

УДК 69.032:004.94:528.93

DOI <https://doi.org/10.32782/2415-8151.2026.39.10>

АВТОМАТИЗАЦІЯ ВИМІРЮВАЛЬНОГО ПРОЦЕСУ ПІД ЧАС ПРОЄКТУВАННЯ ВІКОН І СОНЦЕЗАХИСНИХ СИСТЕМ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ МОБІЛЬНИХ LiDAR-СКАНЕРІВ І BIM-ІНТЕГРАЦІЇ

Некрилов Антон Михайлович

спеціаліст, технік, Budget Blinds,

4650 Ейзенхауер авеню, м. Александрія, штат Вірджинія, 22304, США,
orcid: 0009-0004-2605-619X

Анотація. Актуальність дослідження зумовлено зростанням вимог до точності геометричних даних у BIM-орієнтованому проектуванні та монтажі світлопрозорих конструкцій, а також потребою скорочення витрат і мінімізації помилок, пов'язаних із традиційними ручними методами обміру віконних прорізів. Активне поширення мобільних пристроїв із вбудованими LiDAR-сенсорами створює передумови для автоматизації вимірювального процесу, однак їх метрологічна придатність порівняно з професійними лазерними сканерами залишається недостатньо обґрунтованою, що стримує практичне впровадження таких рішень у проектно-монтажній діяльності.

Метою статті є встановлення рівня точності вимірювання геометрії віконних прорізів із використанням мобільних LiDAR-сканерів, інтегрованих у пристрої iPhone/iPad, у зіставленні з професійними лазерними сканерами й наукове обґрунтування доцільності застосування отриманих даних у BIM-орієнтованому проектуванні й монтажі світлопрозорих огорожувальних конструкцій.

Методологія. Методи дослідження ґрунтуються на теоретичному аналізі сучасних підходів до лазерного сканування, обробленні й аналізі хмар точок, використанні метричних показників похибки (MAE, RMSE, максимальні відхилення), а також на порівняльному аналізі результатів вимірювань, отриманих різними LiDAR-системами, з позиції їх придатності для параметризації в BIM-середовищі.

Результати полягають у тому, що досліджено особливості формування геометричних даних мобільними й професійними LiDAR-системами, встановлено відмінності в стабільності та структурованості хмар точок і доведено залежність придатності результатів вимірювання для BIM-моделювання від рівня геометричної узгодженості даних.

Наукова новизна. Уперше встановлено кількісні межі застосування мобільних LiDAR-технологій у будівельному обмірі: виявлено, що такі рішення забезпечують достатню точність для оперативного обміру й попереднього BIM-аналізу, проте є обмеженими для завдань із мінімальними монтажними допусками та складною геометрією, де необхідними залишаються професійні лазерні сканери. Обґрунтовано критерії вибору вимірювальних технологій залежно від специфіки проектно-монтажних завдань.

Практична значущість. Результати дослідження дають змогу оптимізувати вибір обмірювальних технологій у будівельних проєктах: мобільні LiDAR-сканери

доцільно застосовувати як елемент гнучкої вимірювальної стратегії, що доповнює високоточні інженерні методи. Визначено межі практичного застосування мобільного LiDAR у проектно-монтажних процесах, що дає змогу уникнути необґрунтованих витрат на надмірно точне обладнання або ризиків від використання недостатньо точних вимірювань. Обґрунтовано рекомендації щодо інтеграції мобільного сканування з BIM-платформами для підвищення надійності цифрових моделей.

Ключові слова: лазерне сканування, хмари точок, геометрична точність, параметризація конструкцій, інформаційне моделювання будівель, монтажні допуски, цифрові вимірювальні технології.

ВСТУП

Актуальні процеси цифровізації будівельного проектування й виробництва світлопрозорих огорожувальних конструкцій висувають підвищені вимоги до точності вихідних геометричних даних, зокрема під час вимірювання віконних прорізів на стадіях обстеження, проектування та монтажу. Традиційні ручні методи обміру характеризуються значною залежністю від людського чинника, обмеженою відтворюваністю результатів і високою ймовірністю накопичення похибок, що призводить до помилок у BIM-моделях, невідповідності виготовлених виробів фактичним умовам об'єкта й зростання витрат на коригування та повторний монтаж. Альтернативою таким підходам є використання лазерного сканування, однак застосування професійних наземних лазерних сканерів залишається обмеженим через їх високу вартість, складність експлуатації та потребу в спеціалізованому персоналі, що ускладнює масштабування цих рішень у малих і середніх монтажних і проектних компаніях.

У цьому контексті поширення мобільних пристроїв із вбудованими LiDAR-сенсорами відкриває нові можливості для автоматизації вимірювального процесу, проте їх метрологічна придатність для завдань точного обміру віконних прорізів і подальшої інтеграції результатів у BIM-середовище залишається недостатньо обґрунтованою. Окрім того, відсутність систематизованих наукових досліджень щодо порівняння точності мобільного LiDAR і професійних лазерних сканерів у прикладних умовах будівельно-монтажних робіт створює методологічну невизначеність для практиків і стримує впровадження цифрових вимірювальних технологій на рівні виробництва та монтажу світлопрозорих конструкцій. Це зумовлює необхідність науково обґрунтованої оцінки точності мобільних LiDAR-рішень, визначення меж їх доцільного застосування

й установлення зв'язку між рівнем геометричної похибки та якістю BIM-орієнтованих проектних рішень. Розв'язання цієї проблеми має вагомий практичний значення для підвищення надійності цифрових моделей будівель, зниження кількості виробничо-монтажних помилок і формування економічно обґрунтованих підходів до вибору вимірювальних технологій у сучасній інженерно-будівельній практиці.

АНАЛІЗ ПОПЕРЕДНІХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Огляд сучасних досліджень дає змогу виокремити чотири взаємопов'язані наукові напрями, що послідовно відображають еволюцію методів цифрового вимірювання, моделювання та прикладного використання геометричних даних будівельної оболонки. Перший науковий напрям зосереджується на автоматизованому отриманні точної геометрії фасадів і віконних прорізів для аналізу сонячної інсоляції та затінення. Так, М. Мані (M. Manni) та співавтори пропонують модельний ланцюг, що поєднує LiDAR-сканування, моделі сонячної радіації й високодеталізовані 3D-моделі будівель, а також підкреслюють вирішальний вплив точності вимірювання вікон на результати сонячних симуляцій [13]. Водночас Р. Отеро (R. Otero) та співавтори розробляють підхід до автоматичного формування gbXML-моделей із LiDAR-даних, що дає змогу безпосередньо інтегрувати виміряні параметри вікон в енергетичні розрахунки без трудомісткого ручного моделювання [15]. Окрім того, А. Адан (A. Adán) і співавтори демонструють можливість автоматичної генерації as-is BEM-моделей будівель, де похибки первинних вимірювань віконних прорізів безпосередньо впливають на достовірність теплотехнічних і світлотехнічних оцінок [4]. У дослідженні Ю. Альшавабке (Y. Alshawabkeh) і співавтори обґрунтовують синергію лазерного сканування та фотограмметрії у BIM-середовищі,

що забезпечує підвищення геометричної точності фасадних елементів [5]. Подальші дослідження в цьому напрямі доцільно спрямувати на підвищення метричної надійності мобільних LiDAR-вимірювань, зокрема, для світлопрозорих конструкцій у складних умовах зйомки.

Другий науковий напрям охоплює методичні підходи до інтеграції LiDAR-сканування з BIM для створення повноцінних as-built моделей як інформаційну базу проектування вікон і сонцезахисних систем. Зокрема А.Р.А. Усмани (A. R. A. Usmani) та співавтори пропонують структурований scan-to-BIM workflow, у якому цифрове вимірювання будівлі дає змогу мінімізувати повторні натурні обміри й спростити оновлення геометрії віконних прорізів [17]. Водночас Ф. Банфі (F. Banfi) та співавтори розглядають розвиток цього підходу до рівня цифрового двійника, підкреслюючи, що коректна геометрія вікон є необхідною для управління енергоефективністю й комфортом у процесі експлуатації будівлі [7]. У дослідженні С. Пан (X. Pan) і співавтори демонструють застосування методів глибокого навчання для переходу від семантичних хмар точок до BIM-моделей, відкриваючи можливості автоматичного виявлення та класифікації віконних елементів [16]. Окрім того, К.П. Чаа (C.P. Chea) та співавтори узагальнюють розвиток автоматизації й робототехніки в будівництві, формуючи технологічне підґрунтя для системного впровадження цифрових вимірювальних процесів [9]. Подальші дослідження цього напрямку мають бути спрямовані на автоматизоване семантичне розпізнавання вікон і сонцезахисних систем у хмарах точок.

Третій напрям досліджень пов'язаний з інтеграцією BIM-моделей, сформованих відповідно до даних автоматизованих вимірювань, з енергетичним і сонячним моделюванням будівель. Так, Ж.Л. Алвеш (J.L. Alves) і співавтори розробляють BIM-орієнтований фреймворк для фотоелектричних систем, у якому точність геометрії фасадів і вікон визначає коректність оцінки сонячного потенціалу й ефективності затінення [6]. Також Ж.М. Делгадо (J.M. Delgado) та співавтори аналізують BIM-BEM-інтероперабельність на прикладі модульного житла, наголошуючи, що похибки у вимірюванні віконних прорізів призводять до системних помилок в енергетичних симуляціях [11]. У праці Г. Го (H. Guo) та співавтори пропонують платформу UAV-BIM-BEM для автоматичного формування енергетичних моделей будівель,

демонструючи перспективи поєднання дистанційних вимірювань з BIM для оптимізації світлопрозорих огорожень [12]. Водночас І. Абуелазіз (I. Abouelaziz) і Ю. Жуан (Y. Jouane) використовують фотограмметрію й глибоке навчання для прогнозування енергетичної продуктивності будівель, підкреслюючи важливість коректно змодельованих вікон для завдань декarbonізації [3]. Подальші дослідження в цьому напрямі доцільно спрямувати на поєднання мобільного LiDAR з автоматизованими сонячними та світлотехнічними симуляціями на ранніх стадіях проектування.

Четвертий науковий напрям стосується розвитку цифрових двійників, 4D-моделей і XR-технологій для підтримки прийняття рішень упродовж життєвого циклу фасадних систем. Так, К. Деласс (C. Delasse) та співавтори демонструють перехід від хмар точок до 4D-теплових моделей за даними мобільного картографування, де геометрія вікон безпосередньо впливає на просторовий розподіл теплових потоків [10]. У дослідженні С. Маццетто (S. Mazzetto) аналізує інтеграцію цифрових двійників і новітніх технологій у будівельній і реставраційній практиці, акцентуючи на необхідності високоточного геометричного підґрунтя [14]. Водночас М. Казіні (M. Casini) узагальнює роль extended reality в процесах експлуатації й обслуговування будівель, де BIM-моделі з точно заданими вікнами стають ключовим елементом інтерактивних рішень [8]. Подальші дослідження в цьому напрямі варто зосередити на створенні адаптивних цифрових двійників фасадів і сонцезахисних систем, що поєднують автоматизовані вимірювання, BIM-інтеграцію та сценарне сонячне моделювання.

Попри активний розвиток технологій лазерного сканування й BIM, у наукових дослідженнях недостатньо систематизовано питання прикладного використання мобільних LiDAR-сканерів для вимірювання віконних прорізів. Залишається невирішеним питання зіставлення мобільних і професійних LiDAR-систем саме з позиції придатності отриманих результатів для BIM-параметризації, а не лише за рівнем метрологічної похибки. Обмеженим залишається вивчення впливу умов експлуатації, стабільності хмар точок і похибок позиціонування мобільного LiDAR на якість цифрових моделей, а також відсутні узагальнені практичні рекомендації щодо доцільності застосування таких рішень у проектно-монтажній діяльності. Запропоноване

дослідження спрямоване на заповнення зазначених прогалін шляхом комплексного оцінювання результатів обмірювання віконних прорізів мобільними та професійними LiDAR-системами з урахуванням їх придатності для BIM-моделювання. У дослідженні обґрунтовується методичний підхід до оцінювання точності з використанням аналізу хмар точок і формуються практичні рекомендації щодо меж та умов використання мобільних LiDAR-сканерів залежно від вимог до точності й складності об'єктів, що підсилює наукову новизну й прикладну значущість дослідження.

МЕТА

Метою статті є визначення рівня точності вимірювання геометрії віконних прорізів за допомогою мобільних LiDAR-сканерів, інтегрованих у пристрої iPhone/iPad, порівняно з професійними лазерними сканерами й обґрунтування можливостей використання отриманих даних у BIM-орієнтованому проектуванні та монтажі світлопрозорих конструкцій.

Завдання статті:

1. Дослідити й зіставити особливості функціонування мобільних і професійних LiDAR-систем у вимірюванні геометрії віконних прорізів та обґрунтувати підхід до оцінювання точності з використанням аналізу хмар точок.

2. Оцінити придатність результатів вимірювань, отриманих мобільними й професійними LiDAR-системами, для їх використання у BIM-моделюванні віконних і сонцезахисних систем.

3. Виявити головні науково-практичні обмеження застосування мобільного LiDAR і сформулювати рекомендації щодо доцільності його використання в проектно-монтажній

діяльності з урахуванням вимог до точності й складності об'єктів.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

У сучасній будівельній практиці лазерне сканування дедалі активніше застосовується для отримання геометричних даних віконних прорізів із метою подальшої інтеграції результатів у BIM-середовище. Мобільні LiDAR-сенсори та професійні лазерні сканери ґрунтуються на спільному принципі активного дистанційного вимірювання, однак істотно відрізняються за організацією процесу знімання, стабільністю просторових даних і рівнем досяжної точності. Мобільні LiDAR-системи орієнтовані на швидкий обмір у межах ближньої зони й використовують поєднання лазерних даних з інформацією камер та інерціальних датчиків, що забезпечує оперативність, але зумовлює залежність якості результатів від умов знімання. Професійні лазерні сканери призначені для високоточного інженерного вимірювання, забезпечують однорідну й стабільну геометрію хмар точок, проте потребують складнішої підготовки та ресурсів. У цьому контексті зіставлення особливостей функціонування цих систем у контексті вимірювання віконних прорізів дає змогу визначити межі доцільного застосування кожної технології в сучасних проектно-монтажних процесах (таблиця 1).

В умовах сучасного будівництва й монтажу віконних систем мобільні та професійні LiDAR-рішення виконують різні, але взаємодоповнювальні функції. Мобільний LiDAR зазвичай використовується безпосередньо на об'єкті під час первинного обстеження чи обмірів перед виготовленням виробів, зокрема в разі масової заміни вікон у житлових

Таблиця 1

Порівняльні характеристики функціонування мобільних LiDAR-сенсорів і професійних лазерних сканерів під час вимірювання віконних прорізів

Критерій	Мобільні LiDAR (iPhone/iPad)	Професійні лазерні сканери (Leica, Trimble, FARO)
Дальність сканування	До 5–10 м	До декількох сотень метрів
Рівень похибки	Сантиметровий	Міліметровий
Щільність хмари точок	Середня, змінна	Висока й стабільна
Стабільність геометрії	Залежить від рухів оператора й умов знімання	Практично незалежна від зовнішніх чинників
Підготовка до обміру	Мінімальна	Потребує калібрування й налаштування
Швидкість отримання результату	Дуже висока	Висока з урахуванням підготовчого етапу
Інтеграція у BIM	Обмежено придатна для прикладних завдань	Повністю придатна для інженерного BIM

Джерело: сформовано на основі [5; 9, р. 83; 13; 15; 17, р. 926].

і громадських будівлях. У таких сценаріях сканування здійснюється оператором у русі, а хмара точок формується в реальному часі, що дає змогу швидко зафіксувати фактичну геометрію прорізу, виявити нерівність площин, локальні скоси або відхилення від проектної прямокутності [5]. З огляду на це, практичним результатом є можливість попередньо коригувати монтажні розміри й уникати типових помилок, що пов'язані з неточністю ручних обмірів, особливо в об'єктах реконструкції з деформованими огорожувальними конструкціями. Професійні лазерні сканери застосовуються переважно в проєктах із підвищеними вимогами до точності, зокрема під час обстеження фасадів складної геометрії, висотних будівель або об'єктів з індивідуальними віконними та сонцезахисними системами. Їх стаціонарний або напівстаціонарний режим роботи забезпечує однорідну щільність хмари точок, що дає змогу точно відтворювати реальну геометрію прорізів і прилеглих площин у BIM-моделях. Окрім того, у практиці виробництва це знижує ризик невідповідності між цифровою моделлю та фактичним станом об'єкта, мінімізує потребу в додаткових допусках і сприяє оптимізації процесів виготовлення й монтажу [13]. Таким чином, вибір між мобільним і професійним LiDAR визначається не лише рівнем досяжної точності, а й характером проєкту, масштабом робіт і допустимими монтажними відхиленнями. Мобільні LiDAR-системи підвищують оперативність і доступність вимірювального процесу, тоді як професійні сканери забезпечують стабільне геометричне підґрунтя для високоточного BIM-орієнтованого проєктування. Саме поєднання цих підходів у сучасних виробничих і проєктних сценаріях формує практичні передумови для зменшення помилок і підвищення ефективності життєвого циклу віконних систем.

Оцінювання точності вимірювань геометрії віконних прорізів на основі лазерного сканування потребує формалізованого методичного підходу, що забезпечує зіставність результатів, отриманих різними типами LiDAR-систем, і дає змогу кількісно описати вплив похибок на подальші проєктні рішення. Ключовим джерелом геометричної інформації в такому підході є хмара точок, що розглядається як дискретне просторове представлення реальної поверхні прорізу. Точність вимірювання в цьому контексті визначається не лише абсолютними відхиленнями окремих точок, а й якістю відтворення геометричних елементів, зокрема площин, контурів і взаємного розташування граней прорізу. Тому методика оцінювання має ґрунтуватися на поєднанні статистичних показників похибки та геометричного аналізу апроксимованих поверхонь, що дає змогу перейти від локальних вимірювальних відхилень до інженерно значущих параметрів, необхідних для BIM-моделювання і виробничих розрахунків (таблиця 2).

У сучасній практиці запропонований методичний підхід реалізується шляхом порівняння хмар точок, отриманих досліджуваною LiDAR-системою, з референтною геометрією, що формується на основі високоточного сканування чи контрольних обмірів. Програмні алгоритми виконують фільтрацію шуму, сегментацію області віконного прорізу й апроксимацію його поверхонь площинами та лінійними елементами. Після цього визначаються числові значення метричних показників похибки, які інтерпретуються з позиції монтажних допусків і вимог до точності BIM-моделей. На практиці це дає змогу інженеру або проєктувальнику не лише фіксувати факт наявності похибок, а й оцінювати їх інженерну значущість, наприклад, чи призведе виявлене відхилення площини до проблем під час

Таблиця 2

Головні метричні показники оцінювання точності вимірювання геометрії віконних прорізів за даними хмар точок

Показник	Характеристика	Приклад інтерпретації
Середня абсолютна похибка (MAE)	Усереднене відхилення точок від еталонної поверхні	Оцінювання загального рівня точності обміру
Середньоквадратична похибка (RMSE)	Показник варіативності відхилень	Виявлення нестабільності вимірювань
Максимальне відхилення	Найбільша зафіксована похибка	Визначення граничних монтажних ризиків
Відхилення площин	Нерівність і перекося граней прорізу	Оцінювання коректності монтажу віконного блока
Розбіжність лінійних розмірів	Різниця між номінальними та вимірними шириною й висотою	Контроль допусків для виготовлення

Джерело: сформовано на основі [4; 10, р. 56; 15; 16].

монтажу віконного блока або монтажу сонцезахисної системи [15]. Таким чином, аналіз хмар точок у поєднанні з метричними показниками похибки слугує інструментом прийняття обґрунтованих проектних і виробничих рішень у сучасних умовах цифрового будівництва.

Для наочного порівняння точності вимірювання віконних прорізів мобільними та професійними LiDAR-системами використано графічне подання середньої абсолютної й середньоквадратичної похибок. Така візуалізація дає змогу безпосередньо зіставити стабільність геометричних результатів та оцінити можливість подальшої параметризації вимірюваних даних у BIM-середовищі (рис. 1).

Як видно з рис. 1, мобільні LiDAR-системи характеризуються вищими значеннями похибок, що обмежує можливість автоматизованої параметризації геометрії в BIM-моделях. Водночас досягнутий рівень точності є достатнім для оперативного обміру та попереднього BIM-аналізу. Професійні LiDAR-системи забезпечують міліметрову точність, необхідну для інженерного проектування й монтажу із жорсткими допусками.

Порівняльна оцінка результатів вимірювання віконних прорізів мобільними й професійними LiDAR-системами здійснюється за даними геометричного аналізу даних, отриманих у результаті фактичного сканування об'єктів, з подальшою перевіркою їх придатності для використання у BIM-моделюванні.

Після виконання обміру кожна система формує хмару точок, що відображає реальну геометрію прорізу та слугує вихідним цифровим представленням для побудови параметричних моделей. Придатність таких результатів для BIM визначається тим, наскільки коректно на основі вимірюваних даних можна відновити базові геометричні параметри прорізу, автоматично чи напівавтоматично задати габарити віконних елементів та інтегрувати їх у інформаційну модель будівлі без втрати геометричної узгодженості. У цьому контексті порівняння зосереджується не на самій технології сканування, а на якості й структурованості саме вимірюваних результатів як вхідних даних для BIM (таблиця 3).

У сучасних BIM-орієнтованих робочих процесах результати вимірювання віконних прорізів оцінюються насамперед із позиції їх трансформації з хмар точок у параметризовані цифрові об'єкти. У випадку використання вимірювань, виконаних мобільними LiDAR-системами, хмара точок після попередньої фільтрації дає змогу відновити загальні контури прорізу та визначити його габаритні розміри, що є достатнім для формування спрощених параметричних елементів у BIM-моделі. Такі результати ефективно застосовуються на стадіях попереднього проектування, уточнення чинної документації чи координації між архітектурними й інженерними розділами, коли головною метою є узгодження просторових рішень, а не

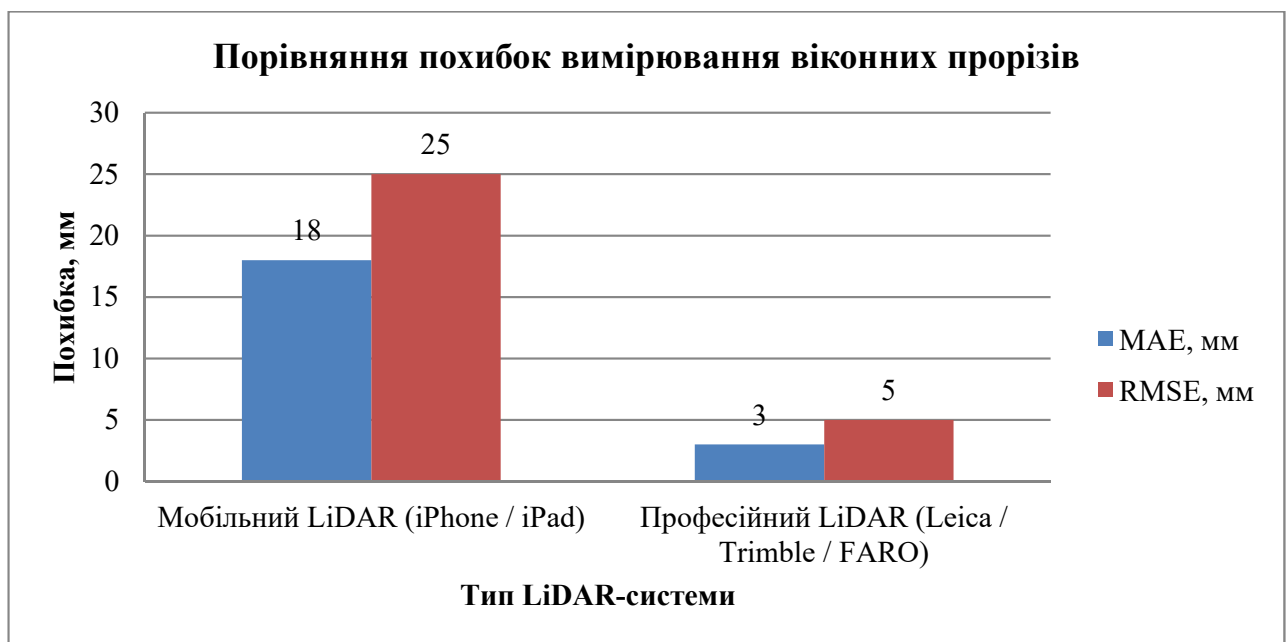


Рис. 1. Порівняння похибок вимірювання віконних прорізів
Джерело: власна розробка автора.

Таблиця 3

**Порівняльна оцінка придатності результатів вимірювання віконних прорізів
для BIM-моделювання**

Параметр оцінювання результатів	Результати мобільного LiDAR	Результати професійного LiDAR
Повнота відтворення геометрії прорізу	Часткова, достатня для типових форм	Повна, включно зі складними відхиленнями
Надійність визначення габаритів	Обмежена за умов нерівних поверхонь	Висока незалежно від стану конструкції
Сумісність із BIM-інструментами	Потребує додаткової обробки	Пряма інтеграція
Можливість параметризації	Умовна, з ручним коригуванням	Стійка, автоматизована
Ризик геометричних конфліктів у BIM	Підвищений	Мінімальний

Джерело: розроблено автором.

підготовка даних безпосередньо для виробництва.

Результати вимірювань, отримані професійними LiDAR-системами, характеризуються більшою геометричною узгодженістю й стабільністю, що допомагає точно ідентифікувати реальні площини прорізу, їх просторову орієнтацію та взаємне положення. У BIM-практиці це забезпечує можливість автоматизованого створення параметричних сімейств віконних і сонцезахисних систем із прив'язкою до фактичної геометрії об'єкта, мінімізуючи ручне коригування моделей. Окрім того, практичний ефект такого підходу проявляється в зниженні ймовірності геометричних конфліктів між проектними елементами, точнішому розрахунку монтажних швів і підвищенні відповідності між цифровою моделлю та виготовленими виробами. Таким чином, результати вимірювань мобільними LiDAR-системами доцільно розглядати як вхідні дані для оперативного BIM-аналізу та прийняття інженерних рішень на ранніх етапах, тоді як результати професійного LiDAR-сканування формують надійне геометричне підґрунтя для повного циклу BIM – від обстеження до проектування, виробництва й монтажу віконних конструкцій. З огляду на це, саме різниця в ступені придатності вимірюваних даних до параметризації визначає їх практичну цінність у сучасних цифрових проектних екосистемах.

Застосування мобільних LiDAR-рішень у вимірювальному процесі супроводжується низкою науково-практичних проблем, які обмежують стабільність і відтворюваність результатів обміру віконних прорізів. Насамперед точність сформованих геометричних даних істотно залежить від умов експлуатації, зокрема освітлення, відбивних властивостей поверхонь і наявності просторових перешкод, що призводить до нерівномірної щільності хмар точок і локальних спотворень геометрії.

Важливою проблемою є нестабільність траєкторії сканування, зумовлена ручним переміщенням мобільного пристрою, унаслідок чого накопичуються похибки позиціонування й виникають зони перекосу чи розриву просторових даних [4]. Комбінування LiDAR-інформації з даними камер та інерціальних датчиків, хоча й підвищує швидкість обміру, водночас ускладнює контроль джерел похибок і знижує передбачуваність метричних характеристик результатів.

Додатковою науково-практичною проблемою постає обмежена дальність і кутний обхват мобільних LiDAR-сенсорів, що ускладнює коректне відтворення глибоких або частково закритих прорізів і потребує багаторазових проходів, кожен із яких додає новий елемент похибки реєстрації [17, р. 931]. Не менш суттєвим є вплив алгоритмів внутрішньої обробки, які виконуються на рівні операційної системи пристрою й не підлягають повній верифікації користувачем, що обмежує можливості метрологічного контролю та стандартизації вимірювального процесу. У практичному контексті це ускладнює інтеграцію мобільного LiDAR у формалізовані виробничі процедури й знижує довіру до результатів у задачах, де допустимі відхилення є мінімальними.

Формування практичних рекомендацій щодо доцільності використання мобільних LiDAR-сканерів у проектно-монтажній діяльності ґрунтується на узгодженні досяжного рівня точності вимірювань із геометричною складністю об'єкта й вимогами подальших виробничих операцій. У процесах, де допускаються помірні відхилення геометрії та ключовим є скорочення часу обміру, мобільні LiDAR-рішення доцільно застосовувати як інструмент оперативного вимірювання й первинної актуалізації цифрових даних, зокрема під час заміни типових віконних систем, реконструкції будівель із повторюваною геометрією

прорізів або попереднього узгодження проектних рішень. У таких умовах отримані дані забезпечують достатню основу для формування BIM-моделей прикладного рівня та прийняття інженерних рішень без залучення ресурсомістких технологій високоточного сканування.

Для об'єктів із підвищеною геометричною складністю, індивідуальними фасадними рішеннями чи жорсткими вимогами до монтажних допусків мобільні LiDAR-сканери доцільно використовувати в поєднанні з іншими методами вимірювання, вони відіграють роль допоміжного інструмента просторової фіксації та виявлення загальних відхилень від проектною геометрії. У таких випадках результати мобільного сканування можуть застосовуватися для попередньої перевірки відповідності проекту фактичним умовам об'єкта, тоді як остаточні вимірювальні дані мають формуватися за даними високоточного інженерного обміру. Окрім того, практична доцільність мобільного LiDAR також зростає в сценаріях, де важливими є мобільність, доступність і можливість швидкого повторного вимірювання без зупинки монтажних робіт.

Загалом використання мобільних LiDAR-сканерів у проектно-монтажній діяльності доцільно розглядати як елемент гнучкої вимірювальної стратегії, у межах якої вибір технології визначається допустимими похибками, складністю геометрії й економічними обмеженнями проекту. Такий підхід дає змогу підвищити ефективність вимірювального процесу, зменшити кількість помилок на ранніх етапах і раціонально поєднувати швидкі мобільні рішення з високоточними інженерними методами там, де це є критично необхідним.

ВИСНОВКИ

У результаті дослідження встановлено, що мобільні LiDAR-сканери, інтегровані в пристрої iPhone й iPad, створюють ефективні передумови для автоматизації вимірювального процесу віконних прорізів, однак їх метрологічні можливості істотно поступаються професійним лазерним сканерам. Отримані дані підтверджують, що результати мобільного LiDAR-сканування є придатними для оперативного обміру, попереднього BIM-моделювання й актуалізації наявних цифрових моделей за умови допустимих геометричних похибок і не можуть розглядатися як універсальна заміна високоточного інженерного вимірювання. Обґрунтований методичний підхід до оцінювання точності з використанням аналізу хмар точок і метричних показників похибки дає змогу оцінювати не лише абсолютні відхилення, а й придатність

вимірюваних даних до параметризації в BIM-середовищі. Установлено, що ключовим чинником використання результатів вимірювання є структурованість геометричних даних і стабільність відтворення реальної геометрії прорізів, що безпосередньо впливає на якість проектних і виробничо-монтажних рішень. Виявлено, що головні науково-практичні проблеми мобільних LiDAR-рішень пов'язані з чутливістю до умов експлуатації, нестабільністю просторових даних під час ручного сканування, накопиченням похибок позиювання й обмеженим контролем внутрішніх алгоритмів обробки. Комплекс цих чинників обмежує можливості використання мобільного LiDAR у завданнях із жорсткими вимогами до точності та потребує чіткого визначення меж його практичної доцільності. Сформульовано рекомендації щодо застосування мобільних LiDAR-сканерів як елемента гнучкої вимірювальної стратегії, що передбачає їх використання для швидкого обміру й BIM-аналізу на об'єктах із типовою геометрією та залучення професійних лазерних сканерів у разі складних фасадних рішень або мінімальних монтажних допусків. Реалізація такого підходу дає змогу поєднати економічну ефективність із забезпеченням необхідної якості цифрових моделей.

Перспективи подальших досліджень доцільно пов'язувати з розвитком стандартизованих протоколів валідації мобільних LiDAR-вимірювань, створенням алгоритмів автоматичного визначення монтажних параметрів за хмарами точок і поглибленням інтеграції мобільного сканування з BIM-середовищами для підвищення надійності й масштабованості цифрового будівельного проектування.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] Некрилов А. Адаптація закордонних підходів до оцінки енергоефективності вікон як єдиної системи «вікно – тканинне покриття» для будівельної галузі. *Наука і техніка сьогодні*. 2025. Вип. 2, № 46. С. 1848–1859. DOI: [https://doi.org/10.52058/2786-6025-2025-5\(46\)-1848-1859](https://doi.org/10.52058/2786-6025-2025-5(46)-1848-1859).
- [2] Некрилов А. Вплив скління нестандартними формами на теплоізоляційні властивості будівель. *Наука і техніка сьогодні*. 2025. Вип. 6, № 47. С. 1429–1443. DOI: [https://doi.org/10.52058/2786-6025-2025-6\(47\)-1429-1443](https://doi.org/10.52058/2786-6025-2025-6(47)-1429-1443).
- [3] Abouelaziz I., Jouane Y. Photogrammetry and deep learning for energy production prediction and building-integrated photovoltaics decarbonization. *Building Simulation*. 2024. Vol. 17, № 2. P. 189–205. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12273-023-1089-y>.
- [4] Adán A., Ramón A., Vivancos J.L., Vilar A., Aparicio-Fernández C. Automatic generation of as-is BEM

models of buildings. *Journal of Building Engineering*. 2023. Vol. 73. Article 106865. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.106865>.

[5] Alshawabkeh Y., Baik A., Miky Y. Integration of laser scanner and photogrammetry for heritage BIM enhancement. *ISPRS International Journal of Geo-Information*. 2021. Vol. 10, № 5. Article 316. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijgi10050316>.

[6] Alves J.L., Palha R.P., de Almeida Filho A.T. BIM-Based Framework for Photovoltaic Systems: Advancing Technologies, Overcoming Challenges, and Enhancing Sustainable Building Performance. *Sustainability*. 2025. Vol. 17, № 8. Article 3695. DOI: <https://doi.org/10.3390/su17083695>.

[7] Banfi F., Brumana R., Salvalai G., Previtali M. Digital twin and cloud BIM-XR platform development: from scan-to-BIM-to-DT process to a 4D multi-user live app to improve building comfort, efficiency and costs. *Energies*. 2022. Vol. 15, № 12. Article 4497. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15124497>.

[8] Casini M. Extended reality for smart building operation and maintenance: A review. *Energies*. 2022. Vol. 15, № 10. Article 3785. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15103785>.

[9] Chea C.P., Bai Y., Pan X., Arashpour M., Xie Y. An integrated review of automation and robotic technologies for structural prefabrication and construction. *Transportation Safety and Environment*. 2020. Vol. 2, № 2. P. 81–96. DOI: <https://doi.org/10.1093/tse/tdaa007>.

[10] Delasse C., Lecomte V., Hajji R., Landes T., Macher H., Kastendeuch P., Najjar G. From Point Cloud to 4D Thermal Model: Leveraging In-Situ Measurements from a Low-Cost Mobile Mapping System in Rabat, Morocco. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2025. Vol. 48. P. 55–62. DOI: <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-4-W15-2025-55-2025>.

[11] Delgado J.M., Guimarães A.S., Poças Martins J., Parracho D.F., Freitas S.S., Lima A.G., Rodrigues L. BIM and BEM interoperability – evaluation of a case study in modular wooden housing. *Energies*. 2023. Vol. 16, № 4. Article 1579. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16041579>.

[12] Guo H., Chen Z., Chen X., Yang J., Song C., Chen Y. UAV-BIM-BEM: An automatic unmanned aerial vehicles-based building energy model generation platform. *Energy and Buildings*. 2025. Vol. 328. Article 115120. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.115120>.

[13] Manni M., Nocente A., Kong G., Skeie K., Fan H., Lobaccaro G. Solar energy digitalization at high latitudes: A model chain combining solar irradiation models, a LiDAR scanner, and high-detail 3D building model. *Frontiers in Energy Research*. 2022. Vol. 10. Article 1082092. DOI: <https://doi.org/10.3389/feeng.2022.1082092>.

[14] Mazzetto S. Integrating emerging technologies with digital twins for heritage building conservation: an interdisciplinary approach with expert insights and bibliometric analysis. *Heritage*. 2024. Vol. 7,

№ 11. P. 6432–6479. DOI: <https://doi.org/10.3390/heritage7110300>.

[15] Otero R., Frías E., Lagüela S., Arias P. Automatic gbXML modeling from LiDAR data for energy studies. *Remote Sensing*. 2020. Vol. 12, № 17. Article 2679. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs12172679>.

[16] Pan X., Lin Q., Ye S., Li L., Guo L., Harmon B. Deep learning based approaches from semantic point clouds to semantic BIM models for heritage digital twin. *Heritage Science*. 2024. Vol. 12, № 1. Article 65. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40494-024-01179-4>.

[17] Usmani A.R.A., Elshafey A., Gheisari M., Chai C., Aminudin E.B., Tan C.S. A scan to as-built building information modeling workflow: a case study in Malaysia. *Journal of Engineering, Design and Technology*. 2020. Vol. 18, № 4. P. 923–940. DOI: <https://doi.org/10.1108/JEDT-07-2019-0182>.

REFERENCES

[1] Nekrilov, A. (2025). Adaptatsiia zakordonnykh pidkhodiv do otsinky enerhoefektyvnosti vikon yak yedynoi systemy «vikno – tkanyne pokryttia» dlia budivelnoi haluzi [Adaptation of foreign approaches to assessing window energy efficiency as a unified «window – fabric covering» system for the construction industry]. *Nauka i tekhnika sohodni – Science and Technology Today*, Vol. 2, № 46, p. 1848–1859. DOI: [https://doi.org/10.52058/2786-6025-2025-5\(46\)-1848-1859](https://doi.org/10.52058/2786-6025-2025-5(46)-1848-1859) [in Ukrainian].

[2] Nekrilov, A. (2025). Vplyv sklinnia nestandardnykh formamy na teploizolatsiini vlastyvoli budivel [Impact of non-standard glazing forms on thermal insulation properties of buildings]. *Nauka i tekhnika sohodni – Science and Technology Today*, Vol. 6, № 47, p. 1429–1443. DOI: [https://doi.org/10.52058/2786-6025-2025-6\(47\)-1429-1443](https://doi.org/10.52058/2786-6025-2025-6(47)-1429-1443) [in Ukrainian].

[3] Abouelaziz, I., Jouane, Y. (2024). Photogrammetry and deep learning for energy production prediction and building-integrated photovoltaics decarbonization. *Building Simulation*, Vol. 17, № 2, p. 189–205. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12273-023-1089-y> [in English].

[4] Adán, A., Ramón, A., Vivancos, J.L., Vilar, A., Aparicio-Fernández, C. (2023). Automatic generation of as-is BEM models of buildings. *Journal of Building Engineering*, Vol. 73, Article 106865. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.106865> [in English].

[5] Alshawabkeh, Y., Baik, A., Miky, Y. (2021). Integration of laser scanner and photogrammetry for heritage BIM enhancement. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, Vol. 10, № 5, Article 316. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijgi10050316> [in English].

[6] Alves, J.L., Palha, R.P., de Almeida Filho, A.T. (2025). BIM-Based Framework for Photovoltaic Systems: Advancing Technologies, Overcoming Challenges, and Enhancing Sustainable Building Performance. *Sustainability*, Vol. 17, № 8, Article 3695. DOI: <https://doi.org/10.3390/su17083695> [in English].

[7] Banfi, F., Brumana, R., Salvalai, G., Previtali, M. (2022). Digital twin and cloud BIM-XR

platform development: from scan-to-BIM-to-DT process to a 4D multi-user live app to improve building comfort, efficiency and costs. *Energies*, Vol. 15, № 12, Article 4497. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15124497> [in English].

[8] Casini, M. (2022). Extended reality for smart building operation and maintenance: A review. *Energies*, Vol. 15, № 10, Article 3785. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15103785> [in English].

[9] Chea, C.P., Bai, Y., Pan, X., Arashpour, M., Xie, Y. (2020). An integrated review of automation and robotic technologies for structural prefabrication and construction. *Transportation Safety and Environment*, Vol. 2, № 2, p. 81–96. DOI: <https://doi.org/10.1093/tse/tdaa007> [in English].

[10] Delasse, C., Lecomte, V., Hajji, R., Landes, T., Macher, H., Kastendeuch, P., Najjar, G. (2025). From Point Cloud to 4D Thermal Model: Leveraging In-Situ Measurements from a Low-Cost Mobile Mapping System in Rabat, Morocco. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. 48, p. 55–62. DOI: <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-4-W15-2025-55-2025> [in English].

[11] Delgado, J.M., Guimarães, A.S., Poças Martins, J., Parracho, D.F., Freitas, S.S., Lima, A.G., Rodrigues, L. (2023). BIM and BEM interoperability – evaluation of a case study in modular wooden housing. *Energies*, Vol. 16, № 4, Article 1579. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16041579> [in English].

[12] Guo, H., Chen, Z., Chen, X., Yang, J., Song, C., Chen, Y. (2025). UAV-BIM-BEM: An automatic unmanned aerial vehicles-based building energy

model generation platform. *Energy and Buildings*, Vol. 328, Article 115120. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.115120> [in English].

[13] Manni, M., Nocente, A., Kong, G., Skeie, K., Fan, H., Lobaccaro, G. (2022). Solar energy digitalization at high latitudes: A model chain combining solar irradiation models, a LiDAR scanner, and high-detail 3D building model. *Frontiers in Energy Research*, Vol. 10, Article 1082092. DOI: <https://doi.org/10.3389/fenrg.2022.1082092> [in English].

[14] Mazzetto, S. (2024). Integrating emerging technologies with digital twins for heritage building conservation: an interdisciplinary approach with expert insights and bibliometric analysis. *Heritage*, Vol. 7, № 11, p. 6432–6479. DOI: <https://doi.org/10.3390/heritage7110300> [in English].

[15] Otero, R., Frías, E., Lagüela, S., Arias, P. (2020). Automatic gbXML modeling from LiDAR data for energy studies. *Remote Sensing*, Vol. 12, № 17, Article 2679. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs12172679> [in English].

[16] Pan, X., Lin, Q., Ye, S., Li, L., Guo, L., Harmon, B. (2024). Deep learning based approaches from semantic point clouds to semantic BIM models for heritage digital twin. *Heritage Science*, Vol. 12, № 1, Article 65. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40494-024-01179-4> [in English].

[17] Usmani, A.R.A., Elshafey, A., Gheisari, M., Chai, C., Aminudin, E.B., Tan, C.S. (2020). A scan to as-built building information modeling workflow: a case study in Malaysia. *Journal of Engineering, Design and Technology*, Vol. 18, № 4, p. 923–940. DOI: <https://doi.org/10.1108/JEDT-07-2019-0182> [in English].

ABSTRACT

Nekrylov A. Automation of the Measurement Process in Window and Solar Shading System Design Using Mobile LiDAR Scanners and BIM Integration

The relevance of this study stems from the growing requirements for geometric data accuracy in BIM-oriented design and installation of transparent building envelopes, as well as the need to reduce costs and minimize errors associated with traditional manual methods of measuring window openings. The widespread adoption of mobile devices with integrated LiDAR sensors creates prerequisites for automating the measurement process; however, their metrological suitability compared to professional laser scanners remains insufficiently substantiated, which hinders the practical implementation of such solutions in design and installation activities.

The purpose of this article is to establish the accuracy level of measuring window opening geometry using mobile LiDAR scanners integrated into iPhone/iPad devices in comparison with professional laser scanners, and to scientifically substantiate the feasibility of applying the obtained data in BIM-oriented design and installation of transparent building envelope structures.

The research methods are based on theoretical analysis of contemporary approaches to laser scanning, point cloud processing and analysis, utilization of metric error indicators (MAE, RMSE, maximum deviations), as well as comparative analysis

of measurement results obtained by different LiDAR systems from the perspective of their suitability for parametrization in the BIM environment.

The results demonstrate that the study examined the characteristics of geometric data generation by mobile and professional LiDAR systems, established differences in the stability and structure of point clouds, and proved the dependence of measurement result suitability for BIM modeling on the level of geometric data consistency.

Scientific novelty. For the first time, quantitative limits of mobile LiDAR technology application in construction surveying have been established: it was found that such solutions provide sufficient accuracy for rapid surveying and preliminary BIM analysis, but are limited for tasks with minimal installation tolerances and complex geometry, where professional laser scanners remain necessary. Criteria for selecting measurement technologies depending on the specifics of design and installation tasks have been substantiated.

Practical relevance. The research results enable optimization of surveying technology selection in construction projects: mobile LiDAR scanners should be used as an element of a flexible measurement strategy that complements high-precision engineering methods. The limits of practical application of mobile LiDAR in design and installation processes have been determined, which allows avoidance of unjustified expenses for excessively precise equipment or risks from using insufficiently accurate measurements. Recommendations for integrating mobile scanning with BIM platforms to enhance the reliability of digital models have been substantiated.

Keywords: laser scanning, point clouds, geometric accuracy, structure parametrization, building information modeling, installation tolerances, digital measurement technologies.

AUTHOR'S NOTE:

Nekrylov Anton, Master's degree, Technician Installer, Budget Blinds, 4650 Eisenhower Ave, Alexandria, VA 22304, USA, orcid: 0009-0004-2605-619X.

Дата першого надходження статті до видання: 03.12.2025

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 16.01.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 24.04.2026

Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

