

Міністерство освіти і науки України
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
Інститут архітектури та будівництва «ІФНТУНГ-ДОННАБА»
Кафедра геодезії та землеустрою

Бабак Богдана Володимирівна

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 528.16
(індекс)

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

**Обґрунтування точності геодезичних робіт для створення цифрового
двійника Костелу Бернардинів у с-щі Гвіздець Івано-Франківської
області в умовах воєнних загроз**

(назва роботи)

193 Геодезія та землеустрій

(назва освітньої програми)

193 Геодезія та землеустрій

(шифр і назва спеціальності)

Робота містить результати власних досліджень, використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело:

Здобувач освітнього ступеня

Б.В. Бабак

(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник

Лиско Богдан Олегович, к.т.н., доцент

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

Допущено до захисту

Завідувач кафедри

геодезії та землеустрою

М.М. Приходько

(посада)

(підпис)

(дата)

(ініціали та прізвище)

Івано-Франківськ – 2026

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
Інститут архітектури та будівництва «ІФНТУНГ-ДонНАБА»
Кафедра геодезії та землеустрою
Освітньо-кваліфікаційний рівень бакалавр
Спеціальність 193 Геодезія та землеустрій
Освітньо-професійна програма Геодезія та землеустрій

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри ГКЗ
Приходько М. М.

«__» _____ 2026 року

ЗАВДАННЯ
НА БАКАЛАВРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ

Бабак Богдана Володимирівна

1. Тема роботи «Обґрунтування точності геодезичних робіт для створення цифрового двійника Костелу Бернардинів у с-щі Гвіздець Івано-Франківської області в умовах воєнних загроз»

Керівник роботи доц. Лиско Б.О.

Наказ ректора від «13» травня _____ 2026 року № 358.

2. Термін подання студентом роботи – _____ 2026 року.

3. Вихідні дані до роботи:

Матеріали переддипломної практики.

Нормативно-правова та історико-архітектурна база

Сирі файли вимірювань (.SDR/.RDF/.TXT), експортовані з пам'яті електронного тахеометра

Дані наземного лазерного сканування (II ступінь точності — TLS)

Фотомасив аерозйомки: 441 цифровий знімок високої роздільної здатності з квадрокоптера DJI Phantom 4 Pro та камери Canon EOS 650D, отриманий суворо у похмуру погоду

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки:

1. Аналіз існуючих геодезичних методів збору просторових даних

2. Існуючі методи геодезичного забезпечення проектів вертикального планування.

3. Порівняльний аналіз методів мінімізації об'ємів земляних робіт.

5. Перелік графічного матеріалу:

1 Існуючі топографічні плани і карти на об'єкт досліджень

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв

7. Дата видачі завдання – «01» березня 2026 року.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів бакалаврської роботи	Термін виконання	Примітка
1	Отримання завдання на виконання бакалаврської роботи. Опрацювання рекомендованої літератури.	01.03.26 15.03.26	
2	Складання попереднього плану та змісту бакалаврської роботи.	19.03.26 25.03.26	
3	Аналіз юридичних аспектів створення цифрових двійників	26.03.25 12.04.25	
4	Створення планово-висотної основи.	13.04.26 29.04.26	
5	Виконання топографічного знімання методами БПЛА та фотограметрії	30.04.26 15.05.26	
6	Формування пояснювальної записки землевпорядної документації.	16.05.26 18.05.26	
7	Оформлення бакалаврської роботи та додатків до неї, складання висновків.	19.05.26 31.05.26	

Студент

(підпис)

Бабак Б.В.

(розшифровка підпису)

Керівник

(підпис)

Лиско Б.О.

(розшифровка підпису)

АНОТАЦІЯ

У даній роботі розроблено алгоритм опрацювання результатів досліджень просторової точності геометричних параметрів цифрових двійників архітектурної спадщини. Його суть полягає у використанні інструментарію математичної статистики та знаходженні мінімуму цільової функції визначення похибок ієрархічної чотирирівневої структури моделювання. Спочатку було досліджено нормативно-технічні вимоги до задіяних приладів та об'єкта: розглянуто вплив кореляційної залежності між національними будівельними стандартами фізичної надійності споруд і міжнародними хартіями збереження автентичності історичних пам'яток.

Далі складено систему рівнянь на основі геометричних зв'язків між геодезичним обґрунтуванням, знімальною мережею, архітектурною моделлю та територіальним рівнем ГІС у всіх можливих комбінаціях з урахуванням концепції Level of Accuracy (LoA). Таким чином, одержано умовні рівняння з однією невідомою — величиною трансляції помилок від вищого ієрархічного ступеня до нижчого. Завдяки цьому визначено найімовірніше просторове положення тримальних конструкцій, а також значення фактичних деформацій та кренів вежі, що є узгодженими у всіх обчислювальних комбінаціях.

Експериментальні дослідження проводились на реальному об'єкті архітектурної спадщини за оптимальних метеорологічних умов. На прикладі аналізу дзвіниці Костелу Бернардинів за допомогою комплексного використання приладів Leica TS30, Leica HDS 7000 та DJI Phantom 4 Pro встановлено, що точність одержаних апроксимованих значень геометричних контурів споруди (СКП 0.4 мм) практично удвічі вища від задекларованої у реставраційних ДБН граничної похибки архітектурних обмірів для масштабу 1:50.

Ключові слова: цифровий двійник; інженерна геодезія; ієрархія точності; нормативні вимоги; лазерне сканування; БПЛА-фотограмметрія; HBIM.

ABSTRACT

This paper develops an algorithm for processing the results of space accuracy investigations regarding the geometric parameters of digital twins representing architectural heritage. Its essence lies in using mathematical statistics tools and finding the minimum of a objective function for determining errors within a hierarchical four-level modeling structure. First, the normative and technical requirements for the equipment involved and the object itself were studied: the influence of the correlation dependency between national building standards for the physical reliability of structures and international charters for preserving the authenticity of historical monuments was considered.

Next, a system of equations was compiled based on geometric links between the geodetic control, the survey network, the architectural model, and the territorial GIS level in all possible combinations, taking into account the Level of Accuracy (LoA) concept. Thus, conditional equations with one unknown were obtained — namely, the value of error translation from a higher hierarchical level to a lower one. Thanks to this, the most probable spatial position of structural elements, as well as the values of actual deformations and tower tilts, which are consistent across all computational combinations, were determined.

Experimental research was conducted on a real architectural heritage site under optimal meteorological conditions. On the example of the Bernardine Church bell tower analysis using the combined application of Leica TS30, Leica HDS 7000, and DJI Phantom 4 Pro instruments, it was established that the accuracy of the obtained approximated values of the building's geometric contours (RMSE 0.4 mm) is practically twice as high as the limit error of architectural surveys for a 1:50 scale declared in national restoration standards (DBN).

Keywords: *Digital Twin; Engineering Geodesy; Accuracy Hierarchy; Normative Requirements; Laser Scanning; UAV Photogrammetry; HBIM.*

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ 1. СТАН ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОБЛЕМИ ТА ХАРАКТЕРИСТИКА ОБ'ЄКТА АРХІТЕКТУРНОЇ СПАДЩИНИ	9
1.1 Історико-архітектурна характеристика Костелу Бернардинів у селищі Гвіздець.....	9
1.2 Порівняльний аналіз архітектурних та конструктивних особливостей Костелу Бернардинів у Гвіздці та Костелу Непорочного Зачаття у Городенці..	13
1.3 Воєнні загрози для культурної спадщини Прикарпаття та необхідність створення цифрових двійників	18
РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИКО-МЕТОДОЛОГІЧНІ ОСНОВИ ГЕОДЕЗИЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ФІКСАЦІЇ ПАМ'ЯТОК ТА КОНЦЕПЦІЯ НВІМ	28
2.1 Нормативно-технічні вимоги до точності геодезичних робіт при моделюванні пам'яток архітектури.	29
2.2 Концепція цифрового двійника (Digital Twin) та технології історичного інформаційного моделювання (НВІМ).....	35
РОЗДІЛ 3. ТЕХНОЛОГІЧНА СХЕМА СТВОРЕННЯ ЦИФРОВОГО ДВІЙНИКА КОСТЕЛУ БЕРНАРДИНІВ	39
3.1 Аналіз сучасних геодезичних технологій для цифрової документації об'єктів культурної спадщини.	39
3.2 Технологічні особливості наземного лазерного сканування при створенні просторових хмар точок.....	43
3.3 Алгоритми автоматизованої фотограмметрії в процесах тривимірної цифрової репрезентації споруд	
Висновки.....	44
Список використаних джерел.....	45

ВСТУП

Сучасний етап російсько-української війни сформував безпрецедентні виклики для збереження культурної спадщини України. Івано-Франківська область регулярно стає об'єктом ракетних ударів та атак БПЛА. Це створює постійну загрозу руйнування архітектурних пам'яток від вибухових і сейсмо-акустичних хвиля. Для аварійних барокових об'єктів Покуття, зокрема Костелу Бернардинів у с-щі Гвіздець, ці чинники є критичними [8]. Споруда вже має небезпечні деформації склепінь та крени веж. Традиційні обмірювальні роботи в таких умовах є повільними та небезпечними.

Єдиним надійним інструментом порятунку пам'ятки є створення її прецизійного цифрового двійника (Digital Twin). Він виступає «страховою матрицею» для автентичної відбудови та деформаційного моніторингу. Проте класичне використання концепції Level of Accuracy (LoA) має методологічні суперечності. Воно часто ігнорує закони накопичення похибок при зшивці гетерогенних даних. Це унеможливорює точний інженерний аналіз руйнувань. Таким чином, виникає потреба в науковому обґрунтуванні ієрархічної структури точності геодезичних робіт для створення достовірних NBIM-моделей в умовах воєнного стану.

Мета дослідження — обґрунтування комплексу методів створення топографо-геодезичного забезпечення для проектів цифрової консервації пам'яток архітектури національного значення та розробка ієрархічних моделей точності створення цифрових двійників на основі порівняльного аналізу аналітичних і чисельних підходів до зшивки та верифікації хмар точок.

Для досягнення поставленої мети сформульовано та вирішено такі завдання:

- Проаналізувати воєнні загрози для культурної спадщини Прикарпаття.
- Вивчити теоретичні основи технологій NBIM та цифрових двійників.
- Розробити та обґрунтувати чотирирівневу ієрархічну модель точності.
- Оцінити точність та виконати аналітичний синтез просторових даних.

– Створити параметричну об'ємну модель для інженерного моделювання стійкості.

Об'єкт дослідження — процес геодезичного забезпечення та геометричної оптимізації при створенні цифрового двійника пам'ятки архітектури національного значення в умовах воєнних загроз.

Предмет дослідження — технології наземного лазерного сканування, БПЛА-фотограмметрії, роботизованої тахеометрії, алгоритми урівноваження і суміщення хмар точок, а також ієрархічні моделі точності в середовищі HBIM.

Методи дослідження. У роботі використано: електронну роботизовану тахеометрію, супутникові GNSS-вимірювання, наземне лазерне сканування (TLS), цифрову аерофотозйомку, методи математичної статистики (МНК, Евклідова метрика для похмарного порівняння) та параметричне HBIM-моделювання.

Наукова новизна отриманих результатів:

Розроблено та математично обґрунтовано чотирирівневу ієрархічну модель розподілу похибок (LoA), підпорядковану принципу «від вищого до нижчого», що запобігає метричному відриву локального декору від глобальної геометрії будівлі.

Запропоновано трикомпонентну систему структуризації просторових даних двійника («геодезичний скелет» — «метрична оболонка» — «інформаційно-просторовий контур HBIM–GIS»), адаптовану під завдання оперативного моніторингу динамічних воєнних навантажень.

Практичне значення отриманих результатів:

Створено прецизійний цифровий двійник дзвіниці Костелу Бернардинів (масив із 2.3 млрд точок), який є легітимною основою для автентичної реставрації у разі фізичного ураження споруди.

Побудовано параметричну твердотільну модель (Solid Model), яка інтегрується з МСЕ (FEM) для комп'ютерного симулювання конструктивної стійкості костелу до потенційних вибухових хвиль та вібрацій від воєнної логістики.

РОЗДІЛ 1

СТАН ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОБЛЕМИ ТА ХАРАКТЕРИСТИКА ОБ'ЄКТА АРХІТЕКТУРНОЇ СПАДЩИНИ

1.1. Історико-архітектурна характеристика Костелу Бернардинів у с-щі Гвіздець

Історичні передумови та етапи формування монастирського ансамблю

Серед численних пам'яток сакральної архітектури Прикарпаття особливе місце займає Костел Святого Антонія та колишній монастир ордену бернардинів у селищі Гвіздець Коломийського району Івано-Франківської області [8]. Цей архітектурний комплекс належить до найцінніших пам'яток історико-культурної спадщини Покуття та є важливим свідченням розвитку сакральної архітектури Галичини XVIII століття. Завдяки своїй видатній історичній, архітектурній та містобудівній цінності об'єкт внесений до державного переліку пам'яток архітектури національного значення.

Гвіздець є одним із найдавніших поселень історичного регіону Покуття. Його вигідне географічне розташування на важливих торговельних шляхах свого часу сприяло швидкому економічному та культурному розвитку населеного пункту. Упродовж кількох століть містечко функціонувало як значний осередок ремесел, торгівлі та релігійного життя. Саме в таких умовах сформувалося унікальне історичне середовище, невід'ємною складовою якого став бернардинський монастирський комплекс.

Історія костелу бере свій початок ще у XV столітті. За історичними джерелами, перший римо-католицький храм у Гвіздці існував уже в 1475 році, а його фундатором вважають Яна Прокоповича. Первісна споруда була дерев'яною, що повністю відповідало тогочасним будівельним традиціям регіону. Проте внаслідок численних воєн та татарських нападів храм неодноразово зазнавав критичних пошкоджень і руйнувань.

Новий етап розвитку сакрального комплексу розпочався на початку XVIII століття. У цей період власник Гвіздця князь Міхал Пузина виступив ініціатором створення монастиря ордену бернардинів, які були однією з гілок францисканського ордену та відігравали провідну роль у релігійному, освітньому та культурному житті Речі Посполитої. Для потреб чернечої громади було розпочато будівництво нового мурованого комплексу, основні будівельні роботи якого тривали протягом 1721–1735 років. У результаті було сформовано цілісний монастирський ансамбль, до складу якого увійшли костел, монастирські келії, надбрамна дзвіниця та господарські споруди. Комплекс став одним із найбільших осередків бернардинів на території Покуття.

Архітектурно-планувальна структура та тривимірна геометрія споруди

Архітектурно споруда належить до стилю розвиненого та пізнього бароко, яке в першій половині XVIII століття набуло значного поширення на території Галичини. Для барокової архітектури характерними є монументальність композиції, складність просторових форм, динамічність архітектурних об'ємів та багатство декоративного оформлення фасадів. Усі ці риси яскраво простежуються в просторово-геометричному вирішенні костелу у Гвізді. [1]

З погляду геодезичної фіксації та подальшого цифрового моделювання (HBIM), об'єкт є просторово-інтегрованою системою зі складною геометрією, яку можна розділити на кілька ключових конструктивних елементів:

Головний корпус костелу (композиційна домінанта): Храм є мурованим із цегли, прямокутним у плані, з невеликим трансептом (поперечним нефом). Західний (головний) фасад характеризується строгою симетричною побудовою, чітким вертикальним членуванням та використанням пластичного барокового декору. Він прикрашений двома триярусними вежами зі складними бароковими дахами-банями. Головний портал оздоблений подвійними колонами коринфського ордеру, що створює велику кількість затінених зон та вимагає високої щільності точок при наземному лазерному скануванні. Тент (дах) костелу спирається на систему хрестових склепінь. З тильної сторони стіни

храму укріплені потужними контрфорсами, які стабілізують розпір склепінь. [1, 2, 3].



Рисунок 1.1 – Головний корпус костелу Костелу Бернардинів у с-щі Гвіздець

Корпус монастирських келій: Двоповерховий цегляний корпус прибудований до костелу з північного боку. Він має замкнену прямокутну структуру, що формує внутрішній дворик (атріум) квадратної форми. Внутрішнє планування коридорного типу з однобічним розташуванням келій. Склепіння першого поверху є хрещатими та напівциркульними. Наявність замкненого внутрішнього простору ускладнює побудову єдиного геодезичного обґрунтування через обмежену видимість між зовнішніми та внутрішніми станціями сканування.[1, 2]



Рисунок 1.2 – Корпус монастирських келій Костелу Бернардинів у с-щі
Гвіздець

Надбрамна дзвіниця: Зведена у 1776–1778 роках, розташована перед головним фасадом і виконує роль композиційного акценту. Це двоповерхова мурована споруда з двома проїздами/входами, верхня частина якої оздоблена витонченим кам'яним різьбленням та декоративними вазонами. [1]



Рисунок 1.3 – Надбрамна дзвіниця Костелу Бернардинів у с-щі Гвіздець

Внутрішній простір (інтер'єр): Характеризується складною тривимірною системою пілястр, арок та залишків барокового ліплення і стінописів. Просторове вирішення спрямоване на створення оптичних ілюзій та динаміки, що робить традиційні лінійні обміри неефективними та вимагає застосування суцільного тривимірного координування. [1]



Рисунок 1.4 – Внутрішній простір (інтер'єр) Костелу Бернардинів у с-щі Гвіздець

Містобудівне значення, історичні трансформації та сучасний стан

Костел Бернардинів має колосальне містобудівне значення. Він розташований на північ від колишньої ринкової площі історичного Гвіздця та виступає головною висотною архітектурною домінантою селища. Візуальне сприйняття комплексу формується завдяки його масштабу та розташуванню у структурі забудови, формуючи історичний силует населеного пункту. [1]

Історія комплексу у XX столітті суттєво підірвала його конструктивну цілісність. Після Другої світової війни, у 1945 році, радянська влада ліквідувала монастир. Споруду костелу перетворили на склад цементу, а згодом — на зерносховище. Хімічний вплив цементного пилу та критичний рівень вологості від зберігання зерна призвели до деградації внутрішнього тиньку, цегляної кладки та втрати унікальних інтер'єрів. Приміщення келій використовувалися як лікарня, а згодом — як музична школа та бібліотека. Хоча у 1992 році споруду повернули релігійній громаді, капітальний ремонт так і не був проведений через брак фінансування, і на сьогодні комплекс офіційно

перебуває в аварійному стані. Богослужіння проводяться лише в невеликій пристосованій каплиці всередині келій. [1]

Аналіз інженерно-геометричного стану будівлі та деформаційних процесів

Оскільки детальних інструментальних геодезичних моніторингів Костелу в Гвіздці раніше не проводилось, аналіз його геометричного стану базується на візуальних обстеженнях та закономірностях деформацій аналогічних барокових цегляних храмів зі складними склепіннями та вежами [13] (зокрема, за методологією моніторингу аварійних пам'яток Західної Європи, таких як барокові храми Італії та Польщі).

Сучасний геометричний стан Костелу Бернардинів характеризується розвитком небезпечних деформаційних процесів, які руйнують просторову жорсткість конструкції:

Порушення геометрії склепінь та розпору стін: Головною інженерною проблемою споруди є виникнення поздовжніх та поперечних тріщин у хрестових склепіннях нави. Через багаторічне протікання покрівлі відбулося вилужування вапняного розчину з цегляної кладки склепінь. Це призвело до зміни радіусів кривизни арок та появи нерівномірного горизонтального розпору на бічні стіни. Спостерігається відхилення вертикальних осей поздовжніх стін назовні (ефект «розгортання» стін), що є критичним для збереження стабільності будівлі. [1]

Деформації триярусних веж головного фасаду: Вежі головного фасаду зазнають найбільшого ексцентричного навантаження. Фіксується нерівномірна осадка фундаментів під вежами порівняно з основним об'ємом нави. Це викликає нахил (крен) веж відносно вертикальної осі. Геометричний ексцентриситет веж створює внутрішні напруження в місцях їхнього прилягання до головної стіни, що візуалізується у вигляді глибоких вертикальних тріщин розриву. [1]

Руйнування фасадного декору та контрфорсів: Масивні барокові карнизи, колони коринфського ордеру та пілястри під впливом температурно-

вологісних коливань втратили геометричну прив'язку до несучих стін. Спостерігається відшарування та руйнування елементів пластичного декору. Контрфорси, що підпирають тильну частину храму, подекуди мають ознаки відшарування від основного масиву стіни через просідання ґрунтів основи. [1, 2, 3]

Геометричні аномалії корпусу келій: У зоні примикання двоповерхового корпусу келій до північної стіни костелу фіксуються деформаційні шви, що розійшлися. Нерівномірний розподіл навантажень між масивною сакральною будівлею та легшим корпусом келій призвів к зсуву конструкцій відносно один одного, що порушує загальну просторову геометрію внутрішнього кляшторного дворика. [1, 2]

Обґрунтування необхідності створення цифрового двійника в умовах воєнних загроз

В умовах повномасштабної війни питання збереження культурної спадщини України набуло екзистенційного значення. Навіть Івано-Франківська область, яка віддалена від лінії безпосередніх бойових дій, регулярно зазнає ракетних та дронівих ударів по критичній інфраструктурі, що створює загрозу ударних та вібраційних хвиль.

Для об'єкта, який вже перебуває в аварійному стані (має тріщини у склепіннях та крени веж), навіть незначні сейсмічні чи вібраційні коливання від вибухів поблизу можуть спровокувати раптове обрушення опорних конструкцій. Традиційні методи архітектурно-археологічних обмірів (рулетки, тахеометричні лінійні виміри) є занадто повільними, небезпечними для виконання всередині аварійної споруди та не здатні зафіксувати складну геометрію барокових ліній. [1]

У таких критичних умовах створення високоточного цифрового двійника (Digital Twin) на основі інтеграції наземного лазерного сканування (TLS) та цифрової фотограмметрії з БПЛА є єдиним надійним інструментом порятунку пам'ятки [7,8]. Цифровий двійник дозволить:

Зафіксувати поточний геометричний стан будівлі з міліметровою точністю.

Виявити та математично розрахувати точні значення деформацій, кренів веж та ширину розкриття тріщин у склепіннях.

Створити «цифрову консервацію» об'єкта. У разі фізичного пошкодження або руйнування будівлі внаслідок воєнних дій, наявність точної тривимірної геометричної моделі стане єдиною легітимною основою для проведення науково-реставраційних робіт та повної відбудови пам'ятки в її автентичних формах.

1.2 Порівняльний аналіз архітектурних та конструктивних особливостей Костелу Бернардинів у Гвіздці та Костелу Непорочного Зачаття у Городенці

Стилістична єдність та історико-регіональний контекст об'єктів Покуття

Проведення порівняльного аналізу Костелу Бернардинів у селищі Гвіздець та Костелу Непорочного Зачаття Пресвятої Богородиці в місті Городенка дозволяє виявити закономірності розвитку пізньобарокової архітектури Покуття XVIII століття. Обидві сакральні споруди географічно розташовані в межах одного історичного регіону Івано-Франківської області та виступають головними містобудівними домінантами у структурі забудови своїх населених пунктів. Храми створювалися як ключові духовно-культурні та просвітницькі центри, що фінансувалися за рахунок потужних магнатських родів (зокрема, костел у Городенці зведений за ініціативи Миколи Потоцького).

Попри територіальну та епохальну близькість, об'єкти репрезентують різні концептуальні підходи до реалізації архітектури бароко:

Костел у Городенці є шедевром зрілого європейського бароко, створеним видатним тандемом архітектора Бернарда Меретина та скульптора Іоанна Георга Пінзеля. Простір храму підпорядкований ідеї складної експресивної пластики та високої художньої насиченості.

Костел у Гвіздці має виражений кляшторний (монастирський) характер. Його цінність полягає в автентичності збереження всього архітектурного ансамблю (костел, келії, надбрамна дзвіниця), де кожна будівля інтегрована в єдину замкнену просторову систему.

Композиційно-геометричні та конструктивні відмінності фасадів і веж

З погляду інженерної геометрії та тривимірної фіксації, головні відмінності між спорудами криються в архітектоніці їхніх фасадів та конфігурації вертикальних домінант:

Вежі Костелу в Городенці відзначаються більшою витонченістю та висотністю, що створює значні вертикальні кути нахилу при наземному лазерному скануванні з близьких станцій (Новий Доку... р. 2). У Гвіздці ж вежі мають більш присадкувату, триступеневу ярусну структуру.

Стіни костелу в Городенці мають складнішу криволінійну пластику (Новий Доку... р. 2). Меретин часто використовував хвилясті лінії, увігнуті та випуклі поверхні, що створює динамічний ефект. Костел у Гвіздці за своєю геометрією є більш прямолінійним, проте наявність контрфорсів та прибудованого з північного боку двоповерхового цегляного корпусу келій значно ускладнює геодезичне координування через взаємне перекриття ("затінення") будівельних об'ємів (Новий Доку... р. 5).

Просторово-метрична та геометрична специфікація об'єктів Покуття

Проведення порівняльного аналізу Костелу Бернардинів у селищі Гвіздець та Костелу Непорочного Зачаття Пресвятої Богородиці в місті Городенка має на меті виявлення закономірностей просторової організації та конструктивної логіки пізньобарокових споруд Покуття XVIII століття. З погляду геодезичної фіксації, обидва храми є складними просторовими системами, проте характер їхньої геометрії суттєво різниться за рівнем регулярності, криволінійності та масштабними характеристиками.

Для розробки оптимальної методики наземного лазерного сканування (TLS) та подальшої генерації елементів у середовищі HBIM необхідно провести первинну просторово-метричну класифікацію обох об'єктів (табл. 1.1).

Таблиця 1.1 Просторово-метрична специфікація та базові геометричні характеристики об'єктів

Параметр порівняння	Костел Бернардинів (с-ще Гвіздець)	Костел Непорочного Зачаття (м. Городенка)	Значення для подальшого цифрового моделювання (HBIM)
Планувально-просторова схема	Тринавна базиліка з невеликим трансептом та прибудованим замкненим корпусом келій.	Тринейна базиліка з розвиненим трансептом, вираженою хрестоподібною формою в плані.	Визначає топологію базових стін, осей та сітки колон у середовищі моделювання.
Ступінь регулярності геометрії	Переважно регулярна (прямолінійна) із симетричним розташуванням стін та контрфорсів.	Високий ступінь криволінійності, хвилясті фасади, увігнуто-випуклі поверхні.	Вимагає використання NURBS-поверхонь або складних інструментів профілювання в HBIM.
Характер вертикальних домінант	Дві симетричні триарусні вежі, композиційно інтегровані в тіло головного фасаду.	Дві стрункі, сильно винесені назовні вежі-дзвіниці з розвиненою вертикальною динамікою.	Визначає стратегію побудови станцій сканування та залучення БПЛА для зйомки верхніх ярусів.
Конструктивне гасіння розпору	Зовнішні масивні контрфорси з тильного та бічних боків споруди.	Відсутність зовнішніх контрфорсів; розпір компенсується товщиною стін та внутрішніми пілонами.	Впливає на формування зовнішнього контуру моделі та аналіз розподілу деформацій.

Архітектоніка та геометрія фасадних систем як об'єктів тривимірного координування

Аналіз геометричної структури фасадів є ключовим етапом проектування кроку (щільності) лазерного сканування. Головний фасад Костелу в Городенці, створений Бернардом Меретиним, базується на концепції "рідкого каменю" — стіни мають складний хвилеподібний рельєф, де плоскі елементи практично

відсутні. Тектоніка фасаду насичена глибокими нішами, півколоннами та складними карнизами з великим виносом вперед. З погляду геодезичної зйомки, така геометрія утворює чисельні зони взаємного затінення ("мертві зони").

Натомість головний фасад костелу у Гвіздці має більш площинний характер, де барокова динаміка досягається за рахунок чіткого ярусного членування пілястрами та віконними прорізами складної форми. Проте наявність окремо розташованої надбрамної дзвіниці перед фасадом у Гвіздці створює суттєві перешкоди для прямої видимості з віддалених станцій сканування.

Детальний порівняльний аналіз архітектурно-геометричних елементів фасадів, які підлягають обов'язковій цифровій фіксації, наведено в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 Порівняльний аналіз архітектурно-геометричних елементів фасадів

Конструктивно-архітектурний вузол	Особливості геометрії у Костелі Бернардинів (Гвіздець)	Особливості геометрії у Костелі в Городенці	Вимоги до щільності хмари точок та точності моделювання
Ордерна система та вертикальні елементи	Плоскі пілястри тосканського та коринфського ордерів, прилеглі до площини стіни.	Потужні трьохчетвертні колони, пучки пілястр із глибоким рельєфом капітелей.	Крок сканування фасаду: 3–5 мм. Капітелі колон: до 1–2 мм для фіксації пластики.
Карнизи та між'ярусні тяги	Прямолінійні горизонтальні карнизи з помірним профілем та виносом.	Складні багатопрофільні карнизи з розірваними фронтонами, динамічні вигини.	Необхідність верхніх станцій сканування (з вишок) або БПЛА для зйомки верхніх полиць карнизів.
Віконні та дверні прорізи	Прямокутні та лучкові прорізи з простими лиштвами та сандриками.	Овальні (люкарни), складні барокові прорізи з криволінійними відкосами.	Фіксація внутрішніх кутів відкосів із точністю ± 5 мм для побудови віконних заповнень в НВІМ.
Скульптурне та декоративне оздоблення	Текстові рельєфні таблиці, ніші з геометричним декором.	Масштабні пластичні скульптури І. Г. Пінзеля (втрачені частково), динамічні вазони.	Використання високоточного ручного або ближнього сканування (точність субміліметрова).

Внутрішня структура обох храмів визначається логікою розподілу навантажень від системи склепінь на вертикальні опори. Проте геометричні параметри інтер'єрів вимагають принципово різних підходів до вибору інструментальних засобів зйомки.

Костел у Городенці відзначається колосальним внутрішнім об'ємом, великою висотою центральної нави та широкими прольотами підпружних арок. Склепіння мають циліндричну форму з чисельними розпалубками, які утворюють складні лінії перетину поверхні. Оскільки кути нахилу лазерного променя при скануванні таких високих об'єктів із підлоги стають критично гострими (більше 60° від нормалі), виникає інструментальна похибка за видовження плями лазера, що знижує точність фіксації шелиг склепінь.

В інтер'єрі Костелу у Гвіздці об'єми є більш камерними, проте просторова конфігурація ускладнюється наявністю хорів, складних систем внутрішніх сходів у вежах та примиканням до нави коридорів монастирського корпусу. Хрестові склепіння Гвіздця спираються на масивні пілони, оздоблені спареними пілястрами.

Для систематизації геометричних параметрів інтер'єрів, які впливають на точність створення цифрового двійника, сформовано порівняльну матрицю (табл. 1.3).

Таблиця 1.3 Порівняльна матриця геометричних параметрів інтер'єрів та систем склепінь

Геометричний параметр інтер'єру	Костел Бернардинів (Гвіздець)	Костел Непорочного Зачаття (Городенка)	Вплив на методику геодезичних робіт та хід моделювання
Висота центральної нави (орієнтовна)	Середня (до 14–16 м), відносно доступна для наземних методів.	Висока (понад 20–22 м), значні вертикальні відстані до склепінь.	Вимагає використання сканерів великого радіусу дії та компенсації похибки за кут падіння променя.
Геометрія та тип склепінь	Хрестові склепіння над навою, напівциркульні та коробові з розпалубками.	Потужні циліндричні склепіння з глибокими розпалубками над вікнами.	Моделювання здійснюється через створення сімейств склепінь за заданими радіусами та кривими.

Просторова конфігурація опор	Прямокутні в плані пілони, інтегровані в бічні стіни (пристінні опори).	Потужні окремо розташовані хрещаті пілони, що розділяють нави.	Визначає геометрію внутрішніх замкнутих тахеометричних ходів для зв'язку станцій.
Характер деформацій в геометрії	Поздовжні тріщини в замках склепінь, відхилення стін від вертикалі назовні.	Нерівномірна осадка пілонів, глибокі тріщини в підпружних арках трансепту.	Вимагає суцільного хмароточкового моніторингу для виявлення відхилень від теоретичної форми.

Трансформація архітектурно-геометричних відмінностей у технічні вимоги НВІМ

Проведений детальний аналіз геометричних та конструктивних параметрів дозволяє зробити висновок, що Костел у Городенці та Костел у Гвіздці, попри стилістичну єдність, ставлять перед геодезистом різні технологічні виклики:

– Для Костелу в Городенці головна складність полягає в точній математичній апроксимації криволінійних поверхонь Меретина та унікальної пластики Пінзеля. Тут інформаційне моделювання (НВІМ) фокусується на створенні нестандартних бібліотечних елементів зі складною тривимірною структурою.

– Для Костелу в Гвіздці ключова складність полягає в моделюванні цілісного просторово-інтегрованого ансамблю. Наявність корпусу келій, який утворює замкнений внутрішній дворик (атріум), вимагає побудови геодезичної мережі високої жорсткості. Необхідно пов'язати в єдину систему координат три просторово роз'єднані зони: зовнішні фасади, внутрішній простір храму та внутрішній кляшторний дворик. Особливу увагу в НВІМ-моделі Гвіздця слід приділити геометричному моделюванню вузлів примикання (деформаційних стиків) між аварійними стінами костелу та стінами корпусу келій, оскільки саме в цих зонах фіксуються найбільші взаємні зсуви конструкцій.

Таким чином, детальний аналіз архітектурної метрики підтверджує, що обґрунтування точності геодезичних робіт для Костелу в Гвіздці має базуватися на суворому врахуванні його просторової конфігурації, наявності взаємних

затіненень та критичного інженерно-геометричного стану його конструктивних елементів.

1.3 Воєнні загрози для культурної спадщини Прикарпаття та необхідність створення цифрових двійників

В умовах сучасного стану військових загроз для Прикарпаття головна небезпека для Костелу Бернардинів у селищі Гвіздець полягає не лише у ризику прямого влучання, а в порушенні просторової геометрії опорних конструкцій під дією віддалених динамічних навантажень. Колективні та поодинокі повітряні удари по логістичних вузлах Коломийського району викликають поширення затухаючих, але потужних коливань у ґрунтових масивах. Для капітальної цегляної будівлі XVIII століття, яка вже має критичний рівень зносу, такі коливання трансформуються у незворотні геометричні зсуви.

Специфіка фіксації геометричних параметрів аварійного костелу в умовах воєнних загроз вимагає переходу від класичного опису руйнувань до суворого математичного вимірювання деформацій елементів споруди (табл. 1.4).

Таблиця 1.4 Вплив воєнних чинників на геометричні параметри та просторову форму Костелу Бернардинів

Джерело динамічного навантаження	Конкретна інженерно-геометрична проблема	Конструктивний елемент під загрозою	Геометричний параметр, що підлягає обов'язковій фіксації
Сейсмовібраційна хвиля в ґрунті від детонації	Зміна просторового положення фундаментів, нерівномірне просідання опорних точок.	Пілони нави, фундаменти триярусних веж, масивні контрфорси.	Вертикальне відхилення (ΔZ), вектори зміщення осей у просторі.
Імпульсний надлишковий тиск повітряної хвилі	Зсув тривимірних поверхонь з вертикальної площини, розгортання бічних стін назовні.	Поздовжні стіни головної нави, фасадні стіни корпусу келій.	Крен стін, радіус кривизни деформованих поверхонь, стріла прогину.
Акустичні	Порушення	Хрестові та	Ширина розкриття

коливання та вібрація від роботи ППО	зчеплення елементів мікрогеометрії з несучою основою, розкриття тріщин.	циліндричні склепіння, бароковий пластичний декор, карнизи.	тріщин (Delta W), глибина відшарування рельєфу.
Уламкове та осколкове динамічне ураження	Локальне порушення метричних параметрів зовнішнього контуру будівлі.	Лицьова цегляна кладка фасадів, кутові елементи надбрамної дзвіниці.	Об'ємні втрати матеріалу (Delta V), порушення лінійних контурів.

Критичні геометричні аномалії Костелу в Гвіздці під дією вібраційних навантажень

Механіка руйнування барокових цегляних конструкцій підтверджує, що найбільшу загрозу становить ексцентриситет навантаження, викликаний нахилом висотних домінант. Триярусні вежі головного фасаду костелу у Гвіздці внаслідок багаторічної нерівномірної осадки вже мають первинне відхилення від вертикальної осі (крен). Будь-яка вібрація ґрунту від вибухів зміщує центр ваги веж ще далі від їхньої геометричної осі. Це створює критичні напруження розтягу в місці примикання веж до нави, що геометрично виражається у стрімкому збільшенні ширини розкриття вертикальних тріщин.

Другою критичною точкою є геометричний стан хрестових склепінь. Маючи деформаційні тріщини вздовж замкових каменів, склепіння тримаються лише за рахунок сили тертя та стабільного розпору стін. Повітряна ударна хвиля, створюючи миттєвий тиск на велику площу покрівлі, порушує геометрію арок, змінюючи їхній радіус. Оскільки стіни костелу під дією розпору вже відхилені назовні (ефект «розгортання»), навіть мінімальний додатковий динамічний зсув стіни на кілька міліметрів призведе до того, що арка вийде за межі своєї геометричної стійкості й повністю обрушиться.

Методологічне обґрунтування щільності та точності фіксації параметрів для цифрового двійника

Для того щоб цифровий двійник (Digital Twin) виконував функцію превентивної інженерної консервації, методологія геодезичних робіт повинна базуватися на суворому розрахунку точності фіксації кожного типу геометричних параметрів (табл. 1.5).

Таблиця 1.5 - Технічні вимоги до точності фіксації геометричних параметрів елементів костелу

Геометричний елемент пам'ятки	Метод геометричного опису в моделі НВІМ	Необхідна точність фіксації (СКП, m)	Технічне обґрунтування вимог до точності
Опорна геодезична мережа комплексу	Пункти та марки єдиної координатної просторової основи.	± 1.0 , мм	Базова основа для зв'язку зовнішніх фасадів, інтер'єру та внутрішнього кляшторного дворика.
Крени веж та відхилення стін	Вертикальні площини, вектори просторового нахилу поверхонь.	$\pm 2.0 - 3.0$ мм	Дозволяє математично розрахувати критичний ексцентриситет і попередити обвалення.
Геометрія арок та склепінь	Складні тривимірні криві, NURBS-поверхні, радіуси апроксимації.	± 2.0 мм	Необхідна для фіксації стріли прогину та моделювання поведінки склепіння під навантаженням.
Деформаційні тріщини	Просторові полілінії з параметрами глибини та ширини розкриття.	$\pm 0.5 - 1.0$ мм	Слугує заміною фізичних гіпсових маяків для автоматизованого моніторингу динаміки руйнувань.
Архітектурний декор та карнизи	Високоточні тривимірні об'єкти з деталізованою мікрогеометрією.	$\pm 3.0 - 5.0$ мм	Необхідна для точного відтворення (3D-друку або реставрації) у разі фізичної втрати елемента.

Сучасний етап російсько-української війни сформував безпрецедентні виклики для збереження культурної спадщини України [7]. Івано-Франківська область, попри її географічне розташування в тилу, регулярно стає об'єктом масованих ракетних обстрілів та атак ударних безпілотних літальних апаратів (БПЛА). Для архітектурних пам'яток, які вже перебувають у незадовільному чи напівзруйнованому стані (як-от Костел Бернардинів у с-щі Гвіздець), ці чинники несуть пряму загрозу безповоротної втрати.

Увесь комплекс воєнних загроз для нерухомої культурної спадщини Прикарпаття можна класифікувати за характером та механізмом руйнівної дії на три основні категорії:

Пряме вогневе ураження (Ракетні удари та атаки БПЛА)

Кінетичний та термічний вплив: Попадання крилатих, балістичних ракет або баражуючих боєприпасів типу «Shahed» призводить до миттєвого повного або часткового знищення несучих конструкцій.

Уламкове ураження: Навіть у разі успішної роботи сил ППО, падіння уламків засобів ураження та протиракет завдає значної шкоди. Для Костелу Бернардинів це загрожує знищенням автентичної барокової цегляної кладки фасадів, руйнацією залишків даху та остаточною втратою унікальних фресок і внутрішнього оздоблення XVIII ст.

Динамічний вплив повітряної вибухової хвилі

Критичний стан об'єкта: Костел у Гвіздці є тринавною спорудою зі значним ступенем зносу, деформаціями склепінь та відсутністю надійного консерваційного даху на окремих ділянках.

Механізм руйнування хвилею: Надлишковий тиск у фронті повітряної вибухової хвилі від близького прильоту викликає різке знакозмінне навантаження на стіни. Навіть без прямого влучання, повітряний імпульс здатний призвести до миттєвого обвалу аварійних цегляних склепінь, підпружних арок та залишків фронтонів, які втратили свою конструктивну жорсткість.

Вібраційні та сейсмо-акустичні навантаження (Ключовий фактор деструкції)

Сейсмічна хвиля від вибухів: Детонація бойових частин ракет на відстані сотен метрів від пам'ятки генерує коливання ґрунту. Ці сейсмічні хвилі передаються на фундаменти костелу, викликаючи мікросуви та розкриття вже наявних тріщин у тримальних стінах.

Антропогенна логістична вібрація: В умовах воєнного стану Прикарпаття виконує роль стратегічного логістичного хабу. Інтенсивний рух важкої військової та спеціальної техніки, великогабаритного транспорту автомобільними шляхами загального користування створює постійну низькочастотну вібрацію. Для старовинних фундаментів гвіздецького костелу,

які не розраховані на такі динамічні навантаження, це загрожує нерівномірним осадом і прискореною деструкцією в'язучого матеріалу історичної кладки.

Необхідність створення цифрових двійників (Digital Twins)

Традиційні обмірювальні роботи (із застосуванням рулеток, еккерів та оптичних приладів) не здатні зафіксувати геометрію зруйнованого чи деформованого об'єкта з належною повнотою і точністю, а головне — вимагають багато часу, що в умовах частих повітряних тривог є безпековим ризиком.

Впровадження концепції цифрового двійника на основі технологій лазерного сканування та фотограмметрії є критично необхідним з таких причин:

«Цифрова консервація» (Страховий поліс пам'ятки): Фіксація тривимірної геометрії костелу з міліметровою точністю. Якщо відбудеться критичне руйнування, наявність хмари точок та текстурованої 3D-моделі дозволить виконати абсолютно автентичну реставрацію чи відбудову.

Геодезичний моніторинг деформацій: Цифровий двійник, створений на основі жорсткої планово-висотної геодезичної мережі, слугує нульовою матрицею. Порівнюючи повторні сканування з цією моделлю, можна виявити мікродеформації (нахили стін, провисання арок, розкриття тріщин від вібрацій) на ранніх стадіях.

Аналітика та моделювання руйнувань: Наявність точної геометрії дозволяє інженерам провести комп'ютерне моделювання стійкості конструкцій костелу до вибухових та вібраційних навантажень, щоб розробити ефективні превентивні заходи (встановлення тимчасових підпор, консерваційних кріплень).

НВІМ як інформаційна база: Цифровий двійник інтегрується в систему історичного інформаційного моделювання (НВІМ), де кожен елемент будівлі містить дані про свій поточний технічний стан, матеріал і ступінь аварійності під час війни.

Таким чином, обґрунтування точності геодезичних робіт для створення цифрового двійника є першочерговим науково-виробничим завданням, що забезпечує перехід від пасивного спостереження до активного цифрового захисту та гарантованого збереження Костелу Бернардинів для майбутніх поколінь.

РОЗДІЛ 2

ТЕОРЕТИКО-МЕТОДОЛОГІЧНІ ОСНОВИ ГЕОДЕЗИЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ФІКСАЦІЇ ПАМ'ЯТОК ТА КОНЦЕПЦІЯ НВІМ

Ефективне збереження, реставрація та моніторинг об'єктів архітектурної спадщини в умовах воєнних загроз вимагають переходу від традиційних двовимірних методів фіксації до технологій тривимірного цифрового моделювання. Теоретико-методологічною основою цього процесу є інтеграція сучасних методів інженерної геодезії з концепцією історичного інформаційного моделювання будівель [16] (НВІМ — Heritage Building Information Modeling).

Методологія сучасного геодезичного забезпечення фіксації пам'яток базується на принципах безконтактності, системності та просторової неперервності. Основними джерелами отримання високоточних просторових даних є комбінація технологій наземного лазерного сканування (TLS) та цифрової фотограмметрії з використанням безпілотних літальних апаратів (БПЛА). Лазерне сканування забезпечує формування детальних тривимірних хмар точок (Point Clouds) зі субсантиметровою точністю, фіксуючи реальний геометричний стан споруди, включаючи деформації та руйнування конструкцій. Водночас аерофотозйомка з БПЛА дозволяє усунути «мертві зони» у важкодоступних місцях (покрівля, куполи) та забезпечує фотореалістичну текстурацію моделей. Математичним і координаційним фундаментом для інтеграції цих даних є жорстка планово-висотна геодезична основа, що створюється методами електронної тахеометрії та супутникових GNSS-спостережень[1, 2].

Отриманий масив геодезичних даних слугує першоосновою для реалізації концепції цифрового двійника (Digital Twin) пам'ятки через інструментарій НВІМ. На відміну від стандартного BIM-проектування нового будівництва, де моделювання ведеться за ідеальними геометричними формами, НВІМ базується на принципах зворотного інжинірингу. Процес передбачає параметризацію нерегулярних, деформованих часом та зовнішніми чинниками історичних

поверхонь на основі хмар точок. Отримана NBIM-модель є не просто візуалізацією, а інтелектуальною базою даних, де кожен архітектурний елемент (арка, колона, цегляна кладка) містить семантичну інформацію про його геометричні параметри, матеріал, хронологію побудови та поточний технічний стан.

Важливим теоретичним аспектом є нормативно-технічне обґрунтування точності вимірювальних робіт. Відповідно до чинних ДБН України та міжнародних стандартів (зокрема специфікацій LOD та LOA), фіксація аварійних пам'яток в умовах воєнних загрозах вимагає високих рівнів деталізації (LOD 300–400) та точності (LOA 30–40). Це передбачає забезпечення середньої квадратичної похибки взаємного положення точок у межах ± 5 –15 мм для загальних конструкцій та до ± 2 –3 мм для елементів декору.

Таким чином, синергія геодезичних технологій і концепції NBIM дозволяє створити метрично точний цифровий аналог об'єкта. Він є основою для подальшого обґрунтування точності геодезичних робіт, розробки технологічних схем та проведення деформаційного моніторингу Костелу Бернардинів у с-щі Гвіздець.

2.1 Нормативно-технічні вимоги до точності геодезичних робіт при моделюванні пам'яток архітектури

На сучасному етапі розвитку геодезичної науки ні в Україні, ні на міжнародному рівні немає уніфікованого нормативного акта (на зразок комплексного ДСТУ), який би повною мірою регулював усі метрологічні, технічні та інформаційні процедури цифрової консервації об'єктів культурної спадщини. Зокрема, залишаються нерегламентованими стандарти щодо щільності та точності масивів точок, калібрування фотограмметричних камер, орієнтування знімків та інтеграції різномірної просторової інформації в NBIM-середовища [7]. Ця науково-технічна проблема є фокусом пріоритетних

досліджень Міністерства освіти і науки України, спрямованих на розробку методології геопросторової фіксації пам'яток в умовах воєнних дій, оскільки створення детальних цифрових аналогів є єдиним способом гарантувати їхню автентичну відбудову в разі фізичного ураження.

У світовій практиці відповідність цифрової моделі натурі описує концепція Level of Accuracy (LoA), яка виражає математичну залежність між СКП вимірювань, масштабом даних та геометрією споруди [7]. Вона тісно пов'язана зі стандартами ISO серії 19100 (якість геоданих) та ISO 19650 (інформаційне моделювання) [15, 16, 17]. Проте аналіз наукової літератури свідчить, що класичне трактування LoA має суто описовий характер і часто ігнорує фундаментальні закони інженерної геодезії. У багатьох працях виникає методологічна суперечність: припускається, що при переході від загальних планів до дрібного декору точність моделі самостійно підвищується (наприклад, з ± 50 мм до ± 2 мм). Це суперечить математичним законам накопичення та поширення похибок, де кожна наступна (нижча) ступінь вимірювань завжди є менш точною за вихідну (вищу) основу.

Порушення цього принципу в цифровому моделюванні призводить до того, що високодеталізовані фрагменти декору виявляються метрично відірваними від глобальної геометричної схеми будівлі. На практиці це унеможливорює використання моделі для деформаційного моніторингу в умовах воєнного стану, оскільки локальні похибки зшивки масивів точок лазерного сканування та фотограмметрії маскують реальні зсуви тримальних конструкцій, викликані динамічними навантаженнями.

Математичне обґрунтування ієрархічної структури похибок

Для усунення цієї суперечності та забезпечення метричної цілісності цифрового двійника Костелу Бернардинів, у роботі обґрунтовано ієрархічну модель точності, що базується на принципах математичної статистики та класичної геодезичної ієрархії (від вищого до нижчого). Математичне

поширення похибки при переході між етапами описується загальною формулою результуючої середньої квадратичної помилки моделі [7] (m_{mod}):

$$m_{mod} = \sqrt{m_{gcp}^2 + m_{reg}^2 + m_{scam}^2 + m_{vfx}^2} \quad (2.1)$$

Де:

m_{gcp}^2 - СКП побудови планово-висотного геодезичного обґрунтування (I ступінь)

m_{reg}^2 - охибка взаємного суміщення (реєстрації) сканів та фотограмметричних блоків (II ступінь)

m_{scam}^2 - інструментальна похибка самого лазерного сканера чи камери БПЛА на фіксованій відстані

m_{vfx}^2 - похибка апроксимації (абразивності) при генерації параметричних поверхонь НВІМ у середовищі проектування (III ступінь)

Жорстке обмеження похибки першого ступеня ($m_{gcp}^2 \leq \pm 3\text{мм}$) гарантує, що сумарна СКП архітектурної моделі не вийде за нормативні межі $\pm 10...20$ мм, визначені ДБН А.2.2-14:2016 [9] для масштабів реставраційного проектування 1:50. Це створює надійний фундамент для верифікації руйнувань та подальшого відновлення об'єкта.

З огляду на зазначене, у поточному дослідженні обґрунтовується зміна класичного розуміння концепції Level of Accuracy (LoA) на багаторівневу структуру розподілу похибок, яка базується на методах математичної статистики та реалізує такі засади [7]:

- Домінантність максимальної точності планово-висотної геодезичної основи як базового координаційного каркаса пам'ятки.
- Наскрізний моніторинг накопичення та поширення похибок на кожному окремому етапі цифрового моделювання.
- Системне узгодження лінійної точності вимірів та просторової роздільної здатності (щільності) знімальних масивів.
- Уніфікація та інтеграція гетерогенних просторових даних у єдиній державній геодезичній системі координат.

Костел Святого Антонія Падуанського та монастир бернардинів у Гвіздці — це цегляна барокова пам'ятка XVIII століття, архітектоніка якої зазнала тривалої деструкції та новітніх воєнних вібраційних навантажень. Конструктивна специфіка об'єкта та безпекові фактори воєнного стану формують особливі вимоги до кожного з трьох концептуальних шарів точності:

I рівень — базове геодезичне обґрунтування. Цей сегмент виконує роль фундаменту для побудови всієї цифрової екосистеми споруди. Він реалізується через розгортання опорного координатного каркаса (GCP) із залученням супутникових GNSS-технологій та прецизійних тахеометричних вимірів. Нормативний допуск для цього етапу обмежений значеннями ± 3 мм. Саме цей каркас забезпечує просторову локалізацію об'єкта в єдиній державній геодезичній системі координат і виступає матрицею для узгодження всіх подальших вимірювальних процедур [7].

II рівень — знімальна основа (хмара точок). На зазначеному етапі здійснюється масовий збір просторових даних методами наземного лазерного сканування та цифрової фотограмметрії, які жорстко взаємопов'язуються з геодезичними пунктами вищого (I) рівня. Ключовою вимогою тут є мінімізація похибок взаємного суміщення (реєстрації) окремих знімальних сесій. Граничне відхилення на цьому кроці не повинно перевищувати ± 10 мм, що дозволяє сформувати безпомилкову геометричну оболонку для майбутнього моделювання [7].

III рівень — об'єктно-компонентний шар (архітектурна модель). Даний етап орієнтований на параметричне відтворення просторової форми тримальних та огорожувальних елементів будівлі (включаючи стіни, міжповерхові перекриття, дверні та віконні прорізи) [7]. Спираючись на вимоги ДБН А.2.2-14:2016 [9], допустима середня квадратична похибка моделювання встановлюється в межах ± 10 – 20 мм, що повністю задовольняє критерії розробки реставраційної документації у масштабі 1:50. [1]

IV рівень — територіально-інтеграційний контур (ГІС / топографічний базис). Цей пласт забезпечує коректне позиціонування пам'ятки у

навколишньому ландшафтно-містобудівному середовищі [7]. Відповідно до міжнародного стандарту ISO 19157:2013, ліміт похибки для цього рівня варіюється від ± 100 до ± 250 мм, що еквівалентно метричним параметрам великомасштабного топографічного знімання 1:500 [15]. Нижчі вимоги до точності тут обумовлені суто оглядовою просторово-картографічною функцією рівня. [1]

Таким чином, розроблена метрологічна ієрархія демонструє чітку лінійну прогресію: від субміліметрових значень опорної геодезичної основи до дециметрових меж територіального ГІС-контексту.

Таблиця 2.1 - Ієрархічна система точності для побудови цифрових двійників архітектурної спадщини

Ступінь точності	Рівень (назва)	Основні методи	СКП (RMSE)	Нормативне підґрунтя	Функціональне призначення
I ступінь	Геодезичне обґрунтування	Тахеометрія, GNSS (високоточна мережа GCP)	$\pm 1\text{--}3$ мм	ДСТУ-Н Б В.1.2-18:2016	База для системи координат, моніторинг деформацій
II ступінь	Знімальна мережа (хмара точок)	Лазерне сканування (TLS), Фотограмметрія	$\pm 5\text{--}10$ мм	ГКНТА 2.04-02-2002	Геометрична основа цифрової моделі
III ступінь	Об'єктний рівень (архітектурний)	Моделювання конструкцій, HBIM	$\pm 10\text{--}20$ мм	ДБН А.2.2-14:2016, ISO 19650-1:2018,	Реставраційні проекти, креслення фасадів та планів
IV ступінь	Територіальний рівень	ГІС, Картографія, Топографічна основа	$\pm 100\text{--}250$ мм	ISO 19157:2013	Просторова прив'язка в міському середовищі

Створення актуального інструментарію електронної фіксації вимагає узгодження положень вітчизняних технічних стандартів із глобальними засадами захисту історичних надбань [10, 14]. Наприклад, ДСТУ Б В.2.1-30:2014 переважно регламентує параметри конструктивної міцності та експлуатаційної стабільності будівель. Натомість світові директиви, серед яких

ключовими є настанови UNESCO та концептуальні положення про збереження комп'ютеризованої спадщини [14], фокусуються на утриманні смислової, хронологічної та автентичної автентичності об'єктів [7].

Синтез цих концептів забезпечує трансформацію суто технічного вектора у комплексну систему цифрової консервації. За такого підходу міра похибки визначає не тільки суто метрологічний показник, але й виступає критерієм істинності віртуального відтворення споруди. Зважаючи на вказані концепції, теоретичну схему доцільно згрупувати у вигляді трьох скоординованих методологічних шарів, які впроваджують субординацію точності:

Координаційний каркас («геодезичний скелет»). Цей базовий пласт створюється шляхом інтеграції прецизійних опорних та знімальних мереж, що відповідають першому та другому ієрархічним рівням точності. Він виступає гарантом метричної автентичності та внутрішньої узгодженості цифрового аналога споруди. Головне призначення каркаса полягає у жорсткому позиціонуванні пам'ятки в загальнодержавній системі просторових координат та висот [7]. Такий підхід дозволяє безпосередньо імпортувати вимірювальні масиви до релевантних геопросторових баз даних, ГІС-платформ та архітектурних середовищ без додаткових математичних перерахунків чи редукцій. Розгорнута геодезична база має довгостроковий потенціал використання. Вона слугує незмінною основою для деформаційного моніторингу, періодичних інженерних обстежень, реставраційних втручань та консерваційних заходів протягом усього життєвого циклу пам'ятки.

Просторова матриця («метрична оболонка»). Вона є центральною складовою цифрового двійника, яка відповідає за вірогідну регенерацію форми споруди на третьому (об'єктному) рівні моделювання. Контур формується на базі скоординованих даних наземного лазерного сканування та цифрової фотограмметрії, які забезпечують максимальну дискретну деталізацію поверхонь [7]. Ця оболонка трансформує розрізнені просторові дані у вимірювану цифрову систему, на основі якої формуються ортогональні креслення, архітектурні розрізи, фасади, обчислюються площі та об'єми

конструкцій, а також генеруються параметричні HBIM-моделі. Прецизійні масиви хмар точок фіксують фактичний статус і дефекти об'єкта безпосередньо на момент зйомки [7]. Це дозволяє здійснювати геометричний аналіз тріщин, кренів та структурних пошкоджень. Крім того, метрична оболонка постачає геометричну основу для інформаційного моделювання, створення цифрових двійників та подальшого аналізу.

Інформаційно-просторовий контур (HBIM–GIS). Даний рівень виконує функцію інтеграційного простору, який поєднує високоточну геометрію будівлі з її семантичним (атрибутивним) наповненням та географічним контекстом. Завдяки синергії інформаційного моделювання історичної спадщини та просторових можливостей ГІС (що відповідає четвертому рівню точності), цифровий двійник перетворюється на дієвий аналітичний інструмент для адміністрування, моніторингу та захисту пам'ятки [7]. На практиці цей контур об'єднує просторові, метричні та описові характеристики споруди в єдину захищену базу даних, спрощуючи взаємодію між геодезистами, архітекторами та органами охорони культурної спадщини.

2.2 Концепція цифрового двійника (Digital Twin) та технології історичного інформаційного моделювання (HBIM)

Сучасна методологія збереження та фіксації архітектурних пам'яток потребує якісної модернізації: замість статичних тривимірних візуалізацій пріоритетом стає розробка динамічних цифрових двійників (Digital Twins) . Звичайна 3D-модель (як-от полігональна сітка Mesh) фіксує лише поверхневі геометричні контури та колір об'єкта, не маючи внутрішнього інженерно-атрибутивного змісту. Натомість цифровий двійник архітектурного комплексу є багаторівневою інтелектуальною системою. Вона не просто копіює просторову форму, а відображає фактичний конструктивний, фізичний та деформаційний стан споруди через дискретні цикли геодезичних вимірювань.

В умовах воєнних ризиків для культурної спадщини Прикарпаття цифровий двійник виконує функцію метрично обґрунтованої системи безпеки. Він базується на раніше визначеному координаційному каркасі («геодезичному скелеті» I–II ступенів точності), який забезпечує жорсткість геометрії та ліквідує внутрішні систематичні спотворення. Такий двійник стає «страховою матрицею» для автентичного відновлення Костелу Бернардинів у с-щі Гвіздець у разі фізичного ураження, а також виступає інструментом моніторингу стабільності аварійних конструкцій під впливом динамічних воєнних навантажень (вибухових хвиль, логістичних вібрацій).

Технологічна специфіка HBIM як інструменту реверс-інжинірингу

Інформаційною платформою для втілення цифрового двійника історичної будівлі є технологія HBIM (Heritage Building Information Modeling), що адаптує класичні BIM-інструменти під потреби історичного середовища. Головна особливість HBIM полягає у реалізації методу зворотного проектування (реверс-інжинірингу): модель будується не за ідеальними проектними лініями «з нуля», а регенерується за фактичними просторовими даними, отриманими в натурі.

Для Костелу у Гвіздці, що має складну барокову архітектуру та значний ступінь деградації кладки, HBIM виступає як просторова матриця («метрична оболонка» III ступеня точності). Завдяки інтеграції наземного лазерного сканування та БПЛА-фотограмметрії, технологія HBIM дозволяє відійти від моделювання прямих кутів і створювати унікальні параметричні об'єкти (деформовані часом хрестові склепіння, крени триярусних веж, пошкоджені підпружні арки), які точно повторюють реальні пошкодження. При цьому витримується задекларований ліміт середнього відхилення поверхні HBIM-моделі від вихідної хмари точок у межах ± 5 мм, що гарантує високу точність обмірного матеріалу.

Семантична структура та інформаційно-просторовий контур моделі

Фундаментальною цінністю НВІМ є поєднання просторового каркаса з атрибутивним наповненням, де кожен елемент є точкою доступу до інтегрованої бази даних. Будь-який параметризований конструктивний елемент гвіздецького костелу (фрагмент стіни з контрфорсом, елемент колони чи карниза) містить семантичну інформацію:

- Техніко-петрографічні параметри: автентичні будівельні матеріали, товщина історичної цегли, характеристики розчину;
- Хронологічний статус: період зведення, етапи перебудов чи руйнувань [1];
- Інженерно-деформаційні показники: вектори зафіксованих тахеометром нахилів, глибина розкриття тріщин, амплітуда коливань конструкцій під впливом низькочастотних вібрацій.

Ця семантична інформація безпосередньо трансформує модель у інформаційно-просторовий контур (НВІМ–GIS / IV ступінь точності). Поєднання інженерних даних НВІМ із територіальними можливостями геоінформаційних систем (ГІС) дозволяє вийти на дециметровий рівень просторового аналізу, де оцінюється взаємодія пам'ятки з навколишнім середовищем селища Гвіздець, розраховуються зони безпеки та симулюються ризики поширення вибухових хвиль від потенційних воєнних загроз .

Функціональна взаємодія рівнів точності та НВІМ

Для функціонування цифрового двійника в умовах воєнного стану, технологія НВІМ інтегрується у задекларовану ієрархію точності через три цільові рівні:

Рівень геометричної консервації: створення "метричної оболонки" (LOD 300–400) для фіксації пластики фасадів, барокових вазонів та залишків інтер'єрного живопису.

Рівень інженерно-деформаційного аналізу: використання координатного каркаса "геодезичного скелета" для постійного порівняння хмар точок, що дозволяє виявити мікрозсуви стін на ранніх стадіях.

Рівень територіального моніторингу (HBIM–GIS): картографічне позиціонування об'єкта для оборонного обліку, прорахунку логістики та планування превентивних консерваційних заходів.

Таким чином, концепція цифрового двійника та технологія HBIM не суперечать, а логічно розкривають і підтверджують чотирирівневу систему точності, перетворюючи геодезичні виміри на єдиний інформаційно-метричний простір для гарантованого збереження Костелу Бернардинів.

РОЗДІЛ 3

ОБҐРУНТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ СХЕМА СТВОРЕННЯ ЦИФРОВОГО ДВІЙНИКА КОСТЕЛУ БЕРНАРДИНІВ

3.1 Аналіз сучасних геодезичних технологій для цифрової документації об'єктів культурної спадщини

Процес тривимірної фіксації унікальних історико-архітектурних об'єктів, що мають значні конструктивні пошкодження та перебувають під впливом військово-техногенних факторів, вимагає відмови від спрощених одновимірних обмірів [11]. Задля формування достовірного цифрового аналога дзвонів вежі Бернардинського монастиря у с-щі Гвіздець було впроваджено інтегровану методику просторового збору даних. Ця система базується на синергії високоточних топографічних вишукувань, наземного дистанційного сканування (TLS) та автоматизованої комп'ютерної фотограмметрії.

До початку компіляції та узгодження масивів інформації, отриманих за допомогою лазерного далекоміра та фотограмметричного оброблення цифрових знімків, було проведено детальний аудит метрологічних факторів, які безпосередньо зумовлюють геометричну сумісність цих гетерогенних даних. У процесі аналізу просторових хмар точок пріоритетну увагу було приділено трьом ключовим дескрипторам:

- щільності (густоті) розподілу точок;
- метричній відтворюваності та лінійній точності;
- наявності колірних каналів (RGB-атрибутів).

Показник щільності безпосередньо корелює із просторовою роздільною здатністю знімального процесу і відображає усереднену кількість просторових відліків на одиницю площі досліджуваної поверхні споруди. При цьому фундаментальне значення має рівномірність цього розподілу, оскільки вона гарантує ідентичний рівень деталізації в усіх геометричних сегментах цифрового двійника — як при побудові ортофотопланів фасадів, так і при

генерації твердотільних тривимірних елементів. Критерії загальної якості вимірів інтегрують два параметри: достовірність (міру наближення вимірної координати до її істинного значення) та стабільну відтворюваність (сталість просторових координат при повторних циклах зйомки та математичної обробки). Високий індекс відтворюваності є базовим критерієм для утримання геометричної незмінності тривимірних даних на всіх камеральних етапах обчислень. Додатково колірні RGB-атрибути суттєво розширюють інформативність моделі, уможливаючи точну візуальну та спектральну ідентифікацію будівельних матеріалів під час реставраційного та інженерного оцінювання.

Критичним чинником для коректного злиття лазерних та фотограмметричних масивів даних виступає взаємне узгодження їхніх допусків точності. Граничні ліміти похибок диктуються рівнем складності та архітектурної заплутаності пам'ятки. Якщо один із наборів даних не задовольняє встановлений нормативний стандарт, їхнє сумісне опрацювання стає математично неможливим. Ба більше, індикатори точності й прецизійності обох знімальних систем мають бути зіставними, адже диспропорція у величинах помилок неминуче трансформується у просторові викривлення та систематичні зсуви при взаємній реєстрації хмар точок та побудові підсумкової НВІМ-моделі.

Для практичної перевірки сумісності зазначених технологій було реалізовано серію експериментальних випробувань на базі ідентичного тестового архітектурного елемента — фундаменту дзвіниці храму. Зйомка цього фрагмента була виконана обома методами з подальшим чисельним зіставленням результатів. Для забезпечення найвищої достовірності та валідації лінійних вимірів як еталон було задіяно високоточний роботизований електронний тахеометр Leica TS30 (кутова похибка — 1", лінійна точність — 1 мм + 1.5 ppm). На зовнішніх площинах будівлі було розгорнуто систему просторових світловідбиваючих міток, розміщених на різних висотних рівнях для повного охоплення досліджуваної зони в трьох вимірних осях. Отримані за

допомогою тахеометра просторові координати цих маркерів утворили базис для порівняння даних лазерного сканування та фотограмметрії [8].

Фотограмметричний блок формувався за допомогою камери Canon EOS 5D Mark III (41 знімок, фокусна відстань 35 мм, роздільна здатність 5760x3840 пікселів, розмір пікселя 0.0064 мм, просторова роздільна здатність на місцевості GSD — 1.6 мм/піксель) за умов стабільного освітлення та з перекриттям кадрів 80% (поздовжнє) і 70% (поперечне) [8]. Параметри внутрішньої орієнтації обчислювалися в автоматичному режимі під час камерального зрівнювання в софті Agisoft PhotoScan (Metashape). Контрольний масив даних було отримано фазовим лазерним сканером Leica HDS 7000 з інструментальною точністю до 1 мм (обсяг хмари — 123 млн точок, рівень шуму — 0.4 мм на відстані 10 м). Процедура геореференсування хмари точок виконувалася за 4 чорно-білими цілями та 8 кодованими мішенями, де середня похибка прив'язки склала всього 2 мм [8]. Середнє лінійне розходження між тахеометричними координатами мішеней та їхнім положенням у точковій хмарі лазерного сканера зафіксовано на рівні 0.001 м (1 мм), що підтверджує еталонну якість геопросторової основи.

У програмному комплексі Agisoft PhotoScan (Metashape) виконувалося просторове вирівнювання знімків, їхня прив'язка до локального координаційного каркаса за маркерами, а також побудова щільної хмари точок з виділенням частини маркерів як незалежних контрольних одиниць. Для оцінки впливу маркерів та алгоритмів внутрішньої оптимізації було реалізовано три варіанти тестування:

Випробування №1: побудова тривимірної моделі в автоматичному режимі без використання опорних орієнтирів;

Випробування №2: моделювання із залученням рельєфних цілей (маркерів);

Випробування №3: моделювання з використанням рельєфних цілей та подальшою математичною оптимізацією геометрії блоку зображень.

Математичний аналіз результатів (див. Таблицю 3.1) продемонстрував, що інтеграція опорних точок та виконання процедури внутрішньої корекції камери радикально підвищують точність взаємного просторового суміщення фотограмметричного масиву та хмари точок TLS. Середнє лінійне розходження координат реперних точок після оптимізації склало менше 2 мм, що свідчить про високу конвергенцію та збіжність двох незалежних підходів [8].

Таблиця 3.1 Аналіз даних, що були оброблені різними способами

№	Кількість фото	Оптимізація	СКП (м)	Реєстрація (кількість цілей)	Контрольні точки	СКПП (м)	δ_{xyz} (м)
1	41	ні	—	9	4	0.000925	0.000480
2	41	ні	0.145	9	4	0.000876	0.000415
3	41	так	0.145	9	4	0.000876	0.000415

Дослідження у програмному пакеті CloudCompare за допомогою Евклідової метрики дозволило оцінити точність відтворення конфігурації поверхонь у тривимірному континуумі безпосередньо на «сирих» хмарах точок, нівелюючи систематичні помилки подальших етапів тріангуляції чи інтерполяції. Результати обчислень показали, що понад 85% просторових точок демонструють взаємне розходження в межах ≤ 2 мм, а максимальні відхилення на крайових периферійних ділянках не перевищують 5–6... мм [8].

Таким чином, комбінація прецизійного наземного сканування та автоматизованої фотограмметрії забезпечує формування єдиного, метрично однорідного тривимірного масиву геопросторових відомостей. Отримана точність повністю відповідає жорстким критеріям архітектурно-обмірних робіт у масштабах 1:50 та 1:20 і є надійною основою для вирішення завдань реставраційного проектування [6, 9], деформаційного моніторингу та інженерних розрахунків стійкості конструкцій Костелу Бернардинів у с-щі Гвіздець методом скінченних елементів (FEM) в умовах воєнних загроз [8].

3.2 Технологічні особливості наземного лазерного сканування при створенні просторових хмар точок

Процес тривимірної фіксації просторових параметрів дзвонової вежі Костелу Бернардинів у с-щі Гвіздець базувався на комплексному інженерно-геодезичному підході. Цей метод дозволив інтегрувати традиційні топографічні вишукування, цифрову фотограмметрію та сучасне лазерне сканування (TLS) в єдину аналітичну систему. Завдяки такій синергії вдалося забезпечити всебічний збір просторових даних та успішно вирішити завдання, обумовлені заплутаною бароковою архітектонікою та аварійним станом об'єкта.

Стартовим етапом польових робіт стало проектування та розгортання жорсткої планово-висотної топографічної основи, яка утворила загальну систему відліку для координатної прив'язки та орієнтування всіх подальших знімальних масивів. Мережа будувалася за допомогою роботизованого електронного тахеометра високого класу точності Leica TS30 (кутова похибка вимірів — 1", лінійна похибка — 1 мм + 1.5 ppm). На об'єкті було закріплено 21 опорний пункт, розподілений таким чином [8]:

- 5 зовнішніх пунктів: локалізовані навколо будівлі для геореференсування фасадів та тривалого деформаційного моніторингу зовнішніх конструкцій;
- 16 внутрішніх пунктів: інтегровані всередину вежі на різних висотних рівнях — від підвальних приміщень (крипт) до верхнього оглядового ярусу.

Із пунктів створеної планово-висотної мережі методом прямої засічки визначено просторові координати 95 контрольних маркерів (цілей), які слугували опорною базою для координатної прив'язки сканів та фотограмметричних блоків. Збір просторових даних у внутрішніх галереях та в нижньому наземному контурі екстер'єру реалізовувався за усталеною геодезичною методикою без значних ускладнень [8]. Натомість головна інженерно-технічна складність виникла під час фіксації горішніх ярусів

дзвіниці, зокрема її купольної завершальної частини та декоративного оздоблення ротонди, де критично важливим завданням було безпечне й геометрично вивірене позиціонування сканувального інструмента [8]. Для покриття «сліпих зон» на великій висоті безпосередньо перед головним фасадом вежі було закладено додаткову наземну станцію, координати якої визначили методом зворотної геодезичної засічки від пунктів базової мережі.

Для суцільного накопичення просторових масивів було задіяно високошвидкісний лазерний далекомір Leica HDS 7000, який функціонує за принципом фазового зсуву та належить до першого класу лазерної безпеки. Діапазон дії приладу становить від 0.3 до 187 метрів при круговому охопленні простору (360° у горизонтальній площині та 320° у вертикальній), що дозволяє виконувати всеохоплююче документування великогабаритних інженерних споруд. Швидкість збору даних сягає 1 мільйона точок на секунду, забезпечуючи формування надщільного масиву з просторовою роздільною здатністю 3–5 мм на відстані 10 метрів від приладу. Підсумкова точність вимірювань залежала від сукупності зовнішніх факторів: робочої дистанції, кута падіння променя на стіни, відбивної здатності історичної цегли та інтенсивності навколишнього освітлення [8].

Аби повністю зафіксувати геометрію вежі та уникнути пропусків даних, у процесі польових робіт було виконано 50 сканувань, які розподілилися за такими напрямками):

- 15 зовнішніх станцій: з яких 9 виконувалися безпосередньо з рівня денної поверхні ґрунту, а 6 — з відкритих балконів і терас розташованих поруч будівель задля фіксації архітектурних елементів середнього та верхнього ярусів;
- 23 внутрішні станції: орієнтовані на покриття внутрішнього простору нави, ризниці та ярусу розташування дзвонів;
- 12 додаткових станцій: сфокусовані на зйомці світлового ліхтаря та купольного завершення для деталізації важкодоступних конструкцій горішньої секції.

Камеральний аналіз зібраного матеріалу показав значну варіативність щільності хмари точок між внутрішніми та зовнішніми площинами будівлі. В інтер'єрі зафіксовано стабільний просторовий крок точок на рівні ~ 3 мм при середній робочій дистанції 4.5 м, що обумовлено замкнутістю приміщень та незмінним віддаленням приладу від стін [8]. Така щільність дозволила сформувати прецизійну модель внутрішніх перегородок та хрестових склепінь, яка повністю придатна для побудови архітектурних профілів, розрізів та розрахунку тримальної здатності споруди (див. Рисунок 3.1).

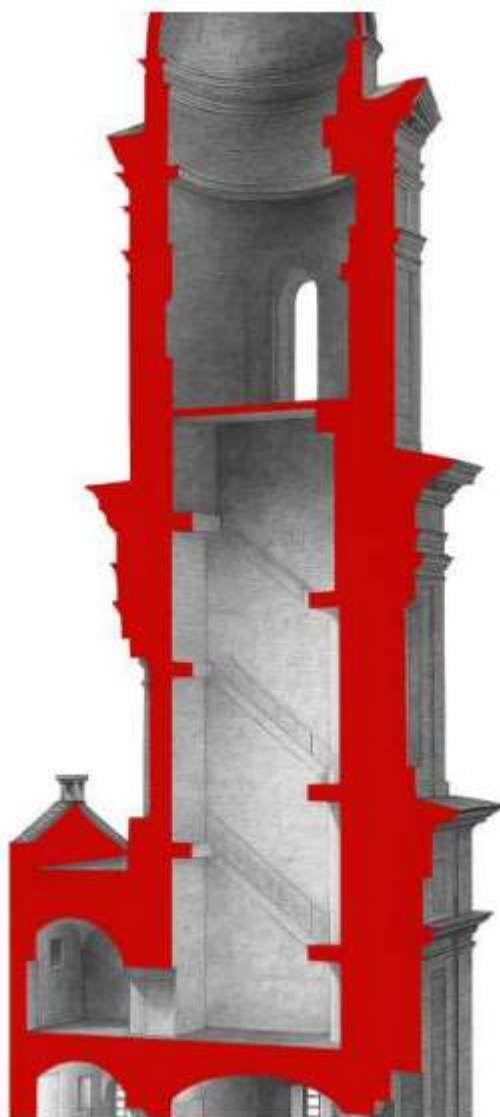


Рисунок 3.1 - Формування та обробка тривимірних хмар точок внутрішнього простору й зовнішніх поверхонь об'єкта

Натомість при скануванні зовнішніх фасадів з наземних станцій, розташованих біля підніжжя 38-метрової вежі, щільність точкового покриття падала прямо пропорційно збільшенню висоти. Це є характерною рисою фазозсувних панорамних систем, де насиченість просторової інформації зменшується з віддаленням від об'єкта. Крім того, на високих ярусах лазерний промінь потрапляв на вертикальні стіни під надто гострими кутами падіння. Це призводило до геометричного розтягування лазерної плями та, як наслідок, суттєвого зниження точності визначення просторових координат точок на периферійних ділянках [8].

З метою нівелювання вказаних похибок та усунення «сліпих плям» було прийнято технологічне рішення встановити сканер на найвищому доступному балконі вежі безпосередньо навколо ротонди. Це дозволило зафіксувати аркові отвори, колонади та отримати метричні дані про купол. Проте ця фаза робіт виявилася найбільш критичною з погляду організації праці та техніки безпеки. Майданчик на висоті близько 38 метрів мав обмежену квадратну основу площею 10 м² (при діаметрі ротонди ~4 м) та був позбавлений будь-яких захисних огорожень чи бар'єрів, що ускладнювало транспортування й фіксацію обладнання в нерухомому стані [8].

Додатково ситуація ускладнювалася наявністю тимчасових сталевих та дерев'яних підпор, які звели після надзвичайних пошкоджень вежі для утримання сферичних елементів купола (див. Рисунок 5). Металеві трубчасті риштування суттєво обмежували корисну площу майданчика, перешкоджаючи коректному центруванню штатива. Через дзеркальне відбиття лазерного променя від гладких металевих площин риштувань частина відсканованих даних була забруднена сторонніми шумами. У кутових зонах тераси металеві труби повністю перекривали видимість для оптики далекоміра, спричинивши локальні пропуски (тіні) архітектурних елементів у первинних точкових масивах. Гвинтові сходи на найвищу терасу купола виявилися аварійними та хиткими, а вхід до них заблокувала дерев'яна опорна структура, що унеможливило використання цієї точки як станції сканування.

Камеральна обробка та зшивка лазерних масивів виконувалася у спеціалізованому програмному забезпеченні. Сумарна база даних TLS налічувала 2.3 мільярда точок, яку для оптимізації обчислень розділили на два функціональні блоки:

Внутрішній блок: ~1.5 мільярда точок, що детально описують інтер'єрні простори;

Зовнішній блок: ~800 мільйонів точок, що покривають нижні та середні яруси фасадів.

Процедура камерального орієнтування та реєстрації хмар точок базувалася на координатах еталонних мішеней планово-висотної основи (р. 27). Після виконання взаємного зрівнювання масивів було проведено трудомісткий етап фільтрації шумів, усунення геометричних дублікатів та потипового поштучного видалення точок металевого риштування, які перекривали архітектурні деталі фасаду. Середнє розходження між координатами контрольних мішеней у тахеометричній мережі та їхнім положенням у зшитій хмарі точок склало 0.001 м (1 мм).

Попри значні ускладнення при зйомці на висоті 38 метрів, отриманий масив наземного лазерного сканування забезпечив еталонну точність і лінійну достовірність геометричних параметрів споруди. Він утворив жорсткий внутрішній геометричний каркас цифрового двійника пам'ятки та виступив основою для подальшого інтегрування з фотограмметричними масивами.

3.3 Алгоритми автоматизованої фотограмметрії в процесах тривимірної цифрової репрезентації споруд

Експлуатація знімальних комплексів дистанційного зондування на базі безпілотних літальних апаратів (БПЛА) виявилася високоефективним інженерним рішенням для завершення детального обстеження архітектурного комплексу. Залучення аерофотознімальних методів дозволило нівелювати низку ускладнень, які супроводжували процес наземного лазерного сканування

(TLS), зокрема обмежену геометричну видимість горішніх елементів споруди та екранування стін металевими трубчастими риштуваннями. Ключовою перевагою даного підходу стало скасування потреби у використанні великогабаритних підйомних механізмів чи спеціалізованих будівельних вишок, що суттєво прискорило темпи польових вишукувань та оптимізувало бюджет проекту [8].

На відміну від важких кранів, які не здатні забезпечити стабільну фіксацію оптичної осі камери під потрібним ракурсом, малогабаритний безпілотник дозволив вільно маневрувати у стесненому повітряному просторі між металевими трубами та стінами вежі. Це уможливлювало збір серійних кадрів під різноманітними кутами нахилу, охоплюючи зони, недосяжні для наземних приладів, і дозволило забезпечити суцільну метричну фіксацію складної геометрії купола, ротонди та ліхтаря.

Аерознімальні процедури виконувалися за допомогою мультироторного квадрокоптера DJI Phantom 4 Pro, що оснащений камерою з однією матрицею CMOS роздільною здатністю 20 мегапікселів. Вибір платформи з чотирма гвинтами та рамою хрестоподібної форми обумовлений вираженою вертикальною орієнтацією будівлі, щільним плануванням історичного центру селища Гвіздець та наявністю різновисотних перешкод. Апарат обладнаний системою гіроскопічної стабілізації та телеметричними модулями — GPS-приймачем і барометричним висотоміром. Тривалість однієї польотної сесії варіювалася в межах 5–15 хвилин залежно від маси корисного вантажу та ємності літій-полімерних батарей (16 В, 4.0 А·год) [8].

Для зйомки фасадів додатково застосовували дзеркальний цифровий апарат Canon EOS 650D (APS-матриця 18 Мп, фізичні габарити 22.3×14.9 мм, об'єктив із фіксованою фокусною відстанню 18 мм), закріплений на керованій стабілізованій підвісці з можливістю зміни кута нахилу оптики на 90 градусів — від горизонтального до зенітного (прямо вниз). Польотні роботи виконувалися екіпажем у складі пілота та фотограмметриста, який здійснював безперервний моніторинг знімального процесу за допомогою відеотрансляції в

реальному часі, оперативно контролюючи композицію, зміну висоти польоту, ступінь накладання кадрів та обраний ракурс [8].

Базисом для успішної реалізації польотного завдання стала розробка просторового сценарію руху БПЛА з чітким регламентуванням висоти, маршруту, швидкості та налаштувань експозиції. Головна мета полягала у досягненні 100% покриття фасадних поверхонь при мінімізації надлишкових кадрів. Зйомка проводилася на фіксованій відстані близько 8 метрів від стін при діафрагмі $f/9$ та чутливості ISO 400 (розмір знімка — 5184×3456 пікселів). Розрахункова просторова роздільна здатність на місцевості (GSD) склала 3 мм на піксель. На кожній із чотирьох граней вежі виконувалося три паралельні вертикальні серії знімків, які підсилювалися двома похилими смугами на кутових стиках фасадів [8]. Для побудови замкнутої тривимірної моделі квадрокоптер виконав три повні кругові обльоти по 360-градусному маршруту навколо будівлі (див. Рисунок 3.2).

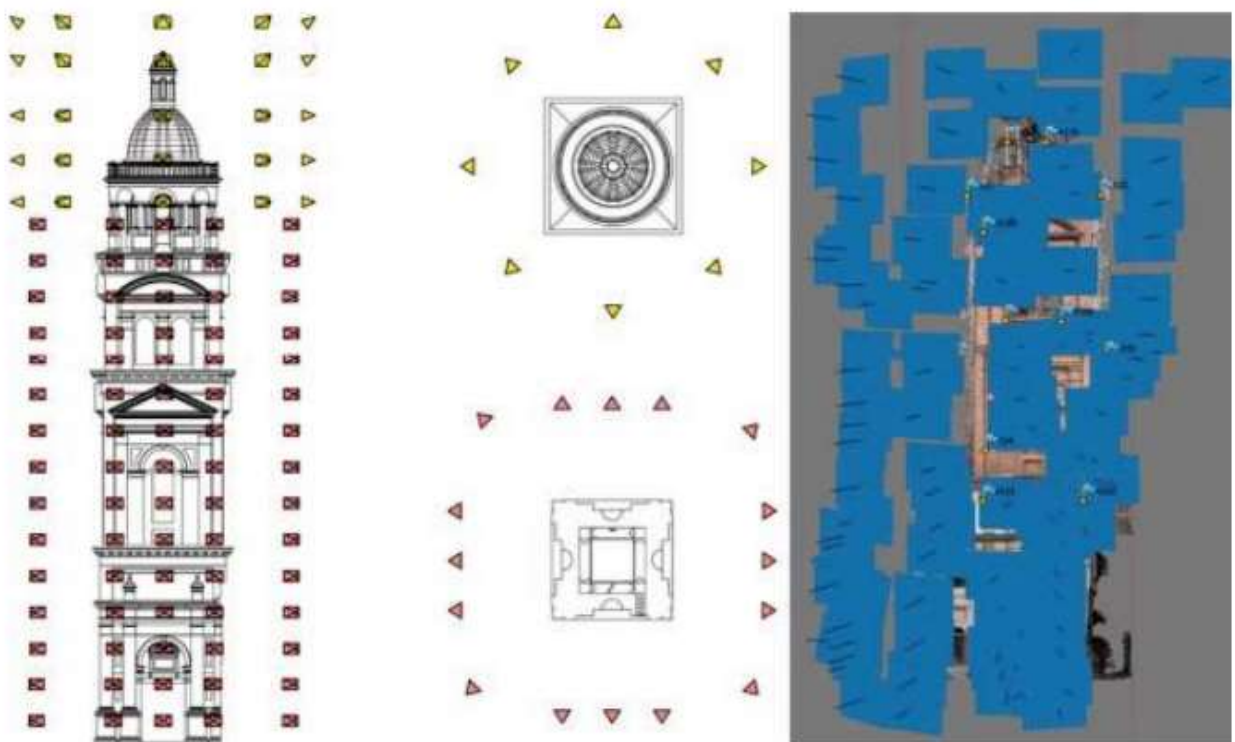


Рисунок 3.2 - Схема отримання зображень з БПЛА

Критичним чинником для якісного фотограмметричного моделювання виступали метеорологічні умови. З метою забезпечення однакової яскравості, колірної фактури та уникнення глибоких тіней чи переекспонованих зон, зйомку проводили виключно у похмуру погоду. Розсіяне природне світло дозволило отримати високу візуальну узгодженість текстурних полів. Загальний обсяг сформованого фотомасиву склав 441 знімок: північна сторона — 110 кадрів, західна — 83, східна — 70, південна — 19, а на сферичний купол було виділено 159 фотографій. Диспропорція в кількості знімків викликана конфігурацією об'єкта та наявністю сусідніх споруд, які обмежували маневрування БПЛА. Усереднене поздовжнє перекриття кадрів склало 80% (77% на кутових ділянках), поперечне — 70%, а просторовий крок між центрами проєкцій дорівнював 2.35 м по вертикалі та 3.48 м по горизонталі. Найвищу щільність зафіксовано в центральній зоні (понад 90% ширини головного фасаду), де кожен елемент потрапив у кадр до 8 разів з різних точок огляду [8].

Результати фотограмметричного моделювання та аналітичний синтез даних

Камеральна обробка та аналітичне вирівнювання знімків здійснювалися у програмному комплексі Agisoft PhotoScan (Metashape). Для прискорення обчислень проєкт було фрагментовано на 5 незалежних модулів: чотири вертикальні грані та верхній купольний блок. Для дослідження впливу еталонних маркерів на підсумкову геометричну точність просторової моделі було виконано три послідовні тестові випробування.

Під час першого випробування автоматичне машинне орієнтування та взаємне вирівнювання знімків здійснювалися повністю без залучення будь-яких зовнішніх цільових орієнтирів чи реперів. У другому випробуванні моделювання просторового блоку вже реалізовувалося із залученням дев'яти фіксованих цілей, безпосередньо прив'язаних до рельєфу та тахеометричної мережі. Фінальне, третє випробування проводилося за аналогічною схемою із

рельєфними цілями, але супроводжувалося додатковим виконанням процедури математичної оптимізації та самокалібрування камери.

Математичний аналіз результатів у програмному пакеті CloudCompare за допомогою алгоритму Евклідової метрики довів, що послідовне залучення еталонних маркерів та виконання внутрішньої корекції параметрів камери радикально підвищують точність координатного суміщення. Процедура оптимізації дозволила звести середню похибку калібрування до значення 1.8 пікселя, а середня квадратична похибка на контрольних точках склала всього 0.4 мм.

При фінальному переведенні (рототрансляції) фотограмметричного масиву в локальне геодезичне поле координат вежі середня похибка просторової прив'язки до місцевості зафіксована на рівні 11 мм. Середнє лінійне зміщення центрів проекції фотознімків склало близько 3 мм, що повністю задовольняє найжорсткіші метрологічні критерії для випуску архітектурних креслень у масштабах 1:50 та 1:20.

Результати похмарного порівняння фотограмметричного масиву та еталонної хмари TLS (Leica HDS 7000) засвідчили високу конвергенцію методів: понад 85% просторових точок продемонстрували розбіжність не більше 2 мм, а найбільші відхилення на крайових периферійних ділянках не перевищили 5–6 мм [8].

Фінальна інтеграція та практичне відображення інженерних результатів

Успішна верифікація збіжності дозволила виконати камеральний синтез фотограмметричного масиву та очищеної від шумів хмари TLS (2.3 млрд точок). Це дозволило поєднати високу геометричну точність «геодезичного скелета» з фотореалістичною кольоровою палітрою «метричної оболонки». Завдяки сумісному опрацюванню усунуто систематичні викривлення форми чи планомірні зсуви. На основі комбінованого масиву в софті AutoCAD було сформовано пошарову векторну документацію в масштабі 1:50, включаючи

плани ярусів, два поздовжні та три поперечні деформаційні розрізи вежі, сфокусовані на найбільш деформованих ділянках конструкцій.

Для фінального ортофотопланування та накладання текстур було задіяно строго відібрані знімки: 125 — для південного фасаду, 99 — для західного, 83 — для північного, 69 — для східного та 154 — для купольного склепіння. Це дозволило усунути небажані ефекти освітлення, забезпечити повне охоплення предмету обстеження з належним рівнем резерву даних і сформувати фронтальний ортофотоплан та реалістичну тривимірну модель вежі (див. Рисунок 3.3).



Рисунок 3.3 – Просторова 3D-модель за фотограмметричними даними

Оскільки цей розділ є завершальним у дипломній роботі, кінцевим практичним результатом дослідження стала комплексна архітектурно-геодезична документація та об'ємна модель (Solid Model), створена у середовищі інженерного проектування (Autodesk Revit / Civil 3D) шляхом

логічних булевих операцій над базовими геометричними примітивами. Створена модель об'єднує міліметрову точність лазерного сканування із візуальною достовірністю фотограмметрії. Вона повністю придатна для імпорту в спеціалізовані інженерні програмні комплекси [8].

Завдяки інтеграції отриманої параметричної системи з інструментами числового аналізу з'явилася можливість здійснювати вимірювання лінійних розмірів, площ та об'ємів елементів безпосередньо у віртуальному середовищі, порівнювати отримані профілі з архівними даними, а також детально досліджувати фактичні деформації та просідання вежі, спираючись на розбіжності між параметрами моделі та даними польових вимірювань.

Крім того, отримана модель стала основою для проведення інженерних розрахунків конструкцій за допомогою методології скінченних елементів (FEM/MCE), що дозволяє оцінити загальний рівень руйнувань, викривлень окремих складових частин та змодельовати їхню стійкість до потенційних воєнних вібраційних навантажень (див. Рисунок 3.4).

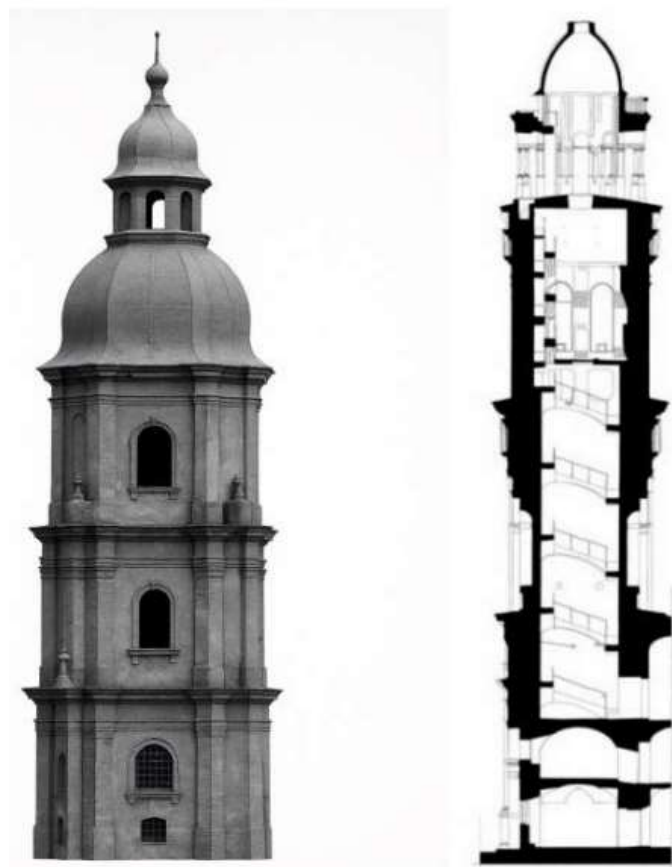


Рисунок 3.4 – створена об'ємна модель Костелу Бернардинів

Таким чином, сформований цифровий двійник є не просто фіксаційним підсумком геодезичних вишукувань, а готовою інженерною платформою для розробки стратегій консервації, охорони та планування майбутніх реставраційних заходів щодо Костелу Бернардинів в умовах воєнних загроз [8].

Узагальнюючи технологічний комплекс виконаних вишукувань, слід констатувати, що успішна реалізація цифрового двійника Костелу Бернардинів у с-щі Гвіздець в умовах воєнних загроз Прикарпаття стала можливою виключно завдяки інтеграції прецизійних геодезичних методів. Створення жорсткого координаційного каркаса («геодезичного скелета») за допомогою роботизованого тахеометра Leica TS30 та системи з 95 еталонних маркерів дозволило звести середню похибку прив'язки до 1 мм. Це математично підтвердило життєздатність раніше обґрунтованої чотирирівневої ієрархічної структури точності та заклало довговічну геопросторову основу. Отримана база є автономною та повністю захищеною від просторових деформацій, що забезпечує можливість тривалого фіксаційного моніторингу тримальних стін будівлі під впливом постійних військово-техногенних і логістичних вібрацій.

Практичний синтез 50 станцій наземного лазерного сканування далекоміром Leica HDS 7000 та 441 аерознімка з безпілотною апарату DJI Phantom 4 Pro дозволив усунути «сліпі зони» на висоті 38 метрів, де робота наземних приладів блокувалася металевими риштуваннями та аварійним станом конструкцій (див. Рисунок 7). Чисельне зіставлення просторових хмар у програмному софті CloudCompare зафіксувало субсантиметрову збіжність методів (понад 85% точок мають розходження до 2 мм). Це довело, що комбінований метод забезпечує еталонну точність «метричної оболонки» (від ± 5 до ± 20 мм), яка повністю відповідає жорстким нормативним вимогам реставраційного проектування у масштабах 1:50 та 1:20 (див. Рисунок 3.3).

Кінцевим результатом дослідження стало формування високоточної тривимірної твердотільної моделі вежі (Solid Model), яка інтегрує інженерну геометрію із фотореалістичною колористичною фактурою фасадів (див. Рисунок 10). В умовах воєнного стану цей інформаційний продукт виступає не

просто візуалізаційним елементом, а вичерпною «страховою матрицею» для автентичного відновлення пам'ятки у разі її фізичного пошкодження. Експорт параметричної системи у розрахункові комплекси за методологією скінченних елементів (FEM/MSE) відкрив можливість для детального комп'ютерного симулювання просідання фундаментів та оцінки конструктивної стійкості костелу до потенційних вибухових та сейсмо-акустичних навантажень (див. Рисунок 11). Таким чином, розроблений цифровий двійник трансформувався у дієву інженерну платформу для оперативного адміністрування, превентивної консервації та гарантованого збереження об'єкта архітектурної спадщини [8].

ВИСНОВКИ

У дипломній роботі вирішено актуальне науково-практичне завдання щодо метрологічного обґрунтування точності геодезичних робіт та розробки технології створення просторового цифрового двійника Костелу Бернардинів у с-щі Гвіздець в умовах воєнних загроз Прикарпаттю (рр. 1, 4). За результатами виконаних теоретичних та експериментальних досліджень сформульовано такі висновки:

Проаналізовано характер і механізми воєнних ризиків для нерухомої культурної спадщини тилкових регіонів, які класифіковано на пряме вогневе ураження, динамічну дію повітряних вибухових хвиль та накопичувальні сейсмо-акустичні й логістичні вібрації.

Обґрунтовано та впроваджено чотирирівневу ієрархічну модель поширення похибок (LoA), яка базується на методах математичної статистики. Даний підхід усунув методологічну суперечність класичного розуміння концепції Level of Accuracy, запобігши просторовому й метричному відриву високодеталізованих елементів декору від загальної геометрії будівлі.

Реалізовано польовий етап комплексних вишукувань на базі дзвіниці храму за оптимальних метеорологічних умов. За допомогою роботизованого тахеометра Leica TS30 розгорнуто планово-висотну мережу з 21 опорного пункту (16 всередині та 5 ззовні вежі), з яких визначено координати 95 контрольних світловідбиваючих маркерів. Фазовим лазерним сканером Leica HDS 7000 виконано 50 сканувань, що дозволило сформувати надщільний масив точок інтер'єру та нижніх ярусів фасадів. Для покриття «сліпих зон» на висоті 38 метрів, спричинених екрануванням металевих риштувань, задіяно БПЛА DJI Phantom 4 Pro, з якого за круговим маршрутом отримано 441 високодеталізований аерознімок з GSD 1.6–3 мм/піксель.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Баран П. І. Інженерна геодезія : підручник. – Київ : Віпол, 2012. – 618 с.
2. Волосецький Б. І. Геодезія у природокористуванні : навч. посібник. – Львів : Вид-во ЛНУ, 2008. – 238 с.
3. Волосецький Б. І. Інженерна геодезія : практикум. – Львів : Вид-во НУ «Львівська політехніка», 2003. – 156 с.
4. Інструкція з топографічного знімання у масштабах 1:5000, 1:2000, 1:1000, 1:500 : ГКНТА-2.04-02-98. – (Чинна від 1999–04–09). – К. : ГУГКК, 1999. – 148 с.
5. Тартачинський Р. М., Дейнека Ю. П., Смірнова О. М. Практикум з інженерної геодезії : навч. посібник. – Львів : Вид-во НУ «Львівська політехніка», 2001. – 116 с.
6. ГКНТА 2.04-02-2002. Інструкція з топографічного знімання у масштабах 1:5000, 1:2000, 1:1000 та 1:500 / Головне управління геодезії, картографії та кадастру при Кабінеті Міністрів України. – К. : ГУГКК, 2002. – 130 с.
7. Methodological foundations for ensuring the accuracy of geospatial documentation and digital twins of cultural heritage sites // Ukrainian Journal of Automotive and Mechanical Engineering. – 2026. – Vol. 20. – P. 115–118. – URL: ujae.org.ua (дата звернення: 18.06.2026).
8. Інтеграція лазерного сканування та фотограмметрії з БПЛА для обстеження висотних архітектурних споруд на прикладі Бернардинського монастиря та костелу у селищі Гвіздець : матеріали наук.-практ. конф. / Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу. – Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2025. – Репозитарій ІФНТУНГ. – URL: nung.edu.ua (дата звернення: 18.06.2026).
9. Склад та зміст науково-проектної документації щодо реставрації пам'яток архітектури та містобудування : ДБН А.2.2-14:2016. – (Чинний від 2017–01–01). – К. : Мінрегіон України, 2016. – 42 с. – (Державні будівельні норми України).
10. Зони охорони пам'яток культурної спадщини. Склад та зміст науково-проектної документації : ДСТУ Б Б.2.2-10:2016. – (На заміну ДБН

Б.2.2-2-2008). – К. : ДП «УкрНДЦ», 2016. – 18 с. – (Національний стандарт України).

11. Про топографо-геодезичну і картографічну діяльність : Закон України від 14.10.1998 № 186-XIV : станом на 01.01.2024 // Відомості Верховної Ради України. – 1999. – № 5-6. – Ст. 46. – URL: rada.gov.ua (дата звернення: 18.06.2026).

12. Про затвердження Порядку функціонування Державної геодезичної мережі (щодо впровадження система УСК-2000) : Постанова Кабінету Міністрів України від 13.07.2004 № 411 // Офіційний вісник України. – 2004. – № 28. – С. 56.

13. Настанова щодо обстеження будівель і споруд для визначення та оцінки їх технічного стану : ДСТУ-Н Б В.1.2-18:2016. – К. : ДП «УкрНДЦ», 2016. – 45 с. – (Національний стандарт України).

14. UNESCO Charter on the Preservation of Digital Heritage. – UNESCO, 2003. – 12 p. – URL: unesco.org (дата звернення: 18.06.2026).

15. Geographic information — Data quality : ISO 19157:2013. – Published 2013–12. – Geneva : International Organization for Standardization, 2013. – 92 p.

16. Organization and digitization of information about buildings and civil engineering works, including BIM — Information management using building information modeling — Part 1: Concepts and principles : ISO 19650-1:2018. – Geneva : ISO, 2018. – 36 p.

17. Geographic information — Metadata — Part 1: Fundamentals : ISO 19115-1:2014. – Geneva : ISO, 2014. – 167 p