 . ДБН В.2.3-4:2015 «Автомобільні дороги» [Електронний ресурс]. — Режим доступ: https://dreamdim.ua/wp-content/uploads/2022/08/DBN-V_2_3-4_2015.pdf
- 54 . Manual of photogrammetry [Електронний ресурс]. — Режим доступ: https://www.researchgate.net/publication/298278326_Manual_of_photogrammetry
55. [Електронний ресурс]. — Режим доступ: <https://trigonet.ch/>
56. Vosselman G., Maas H.-G. (2010). Airborne and Terrestrial Laser Scanning. CRC Press.
57. Baltsavias E. (1999). Airborne laser scanning: basic relations and formulas. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing [Електронний ресурс]. — Режим доступ: [DOI: 10.1016/S0924-2716\(99\)00015-0](https://doi.org/10.1016/S0924-2716(99)00015-0)

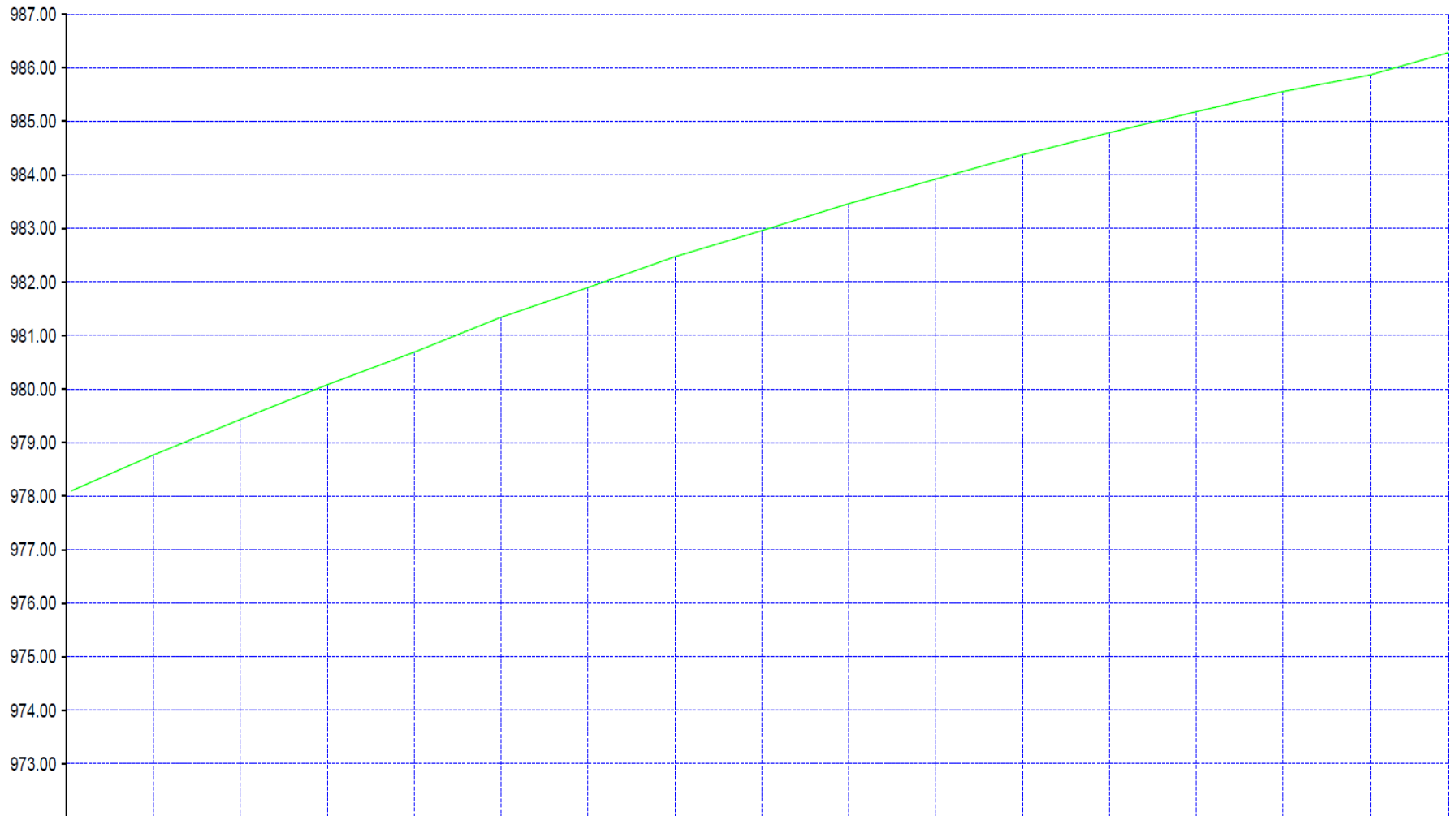
58. Reshetyuk Y. (2009). Investigation of the Accuracy and Quality of Terrestrial Laser Scanning Data. Royal Institute of Technology.
59. Autodesk Inc. (2023). Autodesk Civil 3D. User Guide.
60. Autodesk Inc. (2022). Autodesk ReCap Pro Documentation.
61. CloudCompare Team. (2023). CloudCompare Documentation, Version 2.12.
62. Pettit C., Lieske S., Jamalinasab N. (2021). Advances in point cloud processing for digital twins of road infrastructure. ISPRS Annals [Электронный ресурс]. — Режим доступ: [DOI: 10.5194/isprs-annals-V-4-2021-195-2021](https://doi.org/10.5194/isprs-annals-V-4-2021-195-2021)
63. Žalik B., Kolvoord B. (2019). TIN-based surface modelling methods in civil engineering. Computers & Geosciences [Электронный ресурс]. — Режим доступ: [DOI: 10.1016/j.cageo.2019.104300](https://doi.org/10.1016/j.cageo.2019.104300)
64. Mahmud S., Mia M. (2020). Change detection of road deformation using LiDAR-derived point clouds. Remote Sensing [Электронный ресурс]. — Режим доступ: [DOI: 10.3390/rs12152402](https://doi.org/10.3390/rs12152402)
65. Zeybek M. (2015). Road surface deformation analysis based on terrestrial laser scanning. Measurement [Электронный ресурс]. — Режим доступ: [DOI: 10.1016/j.measurement.2015.07.032](https://doi.org/10.1016/j.measurement.2015.07.032)
66. Kukko A., Kaartinen H., Hyypä J. (2012). Road environment mapping using vehicle-based laser scanning. Sensors [Электронный ресурс]. — Режим доступ: [DOI: 10.3390/s120302446](https://doi.org/10.3390/s120302446)
67. Rabbani T., van den Heuvel F., Vosselman G. (2006). Segmentation of point clouds using smoothness constraints. ISPRS Commission V Symposium.
68. Pu S., Rutzinger M., Vosselman G. (2011). Automatic extraction of road edges from point clouds. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing [Электронный ресурс]. — Режим доступ: [DOI: 10.14358/PERS.77.12.1089](https://doi.org/10.14358/PERS.77.12.1089)
69. Haas C., Lacombe S. (2018). Using LiDAR data for monitoring road surface distress. Transportation Research Record [Электронный ресурс]. — Режим доступ: [DOI: 10.1177/0361198118757942](https://doi.org/10.1177/0361198118757942)
70. Li Z., Zhu Q., Gold C. (2005). Digital Terrain Modeling: Principles and Methodology. CRC Press.

71. 23. Li Z., Zhu Q., Gold C. (2005). Digital Terrain Modeling: Principles and Methodology. CRC Press.
72. Žalik B., Kolvoord B. (2019). TIN-based surface modelling methods in civil engineering. Computers & Geosciences [Электронный ресурс]. — Режим доступ: [DOI: 10.1016/j.cageo.2019.104300](https://doi.org/10.1016/j.cageo.2019.104300)
73. Holst C., Kuhlmann H. (2016). Surface analysis based on high-density point clouds for structural monitoring. Journal of Applied Geodesy, 10(1), 17–25 [Электронный ресурс]. — Режим доступ: <https://doi.org/10.1515/jag-2015-0028>
74. Neuner H., Dorninger P., Pfeifer N. (2013). Assessing geometry changes using TLS time-series. Applied Geomatics, 5, 1–12 [Электронный ресурс]. — Режим доступ: <https://doi.org/10.1007/s12518-012-0090-8>
75. Mahmud S., Mia M. (2020). Change detection of road deformation using LiDAR-derived point clouds. Remote Sensing, 12(16), 2602 [Электронный ресурс]. — Режим доступ: <https://doi.org/10.3390/rs12162602>

ГРАФІЧНИЙ МАТЕРІАЛ

					ДИПЛОМНИЙ ПРОЕКТ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Виконала		Рафальська К.Б.			Застосування геоінформаційних технологій для побудови цифрової моделі дорожнього полотна на основі хмари точок	Літ.	Арк.	Аркушів
.							1	3
Керівник		Горковчук Ю.В.				108		
Зав. каф.		Карпінський Ю.О			КНУБА, ГІСУТ, група ГСТМ-24			

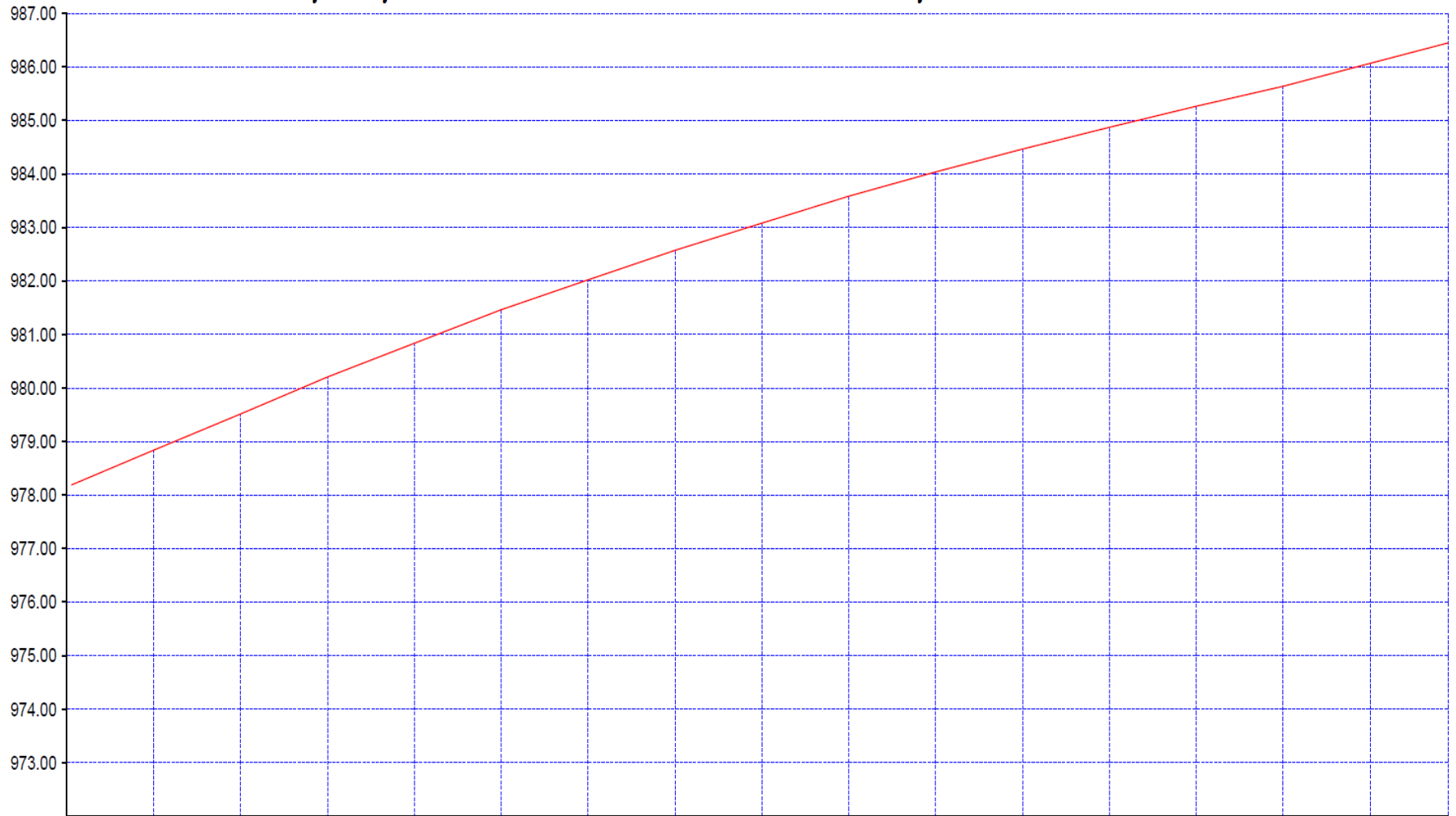
Профіль станом на 2005 рік



М 1:1000 по горизонталі
М 1:100 по вертикалі

Фактичні дані станом на 2005р.	Чил , % , вертикальна крива	35.43%	33.17%	32.38%	30.52%	32.63%	27.64%	28.74%	24.35%	25.22%	22.94%	22.93%	20.35%	19.71%	18.96%	15.46%	23.07%
	Відмітка землі , м	978,77	979,43	980,08	980,69	981,34	981,90	982,47	982,96	983,46	983,92	984,38	984,79	985,18	985,56	985,87	986,25
	Відстань , м	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	18
	Пікет	0				1					2						3

Профіль станом на 2025рік



Фактичні дані станом на 2025р.	Ухил , %, вертикальна крива , м	34.50%	33.87%	34.34%	31.63%	31.37%	27.96%	27.51%	25.42%	25.14%	22.66%	21.37%	20.23%	19.66%	18.75%	21.32%	21.38%	
	Відмітка землі , м	18,89	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	17,91
	Відстань , м	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	17,91
	Пікет	0					1						2					

Поєднання профілей 2005 р. + 2025р



М 1:1000 по горизонталі
М 1:100 по вертикалі

Фактичні дані станом на 2025р.	Ухил , % , вертикальна крива , м	34.50% 18,89	33.87% 20,00	34.34% 20,00	31.63% 20,00	31.37% 20,00	27.96% 20,00	27.51% 20,00	25.42% 20,00	25.14% 20,00	22.66% 20,00	21.37% 20,00	20.23% 20,00	19.66% 20,00	18.75% 20,00	21.32% 20,00	21.38% 17,91
	Відмітка землі , м	978,84	979,52	980,20	980,84	981,46	982,02	982,57	983,08	983,59	984,04	984,47	984,87	985,27	985,65	986,08	
	Відстань , м	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	17,91
	Пікет	0			1			2			3						
Фактичні дані станом на 2005р.	Ухил , % , вертикальна крива	35.43% 18,89	33.17% 20,00	32.38% 20,00	30.52% 20,00	32.63% 20,00	27.64% 20,00	28.74% 20,00	24.35% 20,00	25.22% 20,00	22.94% 20,00	22.93% 20,00	20.35% 20,00	19.71% 20,00	18.96% 20,00	15.46% 20,00	23.07% 17,91
	Відмітка землі , м	978,77	979,43	980,08	980,69	981,34	981,90	982,47	982,96	983,46	983,92	984,38	984,79	985,18	985,56	985,87	
	Відстань , м	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	18
	Пікет	0			1			2			3						
Різнаця відміток (2005р-2025р)		+0,07	+0,09	+0,12	+0,15	+0,12	+0,12	+0,10	+0,12	+0,13	+0,12	+0,09	+0,08	+0,09	+0,09	+0,21	