

**РЕКОНСТРУКЦІЯ ІНЖЕНЕРНИХ СПОРУД ТА МЕРЕЖ,
ЛАНДШАФТУ НА ОСНОВІ ТЕХНОЛОГІЇ ЛАЗЕРНОГО
СКАНУВАННЯ**

**RECONSTRUCTION OF ENGINEERING STRUCTURES AND
ENGINEERING NETWORKS, LANDSCAPE BASED ON LASER
SCANNING TECHNOLOGY**

Сунак П. О., к.т.н., доц., Синій С. В., к.т.н., доц., Мельник Ю. А., к.т.н., доц. (Луцький національний технічний університет, Луцьк), Ксьоншкевич Л. М., к.т.н., доц., Крантовська О. М., к.т.н., доц. (Одеська державна академія будівництва та архітектури, Одеса), Орешкович Матія, к.т.н., доц. (Північний університет, Вараздін, Хорватія)

Sunak P. O., Ph.D. in Engineering, Associate Professor, Synii S. V., Ph.D. in Engineering, Associate Professor, Melnyk Yu. A., Ph.D. in Engineering, Associate Professor (Lutsk National Technical University, Lutsk), Ksonshkevych L. M., Ph.D. in Engineering, Associate Professor, Krantovska O. M., Ph.D. in Engineering, Associate Professor (Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture, Odesa), Orešković Matija, Ph.D. in Engineering, Associate Professor (University North, Varazdin, Croatia)

У даній статті обґрунтовано перспективність застосування технології лазерного сканування при проведенні робіт з реконструкції інженерних споруд та мереж, ландшафту. Ця технологія дає можливість отримати високоточні обміри складних інженерних об'єктів, відновити проєктну документацію та створити тримірну модель з достатньою деталізацією для подальшої обробки в різних програмних комплексах. Активне впровадження технології лазерного сканування у будівництві відповідає концепції "Індустрії 4.0" та забезпечує сучасний технічний рівень вирішення широкого кола завдань сталого розвитку міст та ОТГ в умовах урбанізації територій.

The relevance of reconstruction of urban infrastructure has increased when solving modern tasks of sustainable development of cities and united territorial communities in the conditions of urbanization of territories, including engineering structures, engineering networks, and landscape objects. The active introduction of laser scanning technology in construction corresponds to the concept of "Industry 4.0" and provides a modern technical level of solving a wide range of tasks in the construction field.

During laser scanning, data is transmitted about the dimensions, orientation in space, the location of the supporting structures of the object, etc. With the help of this method, high accuracy of measurements is ensured and significantly saves time for

object research. This technology makes it possible to obtain high-precision measurements of complex engineering objects, restore design documentation, create a 3D model of the object with sufficient detail for further processing in various software packages. Therefore, the article analyzes the directions of using laser scanning technology for the reconstruction of engineering structures, engineering and transport networks, the landscape of urban areas and wilderness areas.

The main areas of use of laser scanning technology for scientific research in construction are analyzed. The possibilities of this technology to integrate the data of 3D models obtained by laser scanning in BIM with other application programs are emphasized. In particular, such integration can be applied to the research of: elements of building structures; pipelines and their working environments; engineering networks, landscape in accounting and informational, billing, GIS software products for municipal institutions, enterprises; characteristics of energy efficiency of buildings and facilities, engineering networks. The development of such integration is constantly expanding.

Laser scanning technologies facilitate the task of developing a landscape project during the reconstruction of the territory with changes: in its development; planning solutions for transport and pedestrian routes, engineering structures and networks, landscaping and greening; designing objects of landscape architecture in the conditions of the existing restrictions of the territory from the side of buildings, relief and other factors of the territory of the urban environment.

Ключові слова: реконструкція, інженерні споруди, інженерні мережі, транспортні мережі, ландшафтна архітектура, технологія лазерного сканування, тривимірна модель об'єкта, урбаністичний аналіз.

Keywords: reconstruction, engineering structures, engineering networks, transport networks, landscape architecture, laser scanning technology, three-dimensional object model, urban analysis.

Постановка проблеми. За останнє десятиліття значно зросла актуальність потреби широкого впровадження у будівництво концепції "Індустрії 4.0" [1]. Це також стосується і реконструкції та відбудови об'єктів міської забудови та інфраструктури, у тому числі – інженерних споруд та мереж. Особливо важливого змісту такі завдання набувають у воєнний час, для якого характерні значні руйнування великої кількості об'єктів, як це ми бачимо на території України під час теперішньої повномасштабної війни, розв'язаної Росією.

При реконструкції та реставрації об'єктів окрім визначення основних геометричних характеристик потрібна інформація про наявність різних видів деформацій елементів будівельних конструкцій (крени, прогини, тріщини, зсуви тощо), а також – про наявність зовнішніх дефектів, які виникли під час експлуатації досліджуваних об'єктів.

Реконструкція пам'яток архітектури потребує вирішення завдань щодо збереження історичного зовнішнього вигляду об'єкта в цілому та його елементів.

Модернізація та реконструкція об'єктів житлового фонду, лінійних об'єктів інженерно-транспортної інфраструктури (транспортних та інженерних мереж тощо) вимагає визначення точних обмірних розмірів для розробки проектних рішень із відновлення їх експлуатаційної придатності.

Досить часто виникає проблема у відсутності первинної проектною документації об'єкта реконструкції або вона не відповідає дійсності.

Вирішити усі ці завдання допомагає технологія лазерного сканування. Вона дає можливість за досить короткий час з мінімальними затратами отримати тривимірну модель об'єкта з достатньою деталізацією для подальшої обробки в різних програмних комплексах.

Аналіз відомих досліджень і публікацій. Активний інтерес дослідників до теоретичних та практичних питань впровадження лазерних технологій як потужного безконтактного інструменту вимірювання у технічних дослідженнях припадає на 60-ті роки минулого століття і в наш час лише посилюється, завдяки активному розвитку промислового виробництва лазерів, що зумовило можливості здешевлення та доступності, пристосування таких технологій для потреб більшого кола споживачів у різних галузях економіки [2-7 та ін.]. Тому розвиток технологій вимірювань із застосуванням лазера на сьогодні характеризується великою різноманітністю методів, пристосованих до специфічних технічних завдань досліджень.

Завдяки досить високій точності та швидкості вимірювань у поєднанні з теоретичними методами обробки хмар даних та об'ємної (3D) візуалізації їх результатів, застосування лазера дозволяє проводити широкий спектр вимірювань, серед яких:

- створення фізичної або віртуальної тривимірної моделі об'єкта;
- дослідження геометричних параметрів об'єктів (від детальних поверхонь дрібних елементів конструкцій будівель, інженерних споруд, інженерних мереж до великих площ територій планування ландшафту, забудови, лінійних об'єктів інженерно-транспортної інфраструктури з виконанням масштабних геодезичних зйомок супутникової навігації);
- дослідження динамічних характеристик потоку рідин та газів;
- дослідження міцнісних, гідравлічних та інших характеристик матеріалів, конструкцій (у гібридних методах із застосуванням лазерних вимірювань) [2-13 та ін.].

Використання технологій лазерного сканування для вирішення будівельних завдань сталою розвинутих міст є актуальною темою як в Україні так і в усьому світі. Це підтверджується і тим, що за даною тематикою постійно зростає кількість публікацій теоретичних досліджень, зокрема у наукометричних базах даних [2, 13 та ін.], а одночасно з ними – публікацій практичного характеру щодо використання інструментів лазерного сканування об'єктів (наземного та за допомогою різних типів

БПЛА) у різних сферах будівництва. Зокрема, швидко збільшується об'єм відповідних наукових та науково-популярних публікацій на інтернет-порталах, присвячених практичним аспектам виконання робіт з лазерного сканування [3-7 та ін.].

Світовий досвід застосування технології лазерного сканування показує, що популярність досліджень в цій галузі зростає з кожним роком. Безліч об'єктів культурної спадщини, серед загальновідомих - Тадж-Махал (Індія), Масада (Ізраїль), собор Нотр-Дам-де-Парі (Франція), собор Санта-Марія-дель-Фьоре (Італія), були обстежені за допомогою лазерного сканування. Багато проєктів за допомогою даної технології реалізовано і в Україні, а саме: сканування Києво-Печерської лаври, старовинної будівлі готелю «Лейпциг», ділянки кільцевої траси М-01, Олександрівської ГЕС, гідротехнічної споруди – гідроагрегату №2 ДніпроГЕС-1, об'єктів культурної та історичної спадщини та багато інших [4-7 та ін.].

Аналіз публікацій про розвиток сучасних технологій на вітчизняному та закордонному будівельному ринку свідчить, що внаслідок технічного прогресу вартість обладнання та робіт з лазерного 3D-сканування у галузі будівництва, як і в інших галузях економіки, знижується, а сфера його застосування – розширюється. Зважаючи на це, у статті розглянуто перспективні напрямки використання технологій лазерного сканування для потреб реконструкції об'єктів у будівництві.

Мета статті – визначення напрямків застосування технології лазерного сканування при реконструкції об'єктів інженерних споруд та мереж, ландшафту.

Основні завдання: Основним завданням статті є дослідження можливостей технологій лазерного сканування, з аналізом доцільності використання їх результатів для вирішення питань реконструкції об'єктів інженерних споруд та мереж, ландшафту.

Виклад основного матеріалу. Розвиток технології лазерного сканування у галузі будівництва здійснюється на основі технічних засобів для 3D вимірювань, функціонування яких сумісне з розрахунково-інформаційним програмним забезпеченням комп'ютерних мереж, інформаційних технологій та відповідає завданням впровадження концепції "Індустрії 4.0".

Лазерне сканування у будівництві добре замінює більшість інструментів, які використовують для обмірів, але ще є дорожчим за традиційні методи. Тому на сьогодні його переважно застосовують у ситуаціях, коли потрібна висока точність вимірювань або об'єкт є дуже великим, має складні архітектурні форми або небезпечні умови для вимірювань традиційними методами. Виходячи з цього, технологія лазерного сканування об'єктів у будівництві стає все більш доступною та поширеною і в найближчі роки її застосування стане звичним завданням навіть для невеликих проєктів та об'єктів. Це відповідає напрямкам

революційних змін у розвитку цифрового будівництва у світі, які також характерні і для будівельної галузі України.

Поєднання геодезичних та фотограмметричних приладів дозволило значно спростити більшість геодезичних та обмірних робіт і створити систему тривимірного сканування, втілену у лазерному сканері, і тому таке застосування лазерів у будівництві є одним з найпоширеніших [4-7, 9-13].

Основою роботи лазерного сканера є генерування лазерного променя, який спочатку відбивається від дзеркала, що обертається в двох площинах, а потім від усіх поверхонь на які попадає, відбивається, зчитується сканувальною системою. Вона призначена для моделювання геометричних характеристик вимірюваних об'єктів (форми, розмірів, розташування в просторі). Усі дані записуються в базу приладу. Вимірювання об'єкта інколи здійснюються з однієї точки, але частіше – з багатьох станцій сканування, вибір їх кількості залежить від масштабів сканованого об'єкта.

Отже, метод тривимірного сканування базується на швидких вимірюваннях відстаней від сканера до точок об'єкта з одночасним фіксуванням вертикальних та горизонтальних кутів. Вимірювання виконуються з дуже великою швидкістю – сотні тисяч вимірювань за секунду. Результатом такого сканування будівельного стану об'єкта є хмара точок зі щільних 3D вимірів у тривимірних координатах X, Y, Z, дані якої пройшли попередню обробку з реєстрації та редагування за допомогою програмного забезпечення лазерного сканера, як на прикладі на рис. 1,а. За результатами сканування можна мати зображення об'єктів в чорно-білому варіанті або з цифровою фотофіксацією кольорів (RGB характеристик).

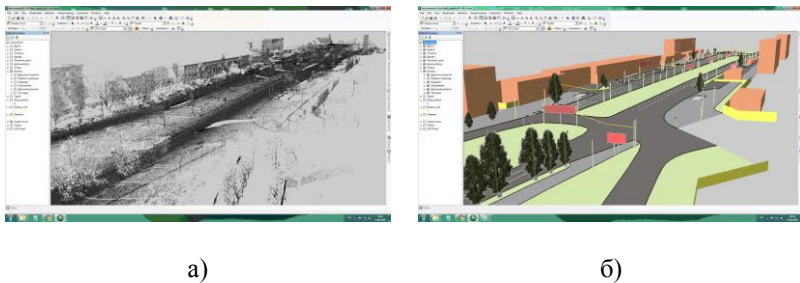


Рис. 1. Хмара точок 3D вимірів (а) та 3D модель зображення у BIM (б) після її обробки

З оброблених на основі моделі CAD (Revit, AutoCAD, ReCap, ArchiCAD та ін.) хмар точок отримуються інформаційні моделі будівель (BIM). Причому процес створення тривимірної моделі об'єкта у BIM

можна здійснювати вручну або з використанням програмного забезпечення на основі методів автоматизації, фотограмметрії та іншої математичної обробки даних сканованих зображень [10-13 та ін.], дослідження з розробки та удосконалення таких методів не припиняються що також підтверджує перспективність застосування технології лазерного сканування у будівництві зокрема. Отже, за допомогою сучасних програмних комплексів можна обробляти хмари сканованих точок та отримувати тривимірні фотореалістичні зображення (рис. 1,б).

Для вихідних даних до реконструкції будь-якого об'єкта бажаним є отримання об'ємної інформації в цифровому вигляді. При лазерному скануванні відбувається передача даних про габарити, орієнтацію в просторі, розташування несучих конструкцій об'єкта тощо. Завдяки цьому методу забезпечується висока точність вимірів та суттєво економиться час на дослідження об'єкта.

Переваги лазерних сканерів в обмірних роботах можна використати при реставрації пам'яток архітектури та реконструкції історичних будівель. В Україні цей напрямок застосування технології лазерного сканування є одним з найбільш поширених. Цифрова технологія дозволяє зробити високоточні обміри важкодоступних архітектурних елементів. Завдяки цьому значно скорочуються терміни виконання обмірів. Архітектурний обмір за даними лазерного сканера містить плани, фасади, розрізи, окремі деталі, при цьому достовірність цієї інформації за рахунок високої автоматизації та точності значно вища, ніж при використанні традиційних приладів.

Лазерне сканування в промисловості є актуальним і одним з перспективних напрямків, адже його можна успішно використати як метод досліджень для проведення реконструкції великої кількості існуючих будівель, споруд та інженерних мереж, технічні рішення яких є складні та небезпечні при застосуванні традиційних методів обстежень. Велике значення при реконструкції насичених технологічними мережами та устаткуванням промислових цехів має просторова інформація про технологічне обладнання та будівельні конструкції. Хмара точок та растрова тривимірна модель, отримані за допомогою лазерного сканера дозволяють не лише правильно запроєктувати реконструкцію, але й істотно знизити витрати на усунення недоліків при виконанні будівельно-монтажних робіт.

Аналогічні питання можна успішно вирішувати при реконструкції громадських та житлових будівель (наприклад, технологічних приміщень плавальних басейнів, ІТП, технічних поверхів).

Технологія вимірювань та 3D моделювання параметрів потоку рідини за допомогою лазера десятиліттями використовується у різноманітних дослідженнях з технічної механіки рідини та газів [2, 8 та ін.], а отже пристосована для досліджень з 3D моделюванням аналогічних процесів

для потреб проектування реконструкції конструкцій інженерних споруд та систем для інженерних мереж, які взаємодіють з рідинами та газами. Наприклад, проектування: інженерних споруд, стійких до різноманітних зовнішніх впливів природного та техногенного походження (вітру; дощу, зливи, граду, снігопаду та хуртовини; паводків, цунамі та інших екстремальних погодних явищ; вибухів тощо); конфігурації та геометричних параметрів (розмірів, шорсткості стінок тощо) каналів, лотків, трубо- та повітропроводів, резервуарів споруд та обладнання інженерних мереж для оптимізації гідравлічних режимів руху рідини чи газу. При цьому технології лазерного сканування можуть застосовуватись для вимірювань та 3D моделювання як потоків рідин та газів, так і взаємодіючих з ними поверхонь елементів конструкцій інженерних споруд та систем. І завдяки перевагам цих технологій суттєво зменшується час від початку дослідних вимірювань до прийняття проектного рішення реконструкції об'єкту, що особливо помітно для об'єктів складних (наприклад, споруди та інженерні мережі міської насосної станції I підйому), масштабних (наприклад, споруди ГЕС), небезпечних (наприклад, споруди АЕС, каналізаційних мереж; інженерні споруди та мережі в аварійному стані).

Аналогічні переваги від застосування технології лазерного сканування і при реконструкції транспортних споруд (наприклад, для обстеження опор мостів через водні перешкоди) та мереж (наприклад, для дослідження параметрів транспортних потоків).

Також, в умовах реконструкції територій земель рекреаційного призначення, існуючий ландшафт, озеленення яких потрібно максимально зберегти (наприклад, територій природного парку [14 та ін.], зоопарку [15 та ін.], міських рекреаційних зон тощо), технології лазерного сканування допомагають не лише провести детальний інженерно-геодезичний моніторинг та проектування території, споруд та мереж, зелених насаджень, об'єктів ландшафтної архітектури та благоустрою тощо, але і так само детально і практично безперервно слідкувати за дотриманням законодавчих та нормативних вимог до виконання будівельних робіт [16 та ін.], а завдяки можливостям цифровізації даних – і мінімізувати будівельне втручання у ландшафт в майбутньому. Звичайно, при цьому зростає вартість будівельних робіт, що слід враховувати при всебічному обґрунтуванні рішень з реконструкції об'єкта, наприклад використовуючи принципи SWOT-аналізу для оцінки будівельних, екологічних, економічних чинників [15 та ін.].

Аналогічні вигоди від впровадження технології лазерного сканування матиме муніципальна влада населених пунктів і ОТГ при прийнятті рішень щодо обґрунтування, проектування, інспектування робіт з реконструкції територій та питань урбаністичного аналізу населених пунктів.

Перспективним є застосування технології лазерного сканування як потужного інструменту для дослідження безконтактним методом технічного стану трубопроводів інженерних мереж. Причому, сучасні технічні розробки дозволяють проводити інспекцію зовнішніх поверхонь трубопроводів та, що технічно складніше, – внутрішніх поверхонь, які безпосередньо взаємодіють з транспортованими трубопроводами робочими середовищами. При цьому, за допомогою вимірювань лазерним сканером можна досліджувати не лише зміни геометрії внутрішнього трубопроводу (овальність, вирівнювання, зміни діаметру трубопроводу від заростання чи засмічування, місця з'єднань трубопроводів, фітингів, арматури, кути повороту, нахилу трубопроводу тощо) чи рівня рідини у ньому, пропускної здатності трубопроводу, але й різні дефекти внутрішніх поверхонь трубопроводу, зокрема розміри ерозії чи корозії, тріщин, що дозволяє вчасно запроєктувати заходи з ремонту, експлуатації, а при потребі – й реконструкції ділянок трубопроводів інженерних мереж.

Зокрема, для робіт з профілометрування трубопроводів та інспекції колодязів інженерних мереж використовується лазерний профайлер (профілометр), який дозволяє визначити безконтактним методом зміни у вертикальній та горизонтальній формі трубопроводів з різних матеріалів із внутрішнім діаметром від 6 дюймів [17, 18 та ін.]. Технологія із застосуванням лазерного профайлера (рис. 2,а) використовує кільце світла, яке генерує лазер на внутрішню поверхню трубопроводу, наприклад систем побутової та дощової каналізації [18]. Закріплена на сканері камера виявляє кільце світла і зберігає лазерне зображення у вигляді зручної для досліджень інтерактивної 3D моделі трубопроводу (рис. 2,б) з можливістю переміщатися по ній.

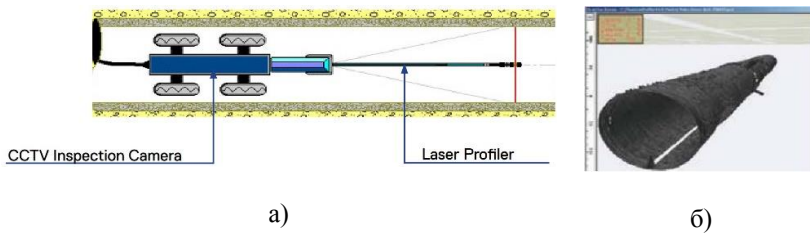


Рис. 2. Схема внутрішнього інспектування трубопроводу за допомогою лазерного профайлера а) та 3D модель трубопроводу у BIM (б) після обробки хмари точок

Причому, адаптоване програмне забезпечення [19] розроблене з можливістю об'єднувати оцифровані дані інспектування трубопроводів та

колодязів з їх ГІС-даними, що дозволяє картографувати систему каналізації вбудованою в середовище міської інфраструктури (рельєфу ландшафту, будівель та споруд, інженерних та транспортних мереж, споруд благоустрою та ландшафтної архітектури, об'єктів озеленення тощо) та завдяки такій двонаправленій інтеграції здійснювати обмін інформацією про її ділянки в режимі реального часу. Подальший аналіз отриманих даних дає можливість прийняти рішення щодо необхідності реконструкції або ремонту каналізаційної мережі. Аналогічно даний метод інспекції трубопроводів може також бути використаний для удосконалення процесу прогнозування надійності роботи трубопроводів систем інших інженерних мереж (водо-, тепло-, газопостачання тощо).

У більшості пристроїв технології лазерного сканування у будівельній галузі лазер фіксує будь-які незначні зміни в геометрії поверхонь з міліметровою точністю. Тому при реконструкції він зокрема може застосовуватись у методах візуального моніторингу стану елементів конструкцій будівель та споруд [20, 21 та ін.]. Також, лазерне сканування можна використовувати для відповідної точності експериментальних досліджень міцнісних характеристик елементів будівельних конструкцій, наприклад для уточнення та удосконалення методик їх розрахунку [22, 23 та ін.] із перевіркою збіжності теоретичних результатів з експериментальними. Особливо цікавою є можливість порівняння 3D моделей, отриманих теоретично чисельними методами [22, 23 та ін.] із 3D моделями відтворення у ВІМ лазерного сканування результатів експериментів (або лазерного сканування у складі гібридного методу досліджень – з використанням і інших методів визначення експериментальних показників та характеристик). Перспективним дослідженням є розробка теоретичного методу двонаправленої взаємодії та інтеграції цих 3D моделей, коли вони одна одну корегують в напрямку отримання заданої збіжності результатів, що дозволить оптимізувати методику інженерного розрахунку таких 3D змодельованих елементів будівельних конструкцій.

Одним із важливих напрямків реконструкції будівель та споруд, інженерних мереж є роботи з підвищення їх енергоефективності шляхом модернізації, реновації об'єктів. При цьому для великих та архітектурно, геометрично складних будівель та споруд досить технічно складним завданням є отримання 3D чи принаймні 2D моделі елементів зовнішньої оболонки об'єкта (фасадів, даху і покрівлі, підвалів тощо) та оболонки внутрішніх просторів складної геометрії. Аналогічні проблеми стосуються моделювання геометрично складних комбінацій інженерних мереж. У Точність відтворення геометричних моделей таких об'єктів може суттєво впливати на адекватність результатів розрахунку їх показників енергоефективності згідно нормативних методик [24, 25]. У цьому випадку впровадження технології лазерного сканування у методику розрахунку

енергоефективності об'єкту дозволяє не лише отримати його оцифровану 3D модель у BIM для розрахунків геометричних показників високої точності, але й проводити інтеграцію цієї моделі з результатами інфрачервоної термографії об'єкта (наприклад, за методологією [25]), проведеними до та після реконструкції для контролю результатів на кожному з її етапів – від отримання вихідних даних до енергоаудиту виконаних будівельних робіт.

Завдяки можливості сканування з великої відстані, технологію лазерного сканування можна дуже широко застосовувати в сфері дорожнього будівництва. Складність при зйомці транспортно-пішохідних шляхів (вулиць, доріг, вело- та пішохідних доріжок тощо) традиційними методами, особливо в міських умовах з великою кількістю учасників та інтенсивністю їх руху, – це необхідність зупинки руху автотранспорту та інших учасників руху. Зйомка методом лазерного сканування дозволяє уникнути цієї негативної специфіки. Так, для проектування реконструкції доріг та дорожньо-транспортних споруд, таких як мости та шляхопроводи, доцільно використати цю технологію для створення топографічних планів та профілів. Також, при використанні такої технології можна дуже швидко виявити та виміряти усі дефекти дорожнього покриття.

Аналогічно застосовуючи технологію лазерного сканування можна вирішувати будівельні завдання (на етапах проектних, будівельних робіт) і для потреб реконструкції інженерних мереж, благоустрою та озеленення територій. Це особливо актуально для міських умов, для яких характерна висока складність інфраструктури та урбанізованого ландшафту. Наприклад, для коригування базових параметрів генпланів міст високоурбанізованих територій Луганської та Донецької областей України [26], технологія лазерного сканування буде ефективним інструментом вирішення питань на рівні міських агломерацій.

Також, технології лазерного сканування полегшують завдання розробки проекту ландшафту при реконструкції території зі змінами: у її забудові; планувальних рішеннях транспортно-пішохідних шляхів, інженерних споруд та мереж, благоустрою та озеленення; проектуванні об'єктів ландшафтної архітектури в умовах існуючих обмежень території з боку забудови, рельєфу та інших чинників території міського середовища.

Висновки. Отже, технології лазерного сканування, які на сьогодні технічно та технологічно стрімко розвиваються, сприяють революційному розвитку цифровізації галузі будівництва і мають високий потенціал у забезпеченні нових можливостей для ефективного вирішення питань та оптимізації процесів при реконструкції інженерних споруд та мереж, ландшафту. За допомогою лазерного 3D сканування можна:

- в короткий термін (а отже зі значно підвищеною продуктивністю робіт) проводити високоточні детальні обміри складних інженерних об'єктів та отримати тривимірну модель з фотореалістичним зображенням;

- відновити/оновити проєктну документацію, необхідну для проведення робіт з реконструкції, ремонту та експлуатації об'єкта;
- проводити спостереження за просторовими деформаціями конструкцій будівель та споруд, трубопроводів та інших елементів конструкцій інженерних мереж шляхом порівняння з раніше проведеними вимірами (довгостроковий моніторинг об'єктів);
- виявляти зовнішні дефекти, оцінювати їх масштаби при польових та лабораторних дослідженнях залізобетонних конструкцій (сколи, нерівності, раковини, відшарування захисного шару арматури тощо) та інших елементів будівель і споруд, обладнання та трубопроводів інженерних мереж;
- інтегрувати дані 3D моделей у BIM з іншими прикладними програмами для досліджень: елементів будівельних конструкцій; трубопроводів та їх робочих середовищ; інженерних мереж, будівель та споруд, ландшафту в розрахунково-інформаційних, білінгових, ГІС програмних продуктах для муніципальних установ, підприємств; характеристик енергоефективності будівель та споруд, інженерних мереж;
- підвищити ефективність гібридної оцінки технічного стану (коли технологія лазерного 3D сканування поєднується з іншими технологіями досліджень) зовнішніх та внутрішніх поверхонь трубопроводів при інспекції інженерних мереж з метою виявлення і аналізу дефектів та пошкоджень;
- отримати топографічні плани існуючого стану місцевості та ідентифікувати процес проєктування при реконструкції лінійних об'єктів інженерно-транспортної інфраструктури (транспортних та інженерних мереж тощо), в тому числі:
 - отримати цифрову модель рельєфу та дорожнього покриття, трасування трубопроводів інженерних мереж;
 - реконструювати або розробити нові поперечні та поздовжні профілі дороги, інженерних мереж;
 - проводити топозйомку лінійних об'єктів, місцевості (мости, дороги, тунелі, залізниці, споруди інженерних мереж тощо);
 - контролювати якість виконання робіт з реконструкції одного чи одночасно комплексу з багатьох лінійних об'єктів інженерно-транспортної інфраструктури (транспортних та інженерних мереж тощо), в тому числі – шляхом порівняння результатів сканування з проєктною документацією;
 - відстежувати зміни у зовнішньому вигляді вулиць (моніторинг благоустрою та озеленення, незаконного будівництва тощо);
 - контролювати стан зелених насаджень (міських рекреаційних зон, національних природних парків тощо);
 - оптимізувати маршрутні польові дослідження територій озеленення (розбивка, облаштування алей, доріжок, садових лавочок; реконструкція

насаджень; проектування посадки нових дерев і кущів; обґрунтування очищення території від захаращеності, обсягів земляних робіт тощо);
- оптимізувати проєктні, будівельні роботи з благоустрою територій.

References

1. Hermann M., Pentek T., Otto B. Design principles for industrie 4.0 scenarios. *49th Hawaii international conference on system sciences (HICSS)*. 2016. pp. 3928-3937. URL: <https://doi.org/10.1109/HICSS.2016.488>
2. Wu C., Yuan Y., Tang Y., Tian B. Application of Terrestrial Laser Scanning (TLS) in the Architecture, Engineering and Construction (AEC) Industry. *Sensors*. 2022. No 22(1). pp. 265. URL: <https://doi.org/10.3390/s22010265>
3. Hexagon AB. URL: <https://hexagon.com/>
4. Leica Geosystems AG. URL: <https://leica-geosystems.com/en-us/>
5. PromScan3D. URL: <https://www.promscan3d.com/>
6. AERO3D engineering. URL: <https://aero3d.ua>
7. Мірничий - геодезично-геологічна група. URL: <https://mirnychyj.com.ua/>
8. Xi W., Lu W. G. Formation mechanism of an adherent vortex in the side pump sump of a pumping station. *International Journal of Simulation Modelling*. 2021. Vol. 20. Is. 2. pp. 327-338. URL: <https://doi.org/10.2507/IJSIMM20-2-562>
9. Uhl A. V., Melnyk, O. V., Rudyk O. V., Melnyk Yu. A., Synii S. V. Principles of modeling dynamic systems for geodetic monitoring of structures. *Modern technologies and methods of calculations in construction*. 2021. Vol. 15. pp. 85-92. URL: [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2021-5\(15\)-12](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2021-5(15)-12)
10. Melnyk V. M., Shostak A. V. *Kilkisna stereomikrofraktohrafiia: monohrafiia*. Lutsk: PVD «Tverdynia», 2010. 460 s.
11. Markova M., Kravchenko D. 3D photogrammetry application for building inspection of cultural heritage objects. *Bulletin of PSACEA*. 2018. No 1(237-238). pp. 90-95. URL: <https://doi.org/10.30838/J.BPSACEA.2312.170118.82.44>
12. Divakov V. V., Moskalkova Yu. G. Application of photogrammetry for the in-field building structural survey. *Problemy intehrovanooho rozvytku mist: zb. tez dop. mizhn. nauk.-prakt. konf. uch. ta stud.* Lutsk: LNTU-KNUBA, 2020. S.32-36. URL: <https://konf-mbg.wixsite.com/Intu-bci-mbg-2020>
13. Tang P., Huber D., Akinci B., Lipman R., Lytle A. Automatic reconstruction of as-built building information models from laser-scanned point clouds: A review of related techniques. *Automation in Construction*. 2010. Vol. 19. Is. 7. pp. 829-843. URL: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2010.06.007>
14. Synii S. V., Melnyk Yu. A., Sunak P. O., Ksonshkevych L. M., Krantovska O. M. Design of sewerage networks using the principles of SWOT analysis. *Modern technologies and methods of calculations in construction*. 2021. Vol. 16. pp. 171-179. URL: [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2021-6\(16\)-22](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2021-6(16)-22)
15. Synii S. V., Krantovska O. M., Ksonshkevych L. M., Orešković Matija, Sunak P. O. Rationale of structures of fencing of the territory of the Lutsk Zoo, taking into

account the analysis of the history of urbanization of landscape. *Modern technologies and methods of calculations in construction*. 2022. Vol. 17. pp. 138-145. URL: [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2022-7\(17\)-18](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2022-7(17)-18)

16. Han K.; DeGol J.; Golparvar-Fard M. Geometry- and Appearance-Based Reasoning of Construction Progress Monitoring. *J. Constr. Eng. Manag.* 2018. No 144. 04017110. URL: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0001428](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001428)

17. EnviroSight. URL: <https://envirosight.com/>

18. CUES. URL: <https://cuesinc.com/>

19. WinCan. URL: <https://www.wincan.com/en/home/>

20. Rudneva I. Application of laser scanning for monitoring condition of buildings and structures during reconstruction. *Transfer of Innovative Technologies*. 2021. Vol. 4(1). pp. 33-36. URL: <https://doi.org/10.32347/tit2141.0106>

21. Bednarz L, Bajno D, Matkowski Z, Skrzypczak I, Leśniak A. Elements of Pathway for Quick and Reliable Health Monitoring of Concrete Behavior in Cable Post-Tensioned Concrete Girds. *Materials*. 2021. 14(6). 1503. URL: <https://doi.org/10.3390/ma14061503>

22. Krantovska O., Petrov M., Ksonshkevych L., Synii S., Sunak P. Improved engineering method for calculating the strength of the supporting areas of reinforced concrete elements. *MATEC Web of Conferences*. 2018. Vol. 230. 02014. pp. 1-9. URL: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201823002014>

23. Krantovska O., Petrov M., Ksonshkevych L., Orešković M., Synii S., Ismailova N. Numerical simulation of the stress-strain state of complex-reinforced elements. *Technical Journal*. 2019. Vol. 13(2). pp.110-115. URL: <https://doi.org/10.31803/tg-20190417112619>

24. Protsenko S., Novytska O., Kizieiev M. Peculiarities of the new method of calculating the design heat load of building's heating systems according to DSTU EN 12831-1:2017. *Modern Technology, Materials and Design in Construction*. 2019. 25(2). pp. 140-144. <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2018-2-140-144>

25. Previtali, M., Barazzetti, L., Brumana, R. et al. Automatic façade modelling using point cloud data for energy-efficient retrofitting. *Appl Geomat*. 2014. 6. 95-113. URL: <https://doi.org/10.1007/s12518-014-0129-9>

26. Sokolenko V. M., Podlevsky O. E., Sokolenko K. V. Reconstruction of the residential area of an industrial city take into account the demographic condition. *Visnik of the Volodymyr Dahl East Ukrainian national university*. 2019. No 7(255). pp. 60-63. URL: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2019-255-7-60-63>

Список використаної літератури

1. Hermann M., Pentek T., Otto B. Design principles for industrie 4.0 scenarios. *49th Hawaii international conference on system sciences (HICSS)*. 2016. pp. 3928-3937. URL: <https://doi.org/10.1109/HICSS.2016.488>

2. Wu C., Yuan Y., Tang Y., Tian B. Application of Terrestrial Laser Scanning (TLS) in the Architecture, Engineering and Construction (AEC) Industry. *Sensors*. 2022. No 22(1). pp. 265. URL: <https://doi.org/10.3390/s22010265>
3. Hexagon AB. URL: <https://hexagon.com/>
4. Leica Geosystems AG. URL: <https://leica-geosystems.com/en-us/>
5. PromScan3D. URL: <https://www.promscan3d.com/>
6. AERO3D engineering. URL: <https://aero3d.ua>
7. Мірничий – геодезично-геологічна група. URL: <https://mirnychyj.com.ua/>
8. Xi W., Lu W. G. Formation mechanism of an adherent vortex in the side pump sump of a pumping station. *International Journal of Simulation Modelling*. 2021. Vol. 20. Is. 2. pp. 327-338. URL: <https://doi.org/10.2507/IJSIMM20-2-562>
9. Уль А. В., Мельник О. В., Рудик О. В., Мельник Ю. А., Синій С. В. Принципи моделювання динамічних систем при інженерно-геодезичному моніторингу споруд. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*. 2021. Вип. 15. С. 85-92. URL: [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2021-5\(15\)-12](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2021-5(15)-12)
10. Мельник В. М., Шостак А. В. Кількісна стереомікрофрактографія: монографія. Луцьк: ПВД «Твердиня», 2010. 460 с.
11. Markova M., Kravchenko D. 3D photogrammetry application for building inspection of cultural heritage objects. *Bulletin of PSACEA*. 2018. No 1(237-238). pp. 90-95. URL: <https://doi.org/10.30838/J.BPSACEA.2312.170118.82.44>
12. Диваков В. В., Москалькова Ю. Г. Применение фотограмметрии в обследовании зданий и сооружений. *Проблеми інтегрованого розвитку міст: зб. тез доп. міжн. наук.-практ. конф. уч. та студ.* Луцьк: ЛНТУ-КНУБА, 2020. С. 32-36. URL: <https://konf-mbg.wixsite.com/lnu-bci-mbg-2020>
13. Tang P., Huber D., Akinci B., Lipman R., Lytle A. Automatic reconstruction of as-built building information models from laser-scanned point clouds: A review of related techniques. *Automation in Construction*. 2010. Vol. 19. Is. 7. pp. 829-843. URL: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2010.06.007>
14. Синій С. В., Мельник Ю. А., Сунак П. О., Ксьоншкевич Л. М., Крантовська О. М. Проектування каналізаційних мереж з використанням принципів SWOT-аналізу. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*. 2021. Вип. 16. С.171-179. URL: [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2021-6\(16\)-22](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2021-6(16)-22)
15. Синій С. В., Крантовська О. М., Ксьоншкевич Л. М., Орешкович М., Сунак П. О. Обґрунтування споруд огороження території Луцького зоопарку з урахуванням аналізу історії урбанізації ландшафту. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*. 2022. Вип. 17. С. 138-145. URL: [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2022-7\(17\)-18](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2022-7(17)-18)
16. Han K.; DeGol J.; Golparvar-Fard M. Geometry- and Appearance-Based Reasoning of Construction Progress Monitoring. *J. Constr. Eng. Manag.* 2018. No 144. 04017110. URL: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0001428](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001428)
17. Envisights. URL: <https://envisights.com/>

18. CUES. URL: <https://cuesinc.com/>
19. WinCan. URL: <https://www.wincan.com/en/home/>
20. Руднева І. Застосування лазерного сканування для моніторингу стану будівель та споруд при реконструкції. *Трансфер інноваційних технологій*. 2021. Вип. 4(1). С.33–36. URL: <https://doi.org/10.32347/tit2141.0106>
21. Bednarz L, Bajno D, Matkowski Z, Skrzypczak I, Leśniak A. Elements of Pathway for Quick and Reliable Health Monitoring of Concrete Behavior in Cable Post-Tensioned Concrete Girds. *Materials*. 2021. 14(6). 1503. URL: <https://doi.org/10.3390/ma14061503>
22. Krantovska O., Petrov M., Ksonshkevych L., Synii S., Sunak P. Improved engineering method for calculating the strength of the supporting areas of reinforced concrete elements. *MATEC Web of Conferences*. 2018. Vol. 230. 02014. pp. 1-9. URL: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201823002014>
23. Krantovska O., Petrov M., Ksonshkevych L., Orešković M., Synii S., Ismailova N. Numerical simulation of the stress-strain state of complex-reinforced elements. *Technical Journal*. 2019. Vol. 13(2). pp.110-115. URL: <https://doi.org/10.31803/tg-20190417112619>
24. Проценко С. Б., Новицька О. С., Кізєєв М. Д. Особливості нової методики розрахунку проектного теплового навантаження систем опалення будівель за ДСТУ EN 12831-1:2017. *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*. 2019. Т.25. №2. С.140-144. URL: <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2018-2-140-144>
25. Previtali M., Barazzetti L., Brumana R. et al. Automatic façade modelling using point cloud data for energy-efficient retrofitting. *Appl Geomat*. 2014. 6. 95-113. URL: <https://doi.org/10.1007/s12518-014-0129-9>
26. Соколенко В. М., Подлевський О. Е., Соколенко К. В. Реконструкція забудови індустріального міста з урахуванням демографічного стану. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. 2019. №7(255). С.60-63. URL: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2019-255-7-60-63>