

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ІВАНО-ФРАНКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
НАФТИ І ГАЗУ
Інститут архітектури, будівництва та енергетики
Кафедра геодезії та землеустрою

Лящик Тетяна Віталіївна
(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК528.4
(індекс)

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

**Застосування сучасних геодезичних технологій при експлуатації залізничної
інфраструктури**
(назва роботи)

Геодезія та землеустрій
(назва освітньої програми)

193 Геодезія та землеустрій
(шифр і назва спеціальності)

Здобувач освітнього ступеня Лящик Т. В.
(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник доц., к.т.н. Романюк В. В.
(підпис, прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання керівника)

Допущено до захисту

Завідувач кафедри

проф. Приходько М.М.
(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

Рецензент

доц.

(посада)(підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

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

Івано-Франківськ
2025 р.

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

(повне найменування закладу вищої освіти)

Інститут архітектури, будівництва та енергетики

Кафедра геодезії та землеустрою

Освітній рівень бакалавр

Спеціальність 193 Геодезія та землеустрій

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри _____

Приходько М. М.

«___» _____ 2025 року

**З А В Д А Н Н Я
НА БАКАЛАВРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ**

Лящик Тетяні Віталіївній

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: ” Застосування сучасних геодезичних технологій при експлуатації залізничної інфраструктури”

керівник роботи _____ доц., к.т.н . Романюк Володимир Васильович

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

затвержені наказом закладу вищої освіти _____ від _____

2. Строк подання студентом роботи _____

3. Вихідні дані до роботи: 1.Топографо-геодезичні роботи на залізничній колії 2. Технічні характеристики геодезичних приладів

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):

1. Теоретичні основи геодезичного забезпечення залізничної інфраструктури 2. Огляд сучасних геодезичних технологій та приладів при моніторингу залізниць 3. Сучасні цифрові системи контролю та управління залізничною інфраструктурою

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень):

1. Карта залізниць України 2. Глобальна навігаційна супутникова система_3.
 Шляховимірювальна система Trimble GEDO CE_4.Обладнання Trimble GEDO
 6. Консультанти розділів роботи

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

7. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів бакалаврської роботи	Термін виконання	Примітка
1	Отримання завдання на виконання бакалаврської роботи. Ознайомлення з літературою.	24.02.2025	
2	Ознайомлення з існуючою залізною дорожньою інфраструктурою .	03.03.2025	
3	Аналіз існуючого досвіду проведення моніторингу залізною дорожньої інфраструктури.	24.03.2025	
4	Аналіз та класифікація існуючих геодезичних методів проведення моніторингу залізною дорожньої колії	07.04.2025	
5	Створення методики автоматизованого збору технічних параметрів залізничної інфраструктури використовуючи сучасні геодезичні методи	30.04.2025	
6	Написання висновків та пропозицій щодо виконаної дослідницької роботи.	05.06.2025	

Студент _____
 (підпис)

Лящик Т.В.
 (прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____
 (підпис)

Романюк В.В.
 (прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Дипломна робота присвячена дослідженню застосування сучасних геодезичних технологій у процесі експлуатації залізничної інфраструктури. Актуальність теми зумовлена необхідністю забезпечення високої точності геометричних параметрів залізничних колій, своєчасного виявлення деформацій конструкцій та оптимізації технічного обслуговування інфраструктурних об'єктів.

У першому розділі роботи розглянуто теоретичні основи геодезичного забезпечення залізничної інфраструктури. Надано характеристику основних об'єктів залізничної мережі. Окреслено роль геодезичних робіт в процесі обслуговування, контролю технічного стану та планової модернізації залізничних об'єктів. Проаналізовано вимоги до точності геодезичних вимірювань у галузі.

У другому розділі наведено огляд сучасних геодезичних технологій, які застосовуються для моніторингу та діагностики стану залізниць. Розглянуто супутникові технології (GNSS, GPS), використання лазерного сканування (LiDAR) та методи дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) та фотограмметрії з використанням безпілотних літальних апаратів.

У третьому розділі розглянуто сучасні геодезичні рішення для ефективного управління та технічного супроводу залізничної інфраструктури. Запропоновано комплекс рішень компанії Trimble, зокрема система Trimble GEDO, яка забезпечує повний цикл геодезичного супроводу — від збору даних у полі до камеральної обробки. Висвітлено функціональні можливості польового та офісного програмного забезпечення GEDO, а також наведено основні переваги його впровадження у залізничну галузь.

Дипломна робота може бути використана в практичній діяльності інженерно-геодезичних підрозділів залізниць, а також використовуватись у навчальному процесі при підготовці фахівців з інженерної геодезії, транспорту та управління інфраструктурою.

Ключові слова: залізнична інфраструктура, моніторинг колії, Trimble GEDO, геоінформаційна система, експлуатація залізниці.

ABSTRACT

The diploma thesis is devoted to the study of the application of modern geodetic technologies in the operation of railway infrastructure. The relevance of the topic is determined by the need to ensure high accuracy of the geometric parameters of railway tracks, timely detection of structural deformations, and optimization of the maintenance of infrastructure facilities.

The first chapter of the thesis examines the theoretical foundations of geodetic support for railway infrastructure. It provides a description of the main components of the railway network. The role of geodetic work in the maintenance, technical condition control, and scheduled modernization of railway facilities is outlined. The requirements for the accuracy of geodetic measurements in the industry are analyzed.

The second chapter presents an overview of modern geodetic technologies used for monitoring and diagnosing the condition of railways. It considers satellite technologies (GNSS, GPS), the use of laser scanning (LiDAR), and methods of remote sensing (RS) and photogrammetry using unmanned aerial vehicles (UAVs).

The third chapter examines modern geodetic solutions for effective management and technical support of railway infrastructure. A comprehensive solution by Trimble is proposed, specifically the Trimble GEDO system, which provides a full cycle of geodetic support — from field data collection to office (post-processing) analysis. The functional capabilities of the GEDO field and office software are presented, along with the main advantages of its implementation in the railway sector.

The thesis can be applied in the practical work of engineering and geodetic departments of railways, as well as used in the educational process for training specialists in engineering geodesy, transportation, and infrastructure management.

Keywords: railway infrastructure, track monitoring, Trimble GEDO, geoinformation system, railway operation

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ГЕОДЕЗИЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЗАЛІЗНИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ	9
1.1. Характеристика об'єктів залізничної інфраструктури	9
1.2. Роль геодезії в експлуатації та обслуговуванні залізничних об'єктів	12
1.3. Вимоги до точності геодезичних вимірювань у залізничній галузі.....	16
2. ОГЛЯД СУЧАСНИХ ГЕОДЕЗИЧНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ТА ПРИЛАДІВ ПРИ МОНІТОРИНГУ ЗАЛІЗНИЦЬ	21
2.1. Супутникові технології (GNSS, GPS) у моніторингу залізниць	21
2.2. Лазерне сканування (LiDAR) та його застосування	25
2.3. Дистанційне зондування Землі (ДЗЗ) та фотограмметрія з БПЛА	29
3. СУЧАСНІ ЦИФРОВІ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ТА УПРАВЛІННЯ ЗАЛІЗНИЧНОЮ ІНФРАСТРУКТУРОЮ	35
3.1 Геоінформаційні системи для управління інфраструктурою	35
3.2 Комплекс рішень для дотримання якості у залізничній галузі	39
3.3 Польове та офісне програмне забезпечення Trimble GEDO.....	42
ВИСНОВКИ.....	47
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	49

ВСТУП

Розвиток транспортної інфраструктури є однією з ключових передумов економічного зростання та інтеграції держави у світові логістичні системи. Залізничний транспорт відіграє особливо важливу роль у забезпеченні масових перевезень вантажів і пасажирів на далекі відстані. Ефективне функціонування залізниць безпосередньо залежить від технічного стану інфраструктури, яка потребує постійного контролю, своєчасного обслуговування та модернізації. У цьому контексті зростає значення геодезичного забезпечення як інструменту просторового контролю, виявлення деформацій та оптимізації експлуатаційних рішень. Сучасні геодезичні технології дозволяють суттєво підвищити точність вимірювань, автоматизувати процеси збору та обробки даних, а також інтегрувати результати в цифрові моделі управління інфраструктурою.

Актуальність теми підтверджується активним розвитком цифрових технологій у сфері інженерної геодезії. Напрямом дослідження є впровадження комплексних рішень компанії Trimble, зокрема системи Trimble GEDO, яка поєднує апаратні засоби, програмне забезпечення та цифрову аналітику для забезпечення високоточного геодезичного супроводу. Ці рішення дозволяють не лише виконувати вимірювання з міліметровою точністю, а й інтегрувати результати в проєктні системи, забезпечуючи повний цикл — від збору даних до прийняття управлінських рішень.

Метою дипломної роботи є аналіз існуючих геодезичних технологій моніторингу залізничної інфраструктури.

Завдання роботи полягає у:

- Характеристиці основних об'єктів залізничної інфраструктури та аналізі їхньої специфіки з точки зору геодезичного забезпечення.
- Визначенні ролі геодезичних робіт у процесах експлуатації, технічного обслуговування та модернізації залізничних об'єктів.
- Аналізі вимоги до точності геодезичних вимірювань у залізничній галузі відповідно до чинних нормативів і стандартів.

- Дослідженні сучасних геодезичних технологій та приладів, що використовуються при моніторингу стану залізничної інфраструктури.
- Застосуванні супутникових технологій, лазерного сканування, дистанційного зондування та фотограмметрії з використанням БПЛА у геодезичному забезпеченні залізниць.
- Ознайомленні з функціоналом геоінформаційних систем у контексті управління залізничною інфраструктурою.
- Аналізі комплексу рішень компанії Trimble, зокрема системи Trimble GEDO, а також польового й офісного програмного забезпечення, що забезпечує повний цикл геодезичного супроводу.
- Обґрунтуванні переваг використання сучасних геодезичних технологій для підвищення ефективності експлуатації залізничної інфраструктури.

Об'єктом дослідження є залізнична колія та інфраструктура що експлуатується в процесі функціонування залізничної мережі.

Предметом дослідження предметом дослідження є технології та організаційні аспекти проведення моніторингу залізничних колій, а також технічні засоби і програмне забезпечення, що застосовуються у процесі виконання моніторингу.

Практичне значення дипломної роботи полягає у висвітленні можливостей використання сучасних геодезичних технологій для забезпечення надійної експлуатації залізничної інфраструктури. Результати дослідження можуть бути використані для оптимізації процесів технічного обслуговування колійного господарства, покращення якості вимірювань, скорочення термінів виконання робіт, зниження експлуатаційних витрат і підвищення рівня безпеки руху. Запропоновані підходи можуть бути впроваджені в практичну діяльність інженерно-геодезичних підрозділів залізниць, а також використовуватись у навчальному процесі при підготовці фахівців з інженерної геодезії, транспорту та управління інфраструктурою.

1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ГЕОДЕЗИЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЗАЛІЗНИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ

1.1. Характеристика об'єктів залізничної інфраструктури

Залізнична інфраструктура — це складний інженерно-технічний комплекс, що включає сукупність споруд, технічних засобів, мереж та систем, які забезпечують функціонування залізничного транспорту. Вона слугує основою для організації та підтримки безпечного, ефективного та стабільного перевезення пасажирів і вантажів. Важливість надійної інфраструктури в залізничній галузі важко переоцінити, оскільки її стан безпосередньо впливає на швидкість, регулярність та безпеку руху, а також на економічні показники діяльності галузі загалом [1,2].



Рис. 1.1- Карта залізниць України

Залізнична інфраструктура поділяється на декілька ключових категорій, кожна з яких виконує певну функціональну роль і має свої особливості з точки зору геодезичного супроводу.

Одним із найважливіших складових елементів залізничної інфраструктури є колійне господарство. Воно включає залізничні колії, стрілочні переводи, пристрої кріплення, баласт, під'їзні шляхи та інші елементи. Основним завданням колійного

господарства є забезпечення переміщення рухомого складу з необхідним рівнем безпеки та комфорту [1].

Залізнична колія складається з двох рейок, закріплених на шпалах, які укладаються на баластову призму. Геометричні параметри колії, такі як ширина, ухил, підйом, кривизна, повинні суворо відповідати технічним нормам, оскільки навіть незначні відхилення можуть призвести до серйозних наслідків — від зниження швидкості до аварійних ситуацій. У зв'язку з цим регулярне геодезичне обстеження колій, контроль за зміщеннями, деформаціями та осіданнями є критично важливим [3].



Рис.1. 2 – Залізнична колія

Особливу увагу в межах колійного господарства приділяють стрілочним переходам — спеціальним пристроям, які дозволяють поїздам переходити з однієї колії на іншу. Вони є найбільш складними в плані конструкції та експлуатації, і вимагають постійного моніторингу їхнього просторового положення. Навіть незначні зсуви можуть порушити роботу механізмів переходу та створити загрозу безпеці руху [1].

До інженерних споруд, які є невід'ємною частиною залізничної інфраструктури, належать мости, шляхопроводи, тунелі, віадуки, естакади, насипи, виїмки тощо. Ці об'єкти забезпечують безперервність і геометричну стабільність колійного шляху в умовах складного рельєфу та різних природних перешкод [1,2].

Мости та шляхопроводи є особливо важливими об'єктами, оскільки вони піддаються постійним динамічним навантаженням і схильні до впливу зовнішніх

факторів: температурних коливань, зволоження, вітрових навантажень, осідань ґрунту. Геодезичний моніторинг мостів дозволяє своєчасно виявляти вертикальні та горизонтальні переміщення, нахили опор, деформації прогонових будов [3].

Насипи та виїмки утворюють профіль залізничної колії та визначають її висотне положення. Вони мають властивість змінювати свою форму з часом під впливом ерозії, опадів, підземних вод і навантажень. Геодезичні спостереження за ними дозволяють фіксувати зсуви, просідання та інші потенційно небезпечні процеси [3].

Тунелі, що проходять крізь гористу місцевість або щільну міську забудову, є об'єктами підвищеного ризику, адже їх стійкість залежить не лише від якості будівництва, але й від геологічних умов. Геодезичний контроль тут особливо важливий на етапі експлуатації, коли можуть проявитися вторинні деформації обшивки, просідання чи тріщини [3].

Іншою важливою складовою інфраструктури є залізничні станції, сортувальні та пасажирські термінали, а також зупиночні пункти. Вони слугують для здійснення посадки й висадки пасажирів, навантаження й розвантаження вантажів, формування поїздів, обробки вагонів [1,2].

З геодезичної точки зору ці об'єкти також потребують контролю. Особливо це стосується платформ, які повинні залишатися на певній висоті щодо рівня рейок. Порушення геометрії платформи може створити перешкоди при посадці пасажирів або викликати травмонебезпечні ситуації [3].

На території станцій розташовані численні колії, стрілочні переводи, навантажувальні майданчики, адміністративні й технічні будівлі. Усі ці об'єкти потребують постійного геодезичного супроводу, особливо при проведенні реконструкцій, модернізації чи будівництва нових елементів [1].

Для забезпечення безпеки та ефективного управління рухом поїздів велике значення мають системи сигналізації, диспетчеризації та енергопостачання. До них належать світлофори, шлагбауми, релейні системи, датчики руху, контактна мережа, трансформаторні підстанції тощо [3].

Геодезичне забезпечення тут полягає у точному встановленні просторового положення пристроїв, трасування кабельних ліній, перевірці правильності монтажу

контактної мережі, а також у визначенні напруги ліній електропередачі. Для електрифікованих залізниць точність установки контактного проводу має вирішальне значення, оскільки він повинен забезпечувати надійний контакт з токоприймачем при русі потягу.

Сучасні системи автоматизованого керування рухом (АСУТП) часто інтегруються з геоінформаційними базами даних, що зумовлює потребу в регулярному оновленні геопросторової інформації, отриманої за допомогою геодезичних методів.

До інфраструктурних об'єктів також належать депо, ремонтні цехи, майстерні, склади, пункти технічного огляду рухомого складу, адміністративні та допоміжні споруди. Їхня геометрична стабільність і функціональність визначаються також технічним станом території, на якій вони розташовані [3].

Геодезичне обстеження в цьому випадку виконується як у формі зйомок для проектування та реконструкції, так і у вигляді постійного моніторингу стану фундаментів, поверхонь, прилеглої інфраструктури (доріг, майданчиків, водовідведення тощо).

Залізнична інфраструктура включає в себе велику кількість різноманітних за функціональним призначенням, конструктивними особливостями та експлуатаційними умовами об'єктів. Їхній стан має вирішальний вплив на загальну ефективність і безпеку функціонування залізничного транспорту. Своєчасне та точне геодезичне забезпечення є обов'язковою умовою для підтримки цих об'єктів у належному технічному стані. Сучасні геодезичні технології відкривають нові можливості для моніторингу, моделювання та управління залізничною інфраструктурою, що особливо важливо в умовах підвищених вимог до безпеки та зростаючих навантажень на транспортну систему.

1.2. Роль геодезії в експлуатації та обслуговуванні залізничних об'єктів

Геодезія, як галузь науково-технічного знання, що займається визначенням форми, розмірів і взаємного розташування об'єктів на земній поверхні, відіграє надзвичайно важливу роль у забезпеченні надійної та безпечної експлуатації залізничної інфраструктури. Вона є однією з ключових складових у процесах

будівництва, реконструкції, контролю, моніторингу та обслуговування об'єктів залізничного транспорту [4].

Залізнична галузь характеризується великою протяжністю об'єктів, значною складністю просторової геометрії та високими вимогами до точності розташування елементів. Тому геодезичне забезпечення — невід'ємна складова всіх етапів життєвого циклу інфраструктури: від планування та проектування — до поточного контролю та модернізації [5].



Рис. 1. 3 – Складність просторової геометрії у залізничній галузі

Після завершення будівництва об'єктів інфраструктури залізниці, їхній технічний стан потребує постійного моніторингу. Експлуатація передбачає інтенсивне навантаження на всі складові залізничного комплексу, зокрема на колію, мости, тунелі, платформи, контактну мережу тощо. Протягом часу відбуваються процеси зношування, деформацій, осідань, зсувів ґрунтів, коливань конструкцій — усе це вимагає геодезичного спостереження з метою запобігання аварійним ситуаціям [6].

Основними видами геодезичних робіт у період експлуатації є моніторинг просторового положення елементів залізничної колії, що дає змогу контролювати вертикальні та горизонтальні зміщення, зміни ухилів, відхилення від проектного положення. Геодезичні спостереження дозволяють завчасно виявити деформації, які можуть призвести до аварій. Важливою складовою є також спостереження за станом інженерних споруд — мостів, тунелів, віадуків — що передбачає вимірювання

прогинів, осідань, нахилів опор, які можуть свідчити про втрату несучої здатності конструкцій. Особливу увагу приділяють контролю контактної мережі, що особливо актуально для електрифікованих дільниць. Геодезичне забезпечення дає змогу точно витримувати параметри висоти та розташування контактного проводу щодо колії, що є критично важливим для стабільного енергоживлення рухомого складу. Крім того, геодезичне супроводження ремонтних робіт охоплює реконструкції, заміну рейкошпального ґрату, оновлення стрілочних переводів і передбачає винос проектних рішень в натуру, перевірку точності виконання та фіксацію фактичного стану [4,5].

Геодезія вимагає дотримання високих стандартів точності. Наприклад, при спостереженні за станом рейок допускається похибка в межах міліметрів, оскільки відхилення навіть у кілька сантиметрів можуть спричинити розбалансування руху поїзда, збільшення зносу коліс, колійного полотна, або навіть сходження з рейок [6].

Регулярність спостережень залежить від типу об'єкта, інтенсивності навантаження та геотехнічних умов місцевості. Для деяких об'єктів (наприклад, мостів, складних інженерних споруд) передбачено постійний моніторинг із застосуванням автоматизованих систем спостереження. Для інших – періодичні геодезичні вимірювання з інтервалом від декількох місяців до одного-двох років [5].

Процеси технічного обслуговування залізничних об'єктів потребують точних геодезичних даних. Наприклад, для вирівнювання колії або усунення локальних деформацій (просідань, викривлень) потрібні дані про фактичне положення рейок. Геодезисти виконують інструментальну перевірку поздовжнього профілю та планового положення колії, визначають місця з відхиленнями від нормативів та передають інформацію технічним службам для виконання ремонтних робіт.

У депо та ремонтних майстернях геодезичні роботи також мають значення. При обслуговуванні рухомого складу використовуються спеціальні стенди та пристрої, розташування яких повинно бути точно витримане згідно з проектом. Залишення відхилень може спричинити неправильну діагностику чи пошкодження техніки.

Один із головних аспектів ролі геодезії — забезпечення безпеки руху. Багато випадків аварій на залізничному транспорті були спричинені неочевидними зміщеннями чи деформаціями конструкцій, які можна було б виявити завчасно при

належному геодезичному супроводженні. Наприклад, осідання опори моста, яка не помічена вчасно, може спричинити розрив колії, тоді як геодезичний моніторинг дозволив би виявити зміну висоти на ранній стадії.

Застосування сучасних технологій, таких як високоточне GNSS-спостереження, лазерне сканування, безпілотні літальні апарати з фотограмметричним обладнанням, значно розширює можливості геодезії в цьому аспекті. Такі системи можуть не тільки фіксувати просторове положення елементів, а й виявляти тенденції змін, прогнозувати можливі наслідки та дозволяти приймати превентивні інженерні рішення.



Рис. 1.4 – БПЛА

У процесі експлуатації залізничної інфраструктури геодезисти тісно співпрацюють з іншими технічними підрозділами: інженерами, проектантами, будівельниками, дорожниками, енергетиками. Дані, отримані геодезичними методами, є базовими для прийняття рішень, планування робіт, складання технічної документації.

Результати геодезичних обстежень оформлюються у вигляді планів, схем, технічних звітів, протоколів [5]. Вони мають офіційний статус і є юридичною підставою для проведення ремонтів, реконструкцій, технічних обстежень.

Крім того, геодезичні дані відіграють важливу роль у формуванні цифрових моделей об'єктів, які все частіше використовуються у сучасному управлінні

залізничною інфраструктурою. Це відповідає сучасній концепції BIM (Building Information Modeling) та «цифрового двійника» транспортних систем [6].

Значення геодезії у забезпеченні точності експлуатаційної документації відіграє важливу роль. Оперативне оновлення картографічної, топографічної та технічної документації неможливе без геодезичних робіт. Зміни в плані забудови, переміщення об'єктів, реконструкції споруд — усе це потребує актуалізації інформації. Геодезисти забезпечують точність планово-висотної основи, що є критичною для всієї галузі. Особливої актуальності це набуває в умовах інтенсивного будівництва, реконструкцій та модернізації. Наприклад, під час електрифікації нової дільниці або підвищення швидкості руху на вже існуючій — вся інфраструктура повинна бути ретельно проміряна та заново відображена в технічній документації.

Таким чином, роль геодезії в експлуатації та обслуговуванні залізничних об'єктів є фундаментальною. Вона охоплює широкий спектр завдань: від точного контролю геометричних параметрів колії — до моніторингу стану складних інженерних споруд, забезпечення безпеки руху, створення цифрових моделей інфраструктури, оновлення технічної документації.

Сучасна геодезія — це не лише вимірювання, а потужний інструмент прийняття рішень, прогнозування та планування. Її значення постійно зростає в умовах ускладнення інфраструктурних об'єктів, збільшення швидкостей руху та вимог до точності. Застосування інноваційних геодезичних технологій дозволяє не лише підвищити ефективність обслуговування залізничних об'єктів, а й забезпечити високий рівень безпеки пасажирських і вантажних перевезень.

1.3. Вимоги до точності геодезичних вимірювань у залізничній галузі

Залізнична інфраструктура є складною технічною системою, що потребує високої точності в проектуванні, будівництві, експлуатації та технічному обслуговуванні. Усі елементи залізничної мережі, починаючи з основи колії та закінчуючи інженерними спорудами, вимагають постійного геодезичного контролю. Точність геодезичних вимірювань у цій галузі має безпосередній вплив на безпеку руху, довговічність елементів інфраструктури, якість виконання будівельно-монтажних робіт і загальну ефективність функціонування транспортної системи [7].

Геодезичні виміри є основою інженерного контролю. Геодезичні вимірювання в залізничному будівництві та експлуатації використовуються для вирішення таких завдань, як створення геодезичних мереж, розроблення планово-висотної основи, винесення в натуру проєктних рішень, спостереження за деформаціями конструкцій та споруд, контроль технічного стану колії, перевірка вертикальності, горизонтальності та планового розташування елементів інфраструктури. В усіх цих випадках застосування точних вимірювань є критично важливим, оскільки навіть незначні похибки можуть призвести до масштабних технічних і фінансових наслідків. Загалом, у залізничній галузі переважають високоточні геодезичні роботи, особливо на етапах реконструкції колії, модернізації станцій, будівництва мостів, тунелів і шляхопроводів. Геодезист повинен забезпечити точність вимірювань відповідно до встановлених нормативів, таких як ДСТУ, СНіПи, інструкції Укрзалізниці тощо [8,9].



Рис.1.5 – Геодезичний контроль

Під точністю геодезичних вимірювань у залізничній справі розуміють ступінь наближення отриманих результатів до дійсного значення координат, висот чи кутів. Похибки вимірювань поділяються на випадкові, систематичні та грубі, і всі вони мають бути зведені до мінімуму.

Основні параметри точності включають лінійну точність, що характеризується відхиленнями у визначенні відстаней між об'єктами, кутову точність, яка є важливою при побудові поворотів колії та стрілочних переводів, а також висотну точність, що має критичне значення при оцінці поздовжнього профілю колії, розміщенні насипів, виїмок, мостів і тунелів. Крім того, значну роль відіграє планова точність, яка є особливо актуальною при вивірці координат опор контактної мережі, будівель станцій, елементів сигналізації та інших об'єктів інфраструктури [7].

Нормативні вимоги до точності геодезичних робіт регламентуються спеціальними документами залізничної галузі, у яких встановлено чіткі межі допустимих похибок для різних типів вимірювань. Зокрема, для нівелювання III класу, що застосовується при спостереженнях за осіданнями споруд, середня квадратична похибка визначення перевищень між суміжними реперами не повинна перевищувати 10 мм на 1 км ходу. При винесенні осі колії в натуру допустима похибка становить не більше ± 2 мм по плану та ± 3 мм по висоті. У випадку монтажу опор контактної мережі допускається відхилення по координатах не більше ± 5 мм. Щодо контрольних спостережень за прогином моста або віадука, то похибка вимірювання не повинна перевищувати ± 1 мм [9].

Ці високі вимоги обумовлені необхідністю гарантувати точне положення колії, що безпосередньо впливає на стійкість поїзда при русі, особливо на високих швидкостях.

Особливості точності при різних видах геодезичних робіт. При топографічній зйомці та створенні планово-висотної основи точність залежить від масштабу. Для масштабів 1:500, що застосовуються при детальному проєктуванні станцій і вузлів, допустимі лінійні похибки в плані не повинні перевищувати 0,2 мм у масштабі карти. Для висотних зйомок точність залежить від класу нівелювання (I–IV).

Під час монтажу рейко-шпальної решітки геодезисти забезпечують точність укладання рейок з допустимим відхиленням у межах 2–3 мм. Важливо також дотримуватись проєктного ухилу, ширини колії, рівняння кривих та переходів.

При контролю осідань та деформацій геодезичний моніторинг часто проводиться з використанням цифрових нівелірів, тахеометрів, лазерних сканерів.

Точність повинна забезпечити виявлення змін на рівні 0,5–1,0 мм, що дозволяє виявити небезпечні тенденції в деформаційних процесах.

Використання системи супутникового позиціонування (GPS, Galileo, ГЛОНАСС) у геодезії на залізничному транспорті забезпечують точність визначення координат у реальному часі до 1–2 см (при використанні RTK-методу). Для задач великої точності (менше 1 см) використовуються постпроцесингові методи.

Безпілотні літальні апарати та лазерне сканування. Фотограмметричні методи та лідарні технології дозволяють отримувати детальні 3D-моделі об'єктів. Точність залежить від налаштувань обладнання, але сучасні БПЛА можуть досягати просторової точності 2–5 см, що прийнятно для оглядового моніторингу, але не завжди достатньо для робіт високої точності.

Точність геодезичних вимірювань залежить не лише від обраних методів і приладів, а й від багатьох зовнішніх чинників. Важливу роль відіграє стан приладів та їх калібрування, адже невідкалібрований тахеометр або нівелір може спричинити систематичні похибки. Метеорологічні умови, зокрема температура, вологість і атмосферний тиск, також мають суттєвий вплив, оскільки змінюють швидкість розповсюдження світла й ускладнюють умови оптичних вимірів. Важливим чинником є наявність чітких ліній видимості: високі будівлі, конструкції чи рухомий склад можуть перешкоджати вимірюванням або спотворювати сигнал GPS. Не менш значущою є кваліфікація виконавців, адже високоточні вимірювання вимагають не лише відповідного технічного оснащення, а й глибоких знань і досвіду. Геодезист повинен уміти не тільки коректно виконати обмір, а й грамотно інтерпретувати отримані результати [8].

У сучасній геодезії широко впроваджуються цифрові технології, які значно підвищують точність вимірювань. Зокрема, цифрові тахеометри з автоматичним наведенням і зчитуванням забезпечують високу точність, що досягає 0,5" для кутових вимірювань і 1 мм + 1 ppm для лінійних. Цифрові нівеліри дозволяють зчитувати перевищення з точністю до 0,3 мм на 1 км подвійного ходу, що значно підвищує надійність результатів при нівелюванні. Інтегровані системи, які поєднують GNSS та тахеометр, дають змогу виконувати комбіновані вимірювання з високою точністю та

значною оперативністю. Однією з найсучасніших технологій є лазерне сканування, яке формує хмару точок з мільйонами координат. Це забезпечує надзвичайно детальну модель об'єкта і дозволяє виявляти навіть найменші деформації конструкцій або елементів інфраструктури [8,7].

2. ОГЛЯД СУЧАСНИХ ГЕОДЕЗИЧНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ТА ПРИЛАДІВ ПРИ МОНІТОРИНГУ ЗАЛІЗНИЦЬ

2.1. Супутникові технології (GNSS, GPS) у моніторингу залізниць

У сучасних умовах розвитку транспортної інфраструктури ключовим напрямом удосконалення систем моніторингу та управління залізничною галуззю є впровадження глобальних навігаційних супутникових систем (GNSS). Ці технології забезпечують високоточне визначення просторового положення об'єктів у режимі реального часу, що дає змогу здійснювати контроль стану залізничного полотна, моніторинг рухомого складу, а також спостереження за деформаціями інженерних споруд. GNSS-технології, до яких входять системи GPS (США), GLONASS (РФ), Galileo (ЄС), BeiDou (КНР), стали невід'ємною частиною геодезичного забезпечення на всіх етапах життєвого циклу об'єктів залізничної інфраструктури [10].

Глобальні навігаційні супутникові системи (GNSS) базуються на принципі вимірювання часу проходження сигналу від супутників до приймача. На основі часу проходження сигналу визначається відстань до супутника (псевдовідстань), а за наявності сигналів щонайменше з чотирьох супутників розраховуються координати приймача в реальному часі. GNSS забезпечує геопросторову прив'язку з точністю від кількох метрів до кількох міліметрів залежно від обраного методу (абсолютного або диференційного) [2].

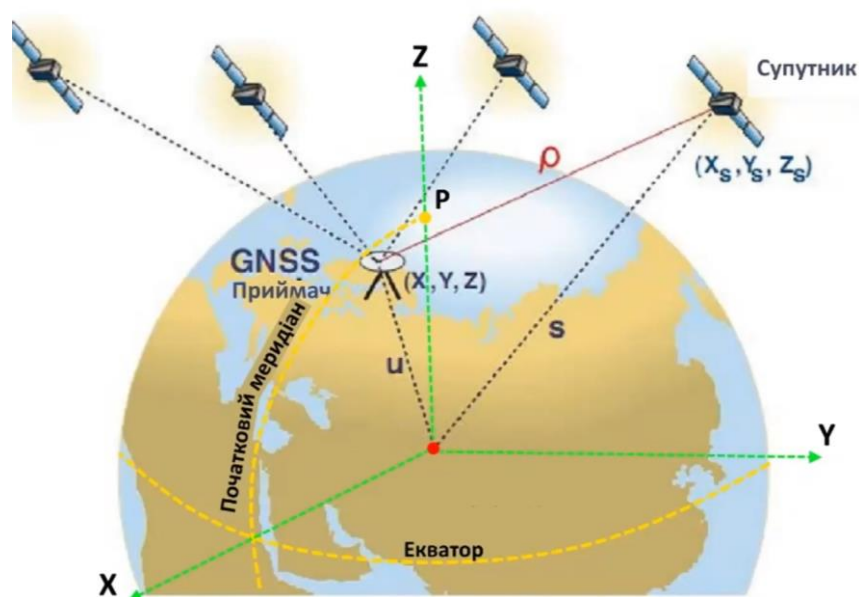


Рис. 2.1 – Глобальна навігаційна супутникова система

У залізничній галузі найчастіше використовуються два основних підходи:

- Абсолютне позиціонування (Single Point Positioning) — застосовується для загальних навігаційних задач, забезпечує точність до 3–10 метрів.

- Диференціальне позиціонування (RTK, PPK, DGPS) — забезпечує сантиметрову точність і використовується для задач високоточного моніторингу та геодезичних робіт.

Одним із головних напрямів застосування GNSS у залізничній галузі є моніторинг технічного стану колій та конструкцій. Використання супутникової навігації дозволяє автоматизувати процеси спостереження, зменшити обсяг ручної праці та забезпечити систематичне збирання даних у важкодоступних районах.

Основні напрямки використання GNSS у залізничному моніторингу охоплюють кілька важливих сфер. Передусім, це моніторинг положення рейкової колії. GNSS-датчики, встановлені на спеціалізованих платформах, таких як геодезичні візки або діагностичні поїзди, дозволяють оперативно визначати положення осі колії, оцінювати її просторове розміщення та відстежувати геометричні зміни в реальному часі. Завдяки цьому можна своєчасно виявити деформації, зміщення або розширення колії, що потенційно небезпечні для руху поїздів. Ще одним важливим напрямком є моніторинг деформацій штучних споруд — мостів, тунелів, шляхопроводів та інших конструкцій, які зазнають впливу навантажень, температурних коливань або ґрунтових зсувів. Стационарні GNSS-приймачі, що працюють у режимі безперервного спостереження, дозволяють фіксувати поступові зміщення опор або осідання насипів із точністю до 1 мм у режимі постобробки (PPK), що особливо актуально для сейсмічно активних або техногенно навантажених регіонів [12,10].

GNSS-технології також широко застосовуються для контролю за рухомим складом: вони використовуються у диспетчерському управлінні поїздами, для моніторингу швидкості, прогнозування часу прибуття, контролю навантажень та вирішення інших логістичних завдань. Супутникова навігація не лише оптимізує маршрути, а й підвищує безпеку руху, наприклад, шляхом автоматичної зупинки поїзда при перевищенні допустимої швидкості або при загрозі зіткнення. У сфері трасування нових ліній GNSS використовується на етапі проєктування та будівництва

для створення геодезичної основи, зйомки рельєфу місцевості, визначення координат проєктних точок і винесення в натуру елементів майбутньої інфраструктури. Використання цифрових GNSS-технологій дозволяє автоматизувати ці процеси та досягати високої точності навіть у складних умовах. Нарешті, важливою сферою є обстеження й оновлення топографічної інформації. Мобільні GNSS-приймачі з функціями GIS дають змогу актуалізувати карти, фіксувати інженерні комунікації, розміщення сигналів, опор контактної мережі та інших об'єктів залізничної інфраструктури [12,11].

Точність GNSS-вимірювань безпосередньо залежить від використовуваної технології, якості обладнання та умов прийому сигналу. У складних міських умовах або в тунелях сигнал може бути частково або повністю відсутній через екранування або мультипас (відбиття сигналу від будівель чи конструкцій). Щоб досягти високої точності, найчастіше застосовуються такі технології:

- RTK (Real-Time Kinematic) — забезпечує точність позиціонування на рівні 1–2 см у режимі реального часу. Потребує базової станції або мережі корекційних станцій [10].

- PPK (Post-Processed Kinematic) — виконується після збору даних, дає аналогічну або вищу точність, придатна для аналізу деформацій та осідань.

- PPP (Precise Point Positioning) — не потребує базової станції, проте вимагає тривалого спостереження (до 30 хвилин) для досягнення сантиметрової точності.

У межах систем моніторингу інженерних споруд GNSS-приймачі можуть працювати цілодобово, передаючи координати в центр керування. Системи автоматично фіксують аномалії та сповіщають відповідальні служби про небезпечні зміни в положенні конструкцій [12].

Застосування GNSS-технологій у моніторингу залізничної інфраструктури має низку беззаперечних переваг. По-перше, це безперервність і оперативність спостережень — система дає змогу здійснювати моніторинг у реальному часі без необхідності зупинки залізничного руху. По-друге, важливою є автоматизація процесів, що значно зменшує вплив людського фактора і забезпечує можливість централізованого керування всією мережею спостережень. Крім того, GNSS-

технології вирізняються високою точністю і надійністю, адже сучасні методи дозволяють досягати міліметрового рівня точності при просторових вимірюваннях. Ще однією перевагою є універсальність застосування — GNSS придатний для вирішення широкого спектра завдань: геодезичних, інженерних, логістичних, безпекових та комерційних. Нарешті, GNSS-дані легко інтегруються з геоінформаційними системами (GIS) та інформаційно-будівельними моделями (BIM), що дозволяє ефективно поєднувати просторову інформацію з інженерними проектами та цифровою документацією [11].



Рис. 2.2- GNSS приймач

Попри численні переваги, GNSS-технології мають і певні обмеження, які важливо враховувати. Зокрема, вони залежать від умов прийому сигналу — у густозабудованих районах, тунелях чи під мостами може виникати втрата сигналу або похибки. Для досягнення високої точності потрібне використання корекційних даних, зокрема RTK/PPK-баз або послуг мереж корекції, таких як SAPOS чи Trimble VRS. Також важливо враховувати енергоспоживання та необхідність захисту устаткування — в польових умовах слід подбати про захист GNSS-приймачів від вібрацій, температурних впливів, вологи та забезпечити їх тривалу автономну роботу. Окрім того, ефективне використання GNSS потребує кваліфікованого персоналу, здатного

налаштовувати апаратуру, інтерпретувати результати спостережень і проводити їх аналіз [10].

Інтеграція GNSS з іншими інноваційними технологіями — такими як дрони, лазерне сканування, інерціальні системи, штучний інтелект — відкриває нові горизонти для удосконалення моніторингу залізничної інфраструктури. Комбінування GNSS із IoT (Інтернетом речей) дозволяє створювати інтелектуальні мережі, в яких сотні або тисячі датчиків автоматично передають дані в централізовану систему управління [12].

Очікується, що в найближчі роки зростатиме застосування GNSS у комплексних системах безпеки, моніторингу кліматичних впливів на інфраструктуру, а також у цифровому управлінні активами залізниці. Особливої актуальності набуває реалізація концепції "цифрової колії", де GNSS є одним з основних джерел просторової інформації [11].

2.2. Лазерне сканування (LiDAR) та його застосування

Сучасні методи геодезичного забезпечення залізничної інфраструктури дедалі частіше базуються на новітніх технологіях просторового сканування. Одним із найбільш інноваційних та високоточних методів є лазерне сканування, відоме як LiDAR (Light Detection and Ranging). Ця технологія відкриває широкі можливості для оперативного й детального отримання тривимірної інформації про об'єкти залізничної інфраструктури, забезпечуючи точність, швидкість і комплексність даних, що значно перевершують традиційні методи зйомки [13,15].

LiDAR — це дистанційний метод зондування, який базується на вимірюванні часу проходження лазерного імпульсу від джерела (сканера) до об'єкта та назад. Під час сканування пристрій випромінює лазерні імпульси в напрямку об'єкта, реєструє час їх повернення після відбиття й обчислює відстань до поверхні. З огляду на положення лазера та кут вимірювання, система визначає координати кожної відбитої точки у тривимірному просторі. У результаті формується так звана хмара точок — мільйони просторових координат, які відображають форму, розміри та положення об'єктів у навколишньому середовищі [13,14].



Рис. 2.3 – LiDAR-сканер

Сканування може проводитись у різний спосіб залежно від типу обладнання та завдань:

- Наземне стаціонарне лазерне сканування (TLS) — встановлюється на тринозі або платформі, здійснює сканування з фіксованої точки.
- Мобільне лазерне сканування (MLS) — розміщується на транспортному засобі (поїзд, автомобіль), дозволяє сканувати на ходу.
- Аеролазерне сканування (ALS) — виконується з дронів, літаків або гелікоптерів, охоплюючи великі території [13].

LiDAR має низку переваг, які роблять його незамінним у багатьох аспектах обслуговування та моніторингу залізничної інфраструктури. Передусім це висока точність і деталізація — технологія дозволяє досягати точності від кількох сантиметрів до міліметрів, що особливо важливо для вимірювання параметрів колії, конструкцій мостів, тунелів та інших об'єктів. Значною перевагою є також висока швидкість збору даних: сканер здатен фіксувати від 100 тисяч до 2 мільйонів точок за секунду, що суттєво перевищує можливості традиційних тахеометричних або GPS-зйомок. LiDAR забезпечує створення повної 3D-моделі об'єкта у вигляді хмари точок, яка дає змогу проводити детальний інженерний аналіз, створювати BIM-моделі та

здійснювати цифрове планування. Завдяки сучасному програмному забезпеченню можлива автоматизована обробка та аналіз отриманих даних — система може автоматично виділяти об'єкти, такі як рейки, опори, лінії електропередач, здійснювати точні вимірювання та контролювати зміни геометрії. Крім того, дані лазерного сканування є багатофункціональними і можуть одночасно використовуватись для інженерних, екологічних, транспортних і містобудівних завдань[15,14].

У межах залізничної галузі лазерне сканування охоплює широке коло застосувань, що робить його важливим інструментом для забезпечення точності, безпеки та ефективності. Зокрема, LiDAR-технології активно використовуються для інвентаризації й цифровізації колійного господарства: створення точної 3D-моделі залізничної колії та прилеглих елементів — насипів, шпал, баластного шару, водовідвідних споруд — дає змогу проводити автоматизовану інвентаризацію, порівнювати стан об'єктів з проектною документацією та фіксувати зміни. Також важливим напрямом є контроль геометричних параметрів рейкової колії: мобільне сканування з платформ, що рухаються колією, дозволяє оперативно вимірювати ширину колії, перевищення рейок, уклони, кривизну траси й виявляти деформації або відхилення, які потребують ремонту чи регулювання [15,13].

LiDAR ефективно застосовується для моделювання інженерних споруд: сканування мостів, тунелів, вокзалів та інших об'єктів дозволяє отримати точні геометричні моделі для проведення розрахунків несучої здатності, оцінки технічного стану конструкцій, а також для планування реконструкцій і модернізацій. У районах потенційної небезпеки — таких як зсуви, обвали або підтоплення — технологія використовується для моніторингу небезпечних зон: вона фіксує зміни рельєфу, об'єми ґрунтових мас, швидкість ерозії, що дозволяє інтегрувати ці дані у системи раннього попередження про надзвичайні ситуації [14,15].

Ще одним важливим напрямом є аеролазерне сканування, яке використовується під час проектування нових маршрутів. LiDAR, встановлений на безпілотах або літаках, забезпечує отримання цифрових моделей місцевості (ЦММ) на великих територіях, що суттєво спрощує вибір трасування нових залізничних ліній і

допомагає враховувати геологічні та екологічні обмеження. Окрім того, лазерне сканування дозволяє виявляти загрози габаритам руху — наприклад, перешкоди у вигляді гілок дерев, ліній електропередач або частин інфраструктури, що особливо критично для високошвидкісного сполучення. Нарешті, ще однією перевагою є можливість інтеграції отриманих тривимірних моделей у середовища BIM (Building Information Modeling), що забезпечує комплексне цифрове управління активами залізничної інфраструктури [14,13,15].

На ринку існує велика кількість виробників обладнання для лазерного сканування. Серед найпоширеніших — Leica Geosystems, Trimble, RIEGL, Topcon, FARO. Кожен із них пропонує різні типи сканерів залежно від потреб: портативні, автомобільні, дроніві або стаціонарні [13].

Для обробки даних застосовуються спеціалізовані програмні продукти: Leica Cyclone, Trimble RealWorks, Bentley ContextCapture, CloudCompare, Autodesk ReCap. Вони дозволяють очищувати хмари точок, сегментувати об'єкти, створювати 3D-моделі, проводити аналіз деформацій та створювати креслення [14].

Точність лазерного сканування залежить від низки чинників, які впливають на якість отриманих даних. Насамперед це тип сканера та його роздільна здатність — сучасні пристрої з високою роздільністю забезпечують більш точні й деталізовані результати. Важливу роль відіграє також відстань до об'єкта: чим вона більша, тим вищою може бути похибка вимірювань. На точність впливають і зовнішні умови — наявність перешкод, таких як дощ, пил або сніг, може спотворювати або блокувати лазерні промені. Складна геометрія об'єкта, зокрема наявність заглиблень, вигинів чи тіней, також ускладнює сканування й знижує точність вимірювань. Додатковими чинниками є умови освітлення та колір поверхні: темні або блискучі матеріали можуть погіршувати відбиття променя, що впливає на якість отриманої хмари точок [14].

У середньому мобільне або наземне сканування дає точність у межах 1–5 мм на відстані до 100 метрів. В аеролазерному скануванні точність зазвичай коливається в межах 5–15 см у вертикальному вимірі, що достатньо для трасування або створення цифрових моделей рельєфу [15].

Разом із тим, використання лазерного сканування має і певні обмеження, які слід враховувати під час планування робіт. Насамперед це висока вартість обладнання та програмного забезпечення, що може стати суттєвим бар'єром для впровадження технології на підприємствах із обмеженим бюджетом. Окрім того, обробка великих обсягів даних вимагає потужних комп'ютерів із високою продуктивністю, адже обсяги файлів, що створюються під час сканування, можуть сягати від кількох гігабайтів до десятків терабайтів. Для ефективної роботи з такими даними необхідне не лише технічне забезпечення, а й наявність кваліфікованого персоналу, здатного проводити обробку, аналіз і візуалізацію результатів за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення [13,14].

Очікується, що LiDAR-технології будуть усе ширше інтегруватися в автоматизовані системи моніторингу залізниць. Поєднання лазерного сканування з GNSS, інерціальними системами (IMU), дронами та ШІ дозволяє створити повністю автономні платформи для інспекції інфраструктури [15].

Зростає також роль LiDAR у концепції «цифрового двійника» залізниці — віртуального середовища, де в режимі реального часу моделюється стан усіх об'єктів. Такі системи забезпечують прийняття рішень, прогнозування ремонтів, оцінку ефективності експлуатації [15].

Особливого значення набуває використання мобільних сканерів на рейковому транспорті для регулярного обстеження колії без зупинок руху. У перспективі такі системи можуть стати стандартом обслуговування високошвидкісних магістралей, де точність і оперативність мають критичне значення [13].

2.3. Дистанційне зондування Землі (ДЗЗ) та фотограмметрія з БПЛА

У сучасній геодезичній практиці, що стосується моніторингу, обстеження та проектування об'єктів залізничної інфраструктури, усе ширше застосовуються методи дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) та фотограмметрії з використанням безпілотних літальних апаратів (БПЛА). В умовах швидкого розвитку цифрових технологій ці інструменти стали не лише альтернативою класичним методам зйомки, але й ефективним засобом отримання просторових даних у великому масштабі, з високою точністю та оперативністю [16,14].

Дистанційне зондування Землі — це сукупність методів отримання інформації про об'єкти та явища на поверхні Землі без прямого фізичного контакту з ними, здебільшого за допомогою знімальних пристроїв, розташованих на супутниках, літаках, вертольотах або безпілотниках. Основою технології є аналіз електромагнітного випромінювання, відбитого або випроміненого об'єктами [16].

Супутникові або авіаційні сенсори реєструють зображення в різних діапазонах спектра — видимому, інфрачервоному, тепловому або радіолокаційному. Отримані дані обробляються із застосуванням геоінформаційних систем (ГІС) і дозволяють оцінити характеристики ландшафту, рельєфу, рослинного покриву, вологості ґрунтів, технічного стану об'єктів інфраструктури тощо [16,14].

У контексті залізничної галузі дистанційне зондування Землі (ДЗЗ) використовується для вирішення низки важливих завдань. Зокрема, воно застосовується для аналізу стану земляного полотна, що дозволяє вчасно виявляти деформації та потенційно небезпечні ділянки. За допомогою ДЗЗ також можна визначати зсувонебезпечні зони, що є критично важливим для безпеки експлуатації залізниці. Крім того, технологія забезпечує контроль за динамікою рослинності біля колій, що дозволяє ефективно планувати роботи з розчищення територій та запобігати порушенням габаритів. Ще одним напрямом застосування є моделювання рельєфу місцевості для прокладання нових залізничних трас, що значно спрощує інженерно-геодезичні дослідження на ранніх етапах проектування. Нарешті, дистанційне зондування використовується для оцінки техногенного впливу залізничної інфраструктури на довкілля, зокрема для моніторингу змін у стані земель, водних об'єктів та рослинного покриву [16,17].

Одним із найефективніших напрямів ДЗЗ у геодезії є фотограмметрія з використанням БПЛА (безпілотних літальних апаратів). Це технологія зйомки земної поверхні за допомогою дронів, оснащених цифровими камерами, та подальшої обробки знімків для створення геопросторових продуктів — ортофотопланів, цифрових моделей місцевості (ЦММ), тривимірних моделей об'єктів [17,18].



Рис. 2.4 – Безпілотний літальний апарат

Фотограмметрія на базі безпілотних літальних апаратів (БПЛА) має низку суттєвих переваг, які забезпечують її широку популярність у різних галузях. Однією з головних переваг є висока деталізація: роздільна здатність зображень, отриманих з дронів, може сягати 2–5 см на піксель, що значно перевершує якість супутникових або навіть пілотованих авіазнімків. Крім того, метод характеризується високою швидкістю зйомки — лише за кілька годин можна обстежити десятки гектарів території, що особливо цінно для оперативного збору просторових даних. Ще однією важливою перевагою є оперативність обробки: сучасне програмне забезпечення дає змогу автоматично створювати тривимірні моделі місцевості та ортофотоплани протягом доби після зйомки. Вартість такого підходу також є привабливою — дрони коштують значно дешевше, ніж класичні геодезичні прилади або традиційна аерофотозйомка з літаків. БПЛА вирізняються високою гнучкістю застосування: їх легко запускати в важкодоступних або небезпечних районах, таких як скелясті урвища, болота чи кар'єри, що значно розширює сферу використання цієї технології [17,18].

У межах залізничної галузі дистанційне зондування Землі та фотограмметрія з дронів знаходять широке застосування в багатьох напрямках, забезпечуючи високу точність, оперативність і безпеку обстежень. Зокрема, вони використовуються для обстеження технічного стану земляного полотна — основи залізничної колії, яка з часом може зазнавати деформацій, осідань, ерозії чи підтоплень. Завдяки БПЛА

можна створити точну тривимірну модель території, порівняти її з проектною документацією та виявити небезпечні ділянки. Також технології застосовуються для моніторингу стану навколишнього середовища: ортофотоплани з дронів дають змогу контролювати вирубки лісу, ріст небажаної рослинності біля колії, виявляти стихійні сміттєзвалища або несанкціоноване будівництво. ДЗЗ є ефективним інструментом для виявлення загроз техногенного характеру, зокрема осідань ґрунту, пов'язаних із підтопленням, витокami з дренажних систем чи аварійним станом комунікацій. За допомогою багатоспектральних камер можна виявити ділянки з аномальною вологістю або температурою, що свідчить про потенційні проблеми. Під час підготовки та супроводу інфраструктурних проєктів, як-от будівництво нових колій або модернізація існуючих, дрони дозволяють швидко отримати цифрові моделі місцевості та ортофотоплани, які використовуються для створення планів, профілів і розрахунку обсягів земляних робіт. Окрім того, дрони широко використовуються для контролю за будівництвом і реконструкцією: вони фіксують хід робіт, перевіряють обсяги виконаного будівництва та виявляють відхилення від проєктних рішень, дозволяючи вести повну хронологію змін на об'єкті. Після надзвичайних ситуацій, таких як зсуви, паводки, пожежі чи аварії, дрони оперативно забезпечують огляд постраждалих ділянок, що дає змогу швидко оцінити ситуацію та спланувати відновлювальні заходи. БПЛА використовуються для інспекції об'єктів верхньої будови колії: за допомогою високоякісних камер можна виконувати візуальний огляд шпал, рейок, стрілочних переводів і кріплень, фіксуючи дефекти, тріщини або зміщення без потреби зупинки руху [17,18].

Для реалізації фотограмметричних робіт з безпілотних літальних апаратів використовуються два основних типи дронів: мультикоптери та крилаті дрони. Мультикоптери відзначаються хорошою маневреністю, здатністю зависати в повітрі над об'єктом, що робить їх ідеальними для точкових обстежень, таких як мости, вокзали або стрілочні переводи. Натомість крилаті дрони мають значно більший радіус дії та здатні ефективно охоплювати великі території, що особливо важливо під час зйомки протяжних ділянок залізничної колії, завдовжки в десятки кілометрів [16].

Камери бувають RGB (звичайні), багатоспектральні, тепловізійні або комбіновані. Обов'язковим елементом є модуль GPS/ГЛОНАСС для геоприв'язки знімків. Для точнішої орієнтації часто використовують PPK/RTK-модулі, які дають можливість отримувати точність позиціонування на рівні кількох сантиметрів [16,18].

Обробка даних здійснюється за допомогою програмного забезпечення:

- Agisoft Metashape, Pix4D, DroneDeploy, 3DF Zephyr — для побудови ортофотопланів і 3D-моделей;

- QGIS, ArcGIS — для подальшого аналізу просторової інформації;

- AutoCAD Civil 3D, Bentley OpenRail — для інженерного проєктування [18].

Фотограмметрія з безпілотних літальних апаратів дозволяє досягати високої точності вимірювань і створення просторових моделей, проте для цього необхідно враховувати низку важливих чинників. Одним із ключових є висота польоту: що нижчою вона є, то вищою буде роздільна здатність знімків і точність побудованих моделей. Велике значення мають також параметри камери — фокусна відстань, розмір матриці та якість оптики безпосередньо впливають на чіткість зображення та точність подальшої обробки. На результати зйомки суттєво впливають і метеорологічні умови: вітер, дощ, туман чи сніг можуть спричинити розмиття знімків або відхилення в траєкторії польоту. Для підвищення геопросторової точності широко застосовуються наземні контрольні точки (GCP), які мають точно визначені координати й слугують орієнтирами під час обробки. Крім того, важливо правильно налаштувати перекриття знімків: для якісної реконструкції тривимірної моделі необхідне мінімальне перекриття між кадрами на рівні 70–80% [17,16].

Очікується, що в найближчі роки технології дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) та безпілотних літальних апаратів (БПЛА) займатимуть ключове місце в процесі цифрової трансформації залізничної галузі. БПЛА поступово інтегруватимуться у системи автоматичного моніторингу, здатні збирати дані в реальному часі, що значно підвищить оперативність та точність контролю інфраструктури. Одночасно з цим розвиток штучного інтелекту сприятиме автоматизації процесів розпізнавання дефектів колії, інженерних конструкцій і зелених зон, зменшуючи потребу в ручній обробці зображень. Важливим напрямом

стане створення цифрових двійників залізниць на основі фотограмметричних моделей, які використовуватимуться для планування, ремонту й ефективного управління інфраструктурними активами. Крім того, впровадження хмарних сервісів забезпечить оперативний обмін знімками, картами та тривимірними моделями між усіма зацікавленими сторонами, що сприятиме більш узгодженому та ефективному прийняттю рішень [17,18].

Таким чином, ДЗЗ і фотограмметрія з БПЛА — це потужний інструмент сучасного геодезиста, що забезпечує високоточне, масштабне й оперативне отримання інформації про стан залізничної інфраструктури. Їх використання не лише підвищує ефективність технічного обслуговування об'єктів, а й сприяє загальній безпеці та надійності функціонування транспортної системи [16].

3 СУЧАСНІ ЦИФРОВІ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ТА УПРАВЛІННЯ ЗАЛІЗНИЧНОЮ ІНФРАСТРУКТУРОЮ

3.1 Геоінформаційні системи для управління інфраструктурою

У сучасному світі управління складними інженерними об'єктами, такими як залізнична інфраструктура, неможливе без цифрових технологій, які дозволяють інтегрувати, аналізувати та візуалізувати великі обсяги просторових і табличних даних. Серед таких технологій особливе місце займають геоінформаційні системи (ГІС) — потужні інструменти для збору, зберігання, обробки, аналізу й відображення геопросторової інформації, що мають вирішальне значення для планування, експлуатації та розвитку залізничної інфраструктури [19,20].

Геоінформаційна система — це апаратно-програмний комплекс, який поєднує бази даних, графічні інтерфейси, просторові моделі й алгоритми аналізу для роботи з інформацією, що має географічну прив'язку. Вона дає змогу візуалізувати об'єкти на мапах, виконувати аналітичні операції (наприклад, аналіз сумісності, маршрутизацію, зонування), виявляти просторові залежності та приймати обґрунтовані управлінські рішення [20].

У контексті залізничної галузі геоінформаційні системи (ГІС) виконують низку ключових функцій, що охоплюють усі етапи життєвого циклу інфраструктури. Передусім це інвентаризація та картографування об'єктів інфраструктури, зокрема колій, станцій, тунелів, мостів, переїздів та інших елементів. ГІС також забезпечує ведення технічної документації в електронному вигляді з географічною прив'язкою, що значно полегшує доступ до інформації та її оновлення. Важливою функцією є контроль за станом інфраструктури та її змінами у часі, що дозволяє своєчасно реагувати на виявлені проблеми. Крім того, системи ГІС використовуються для планування технічного обслуговування, проведення ремонтів і модернізацій. Вони також сприяють аналізу аварійності та оцінці безпекових загроз, що є критично важливим для забезпечення безперервності руху. ГІС активно підтримує проєктні та будівельні роботи, надаючи просторову інформацію для точного винесення об'єктів у натуру. Окремим напрямом є моніторинг навколишнього середовища в зонах

впливу залізничного транспорту, що дозволяє враховувати екологічні аспекти при плануванні та експлуатації інфраструктури [19,21].

Геоінформаційна система, розроблена для потреб залізничної галузі, зазвичай складається з кількох основних структурних компонентів, кожен з яких виконує важливу роль у забезпеченні ефективного управління інфраструктурою. Центральним елементом є база просторових даних, яка містить цифрові карти та шари з інформацією про об'єкти інфраструктури, зокрема рейки, стрілочні переводи, сигнали, електролінії, а також цифрові моделі рельєфу, гідрографічну сітку та дорожньо-транспортну мережу. До неї додаються атрибутивні бази даних, які зберігають описову інформацію про кожен об'єкт, включаючи рік введення в експлуатацію, технічні характеристики, поточний стан, результати оглядів і ремонтів, а також дані про відповідальних осіб. Для ефективної взаємодії з системою використовується інтерфейс користувача, який забезпечує зручну навігацію по карті, пошук об'єктів, створення запитів і фільтрів, редагування та візуалізацію інформації. Інструменти аналізу, вбудовані в ГІС, дозволяють здійснювати просторові запити, аналіз маршрутів, моделювання заторів, виявлення вузьких місць і прогнозування навантажень на мережу. Нарешті, модулі інтеграції забезпечують зв'язок із зовнішніми системами, такими як CAD-платформи (AutoCAD, Bentley), системи диспетчерського управління (SCADA), обліку ресурсів (ERP) або життєвого циклу об'єктів (PLM), що дозволяє створити єдине цифрове середовище для всієї залізничної інфраструктури [20,21].

У залізничній сфері геоінформаційні системи (ГІС) знаходять широке практичне застосування, сприяючи цифровізації управління інфраструктурою. Одним із ключових напрямів є інвентаризація та паспортизація об'єктів: за допомогою ГІС формується детальна цифрова база даних інфраструктурних елементів з можливістю швидкого пошуку за заданими параметрами, перегляду технічної інформації та оперативного оновлення стану. Наприклад, на інтерактивній мапі можна легко виявити всі залізничні переїзди, вік яких перевищує 30 років, або мости з класифікацією “аварійний”. Інше важливе застосування — планування ремонтних робіт. Інженери мають змогу візуалізувати ділянки з підвищеним рівнем

знос, коригувати графіки ремонтів і оптимізувати використання ресурсів. Усе це реалізується через електронне планування з геоприв'язкою, де кожен об'єкт має цифрову історію обслуговування, замість традиційних паперових журналів. Також на основі ГІС створюються системи підтримки прийняття рішень (СППР), які дозволяють керівництву приймати обґрунтовані рішення щодо пріоритетів модернізації, будівництва нових ліній або закриття малоефективних напрямків, із урахуванням соціально-економічних, технічних та географічних чинників. Крім того, ГІС використовується для розслідування аварій і проведення ризик-аналізу: за допомогою картографічної візуалізації можна визначити “гарячі точки” — небезпечні ділянки, де найчастіше виникають аварії чи інциденти, пов'язані з технічним станом, перевищенням швидкості або людським фактором, що дозволяє вчасно впроваджувати превентивні заходи. Нарешті, важливою є взаємодія з іншими службами: ГІС інтегрується з системами відеоспостереження, пожежної сигналізації, логістики, що забезпечує комплексне управління всією інфраструктурою — від колій до вокзалів і складів [20,21].

На ринку існує багато програмних рішень, що можуть бути адаптовані для потреб залізничного транспорту:

- ESRI ArcGIS — одна з найпотужніших ГІС-платформ з широким набором аналітичних та візуалізаційних інструментів;
- QGIS — безкоштовна система з відкритим кодом, популярна серед державних і навчальних закладів;
- Bentley OpenRail, AutoCAD Map 3D, GeoMedia — спеціалізовані CAD/ГІС-системи для проєктування й управління інфраструктурою;
- RailSys, Trimble Quantm — рішення, які поєднують ГІС із плануванням залізничного руху, розкладом та інфраструктурними обмеженнями [21,20,19].

Крім того, сучасні залізничні підприємства впроваджують власні корпоративні ГІС, які адаптовані до конкретних технічних умов, структури компанії та вимог нормативної документації.

Окрему увагу варто приділити інтеграції геоінформаційних систем (ГІС) із сучасними геодезичними технологіями, що значно розширює можливості

моніторингу та управління залізничною інфраструктурою. Зокрема, використання GNSS і безпілотних літальних апаратів (БПЛА) дозволяє оперативно отримувати координати з дронів або супутників, які можуть автоматично вноситися до бази ГІС для оновлення топографічних планів, тривимірних моделей або контролю змін на місцевості. Також активно впроваджується лазерне сканування — отримані дані з LiDAR інтегруються в ГІС у вигляді хмари точок, що дає змогу детально аналізувати профіль залізничної колії, параметри перехідних кривих, стан рейко-шпального ґрату, зношення шпал та інші ключові характеристики. Крім того, дистанційне зондування Землі (ДЗЗ) відіграє важливу роль: супутникові чи аерофотознімки імпортуються в ГІС для виявлення змін рельєфу, зсувів, ознак ерозійних процесів, а також для візуального моніторингу навколишньої території. Така інтеграція забезпечує комплексний і динамічний підхід до контролю, обліку та розвитку залізничної інфраструктури [20,21,19].

Використання геоінформаційних систем у сфері управління залізничною інфраструктурою забезпечує низку вагомих переваг. По-перше, відбувається цифровізація процесів, коли замість паперових планів і журналів формується єдина електронна база даних. По-друге, підвищується оперативність — дані оновлюються в реальному часі, що дає змогу швидше реагувати на будь-які зміни або потенційні загрози. По-третє, зростає прозорість і контроль, адже кожна ділянка, об'єкт або подія мають фіксацію в системі, що значно мінімізує вплив людського фактора та ризики зловживань. По-четверте, це сприяє ефективному плануванню, оскільки інженери та менеджери отримують цілісну картину стану інфраструктури і можуть приймати обґрунтовані рішення. І, нарешті, використання ГІС допомагає скорочувати витрати завдяки оптимізації ресурсів, своєчасному технічному обслуговуванню та мінімізації простоїв [19,20,21].

Майбутнє геоінформаційних систем пов'язане з їхньою глибокою інтеграцією в концепцію "цифрового двійника" залізничної інфраструктури — цифрової копії реальних об'єктів, яка відображає їхній стан у режимі реального часу. У рамках цього підходу ГІС будуть об'єднані з датчиками IoT, системами моніторингу, BIM-моделями та аналітичними платформами [20].

Крім того, завдяки розвитку хмарних технологій та мобільного доступу, геоінформаційні системи стануть доступними для фахівців на об'єктах — інженери зможуть оновлювати інформацію про інфраструктуру безпосередньо з планшетів чи смартфонів у польових умовах [21].

Таким чином, геоінформаційні системи відіграють ключову роль у цифровій трансформації залізничної галузі, забезпечуючи надійне управління інфраструктурою, підвищення її безпеки, ефективності та довгострокової експлуатаційної придатності [19].

3.2 Комплекс рішень для дотримання якості у залізничній галузі

Геодезичні методи вимірювання були використані на залізницях з моменту їх появи. Стійке поліпшення та диверсифікація інструментів та методів вимірювання відіграли свою роль. Компанія Trimble успішно об'єднала провідні цифрові технології у єдиний комплекс рішень, що дозволяє забезпечити високу якість та ефективність управління залізничною інфраструктурою та зробити управління інфраструктурою прозорим, автоматизованим та стратегічно обґрунтованим [23,22].

Trimble GEDO CE — це комплексне рішення, що включає апаратні засоби та програмне забезпечення для зйомки, зберігання та аналізу даних, а також для визначення розташування залізничних шляхів, їхнього будівництва, експлуатації та обслуговування. Ця система спеціально розроблена для вирішення завдань у сфері залізничної інфраструктури та забезпечує ефективну роботу як у польових умовах, так і в офісі. Вона підтримує стандартні технології та формати даних, що дозволяє легко інтегрувати її з основними програмами для проектування та технічного обслуговування залізниць [22].



Рис. 3.1 – Шляховимірювальна система Trimble GEDO CE

Шляховимірювальні системи GEDO застосовуються на всіх етапах життєвого циклу залізничної колії. Вони ефективно вирішують низку технічних завдань, зокрема при обслуговуванні (заміна полотна, заміна рейок, підбивання), під час експлуатації (контроль габаритів), а також у процесах нового будівництва — як на суцільній, так і на баластній основі. Окрім того, система використовується для реконструкції високошвидкісних магістралей (ВСМ), внесення нових елементів плану чи профілю та оптимізації існуючих рішень [22,23].

У процесі будівництва баластових залізничних колій ключове значення має висока точність укладання, відповідність проектним параметрам і системний контроль якості на всіх етапах. Сучасні цифрові технології, зокрема рішення компанії Trimble, дозволяють досягти цих цілей завдяки комплексному підходу до вимірювання, виправки й документації [22].



Рис. 3.2 -Ремонт баластової колії

У процесі будівництва безбаластових залізничних колій особливо важливо дотримуватись високої точності монтажу, жорсткої відповідності проєктним параметрам і контролю геометрії на кожному етапі. Оскільки такі колії не передбачають використання баласту для компенсації відхилень, будь-які помилки можуть призвести до серйозних експлуатаційних проблем. Сучасні цифрові технології, зокрема рішення компанії Trimble, забезпечують комплексний підхід до геодезичного супроводу, дозволяючи точно позиціонувати елементи колії, здійснювати контроль укладання в режимі реального часу та вести повну документацію з дотриманням найвищих стандартів якості [23,22].



Рис. 3.3 – Будівництво безбаластових колій

Одним із основних завдань є корекція положення колії в абсолютному просторі. Інтегровані системи Trimble забезпечують точне порівняння фактичного положення колії з проектним, автоматично визначаючи необхідні параметри горизонтальної та вертикальної виправки. Це дозволяє здійснювати коригування ще під час виконання робіт, мінімізуючи відхилення і забезпечуючи точність укладання вже на етапі будівництва [22,23].

Усі вимірювання проводяться з дотриманням найвищих вимог до точності. Використовуються супутникові технології, оптичні прилади та сенсори, які дозволяють досягати міліметрового рівня точності. Такий підхід дає змогу запобігати майбутнім деформаціям колії, зберігаючи надійність і комфорт експлуатації залізничного шляху [22,23].

Після завершення робіт система автоматично формує повні звіти щодо якості виконаного будівництва. У звітах відображено, наскільки фактичне положення колії відповідає проектному, і вони можуть бути інтегровані в геоінформаційні системи та цифрові журнали. Це дозволяє здійснювати прозорий контроль, вести технічний аудит та забезпечувати обґрунтовану звітність перед замовником [22].

3.3 Польове та офісне програмне забезпечення Trimble GEDO

Польове програмне забезпечення — це спеціалізовані програми, які встановлюються на зовнішні польові пристрої, такі як контролери, планшети чи смартфони, або інтегруються безпосередньо в геодезичні інструменти. Основним його призначенням є забезпечення повноцінної взаємодії з приладами у процесі виконання геодезичних робіт. Таке програмне забезпечення дозволяє керувати інструментом — здійснювати налаштування параметрів, калібрування та виконання вимірювальних або розбивочних команд. У процесі знімальних робіт воно забезпечує збереження результатів вимірювань у пам'яті пристрою, а при виконанні розбивочних робіт — завантаження проектних даних для їх використання безпосередньо в полі. Однією з ключових функцій також є можливість обміну даними з офісним програмним забезпеченням: результати польових вимірювань експортуються для подальшої обробки, а проектна інформація імпортується до приладів для точного позиціонування елементів на місцевості.



Рис. 3.4 – Польове програмне забезпечення

Польові програмні рішення компанії Trimble, що орієнтовані на застосування у сфері геодезії, картографії та геоінформаційних систем, забезпечують комплексний підхід до організації та управління польовими роботами. Вони сприяють стандартизації та послідовності процесу збору даних, зменшують час, необхідний для передачі інформації до офісу, та підтримують постійний зв'язок із центральними системами. Це значно підвищує ефективність виконання завдань, скорочує витрати часу і ресурсів, а також підсилює конкурентні переваги завдяки зростанню продуктивності та легкому доступу до розширених спеціалізованих функцій.

Офісне (камеральне) програмне забезпечення — це комплекс програмних засобів, призначених для обробки, аналізу та підготовки остаточних результатів геодезичних і картографічних робіт у стандартних форматах, що використовуються у проектуванні (CAD) та картографії. На відміну від польових рішень, офісне ПЗ працює з уже зібраними даними — інструментальними вимірюваннями, цифровими знімками, даними дистанційного зондування, результатами фотограмметрії та іншими видами просторової інформації. Його головна мета — перетворення первинних («сирих») даних на готові, структуровані продукти, які можна використовувати в інженерних, будівельних, кадастрових, транспортних та інших системах.



Рис. 3.5 – Офісне програмне забезпечення

Ключовими функціями офісного програмного забезпечення є імпорт даних з польових приладів, їхня обробка, зрівнювання, візуалізація в зручному графічному середовищі, а також подальший експорт у форматах, придатних для використання в проектних і картографічних системах. Важливу роль відіграє також можливість створення звітної документації, аналізу точності та побудови просторових моделей місцевості.

Для ефективної роботи з таким ПЗ зазвичай потрібне потужне апаратне забезпечення — настільний комп'ютер з продуктивним процесором і великим монітором. Проте останнім часом простежується тенденція до переходу на хмарні офісні платформи, які забезпечують багатокористувацький доступ, зберігання даних

у централізованих системах і синхронізацію з польовими пристроями. Такі рішення дають змогу підвищити оперативність обробки, забезпечити постійний обмін інформацією між польовими бригадами та офісом і суттєво підвищити ефективність загального виробничого процесу. Синхронізація даних у таких системах здійснюється за допомогою бездротових каналів зв'язку — мобільного інтернету або Wi-Fi [22].

3.4 Переваги використання системи Trimble GEDO у залізничній галузі

Система Trimble GEDO є одним із найсучасніших та найефективніших рішень для геодезичного супроводу при будівництві, модернізації та експлуатації залізничної інфраструктури. Завдяки поєднанню високоточного вимірювального обладнання, спеціалізованого програмного забезпечення та повної інтеграції з будівельними й ремонтними процесами, ця система демонструє суттєві переваги в порівнянні з традиційними методами [22,23].



Рис. 3.5 – Обладнання Trimble GEDO

Однією з ключових переваг є суттєве підвищення продуктивності та якості виконуваних робіт. Завдяки автоматизації процесів збирання, обробки та передачі даних Trimble GEDO дозволяє значно зменшити вплив людського чинника на точність і швидкість проведення вимірювань. Це особливо важливо в умовах обмеженого часу для виконання ремонтних або монтажних робіт, коли будь-яка затримка може вплинути на рух поїздів та безпеку перевезень [22].

Ще однією важливою перевагою системи є суттєве скорочення часу, необхідного для встановлення та налаштування вимірювального обладнання. На відміну від традиційних геодезичних методів, які потребують тривалої підготовки та калібрування приладів, Trimble GEDO дозволяє швидко розпочати знімання або контроль геометрії колії. Це особливо корисно в умовах обмеженого доступу до колії або під час нічних змін, коли критично важливо заощадити кожен хвилину [22].

Завдяки високому рівню автоматизації процесів, система дозволяє проводити вимірювання у реальному часі безпосередньо під час руху шляхоремонтного комплексу. Це означає, що ремонтні або регулювальні роботи можуть здійснюватися без зупинки або уповільнення основного процесу — шляховий комплекс працює безперервно, а зібрані дані одразу використовуються для внесення коригувань. У результаті досягається підвищення продуктивності робіт орієнтовно на 30% у порівнянні з традиційними методами [22].

Однією з критичних переваг системи GEDO є можливість точного прогнозування потреб у будівельних матеріалах, зокрема у щебені. Використовуючи отримані під час вимірювань дані, система дозволяє завчасно розрахувати необхідні обсяги матеріалу, що дає змогу ефективніше планувати логістику постачань, уникати надлишків або дефіциту та зменшувати витрати на закупівлі [23].

Крім того, система передбачає передачу актуальних ремонтних даних безпосередньо за шляхорихтувальним комплексом. Це дозволяє забезпечити оперативний контроль якості виконаних робіт і за необхідності — миттєво внести коригування. Таке рішення мінімізує ризик появи дефектів, що можуть вплинути на безпеку руху потягів, та підвищує загальний рівень відповідності об'єктів залізничної інфраструктури технічним стандартам [22].

Ще однією важливою перевагою системи є те, що вона не потребує повного перекриття транспортного коридору. Застосування Trimble GEDO дозволяє виконувати більшість робіт без порушення руху поїздів, що є особливо цінним на ділянках із високою інтенсивністю руху або на критично важливих напрямках. Це забезпечує гнучкість в організації робіт, зменшує витрати на організацію безпеки і дозволяє уникнути втрат через зупинки руху [22].

Точність, яку забезпечує система GEDO, досягає міліметрового рівня як у плані, так і за висотою. Така висока точність дозволяє не лише ефективно контролювати геометрію колії, але й відповідати вимогам до інфраструктури для високошвидкісного руху, де навіть незначні відхилення можуть мати критичне значення [23].

Завдяки універсальності та гнучкості, система сумісна з більшістю технічних стандартів, які діють у залізничній галузі різних країн. Це робить її зручною для застосування як у національних проектах, так і в міжнародних інфраструктурних програмах.

Таким чином, Trimble GEDO — це не просто інструмент для геодезичних вимірювань, а повноцінна система управління якістю будівельно-монтажних і ремонтних робіт у залізничній галузі. Її впровадження дозволяє досягти нового рівня ефективності, точності та безпеки в управлінні інфраструктурою [22,23].

ВИСНОВКИ

У процесі виконання дипломної роботи було досліджено застосування сучасних геодезичних технологій при експлуатації залізничної інфраструктури, проаналізовано методи просторового моніторингу технічного стану об'єктів, а також розглянуто практичне використання сучасного обладнання та програмних рішень. На основі проведеного дослідження можна зробити такі висновки.

Геодезичне забезпечення є невід'ємною складовою процесу експлуатації залізничної інфраструктури, оскільки забезпечує просторову точність положення елементів колійного господарства, своєчасне виявлення деформацій і контроль відповідності геометричних параметрів технічним нормам.

У дипломній роботі розглянуто повний цикл геодезичного супроводу об'єктів залізничної інфраструктури, починаючи з характеристики її основних елементів, визначення ролі геодезії в обслуговуванні та модернізації, до аналізу вимог до точності вимірювань і норм технічного регулювання. Особливу увагу приділено сучасним геодезичним технологіям, зокрема GNSS-спостереженням, лазерному скануванню (LiDAR), дистанційному зондуванню Землі та фотограмметрії з використанням БПЛА. Застосування цих методів дозволяє підвищити точність і оперативність моніторингу, а також зменшити витрати часу й ресурсів.

Розглянуто функціональні можливості геоінформаційних систем як інструментів централізованого управління інфраструктурою, що забезпечують ефективний облік, аналіз і візуалізацію геодезичних даних, а також сприяють прийняттю обґрунтованих інженерних рішень. Проаналізовано комплекс рішень компанії Trimble, зокрема систему Trimble GEDO, яка забезпечує повний цикл геодезичного супроводу — від збору даних у полі до офісної обробки. Описано функціонал польового та камерального програмного забезпечення Trimble, що дозволяє оптимізувати процеси вимірювань, обробки даних та формування звітної документації. Визначено основні переваги впровадження системи Trimble GEDO у залізничній галузі, серед яких: висока точність (до міліметра), підвищення

продуктивності робіт, зменшення потреби у зупинці руху поїздів, прогнозування обсягів матеріалів та сумісність зі стандартами більшості залізничних адміністрацій.

Дипломна робота має практичне значення для інженерно-геодезичних підрозділів залізничного транспорту, може бути використана як методичний матеріал при впровадженні сучасних технологій у виробничі процеси, а також як навчальна основа для підготовки фахівців у галузі інженерної геодезії, транспорту та управління інфраструктурою.

Таким чином, поставлену мету дипломної роботи досягнуто, а результати дослідження підтверджують доцільність застосування сучасних геодезичних рішень для підвищення ефективності, точності та безпеки експлуатації залізничної інфраструктури.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Морозов С.О., Романчук В.П., Гавриленко А.С. Залізнична інфраструктура: підручник. — Харків: УкрДАЗТ, 2019. — 288 с.
2. Чубинський М.І. (ред.) Залізничний транспорт України: навчальний посібник. — К.: Логос, 2017. — 352 с.
3. Войцеховський Є.С., Сафонов Ю.В. Геодезія: підручник. — К.: Вища школа, 2015. — 496 с.
4. Пестриков В. Н. Геодезия в строительстве. — М.: Транспорт, 2019. — 312 с
5. Солдатов А. И., Бондаренко В. Ф. Геодезичне забезпечення залізничних робіт. — К.: Логос, 2020. — 264 с
6. Тимченко С. М. Технологія геодезичних робіт на транспорті: підручник. — Львів: Вид-во ЛНТУ, 2021. — 288 с.
7. Гусєв В. М., Кондратюк В. А. Геодезичне забезпечення будівництва. — Київ: Вища школа, 2020. — 356 с.
8. Павлов Д. М. Геодезичні роботи в транспортному будівництві. — Львів: Світ, 2021. — 288 с.
9. ДСТУ 2399:2022 Геодезія. Загальні технічні вимоги до точності геодезичних вимірювань. — Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2022.
10. Куценко В. М. GNSS-технології у геодезії та моніторингу об'єктів. — Київ: Ліра-К, 2021. — 312 с.
11. Головач А. І., Боднар О. В. Системи супутникового позиціонування та їх використання в інженерних вишукуваннях. — Львів: Техніка, 2020. — 248 с.
12. Trimble Navigation Ltd. GNSS Technology Applications in Rail Infrastructure Monitoring. — Technical White Paper, 2022. — 55 p.
13. Цапенко Ю. П. Лазерне сканування в інженерній геодезії: навч. посіб. — Київ: Ліра-К, 2020. — 280 с.
14. Gordon, S., Lichti, D., Stewart, M. A review of terrestrial laser scanning for topographic mapping. *Journal of Spatial Science*, 2009, Vol. 54, No. 2, pp. 95–113.

15. Trimble Inc. LiDAR Technology for Rail Infrastructure: Applications and Benefits. — Technical White Paper, 2021. — 48 p.
16. Москаленко В. П., Олійник А. В. Дистанційне зондування Землі: підручник. — Київ: Лібра-Т, 2020. — 320 с.
17. Colomina, I., Molina, P. Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2014, Vol. 92, pp. 79–97.
18. Agisoft LLC. Agisoft Metashape User Manual: Professional Edition. — Version 1.8, 2021. — 145 p.
19. Білик І. І., Дудар Т. В. Геоінформаційні системи та бази даних: навчальний посібник. — Львів: Вид-во ЛНУ, 2021. — 256 с.
20. Longley P. A., Goodchild M. F., Maguire D. J., Rhind D. W. Geographic Information Systems and Science. — 4th Edition. — Wiley, 2015. — 496 p.
21. ESRI. GIS for Transportation Infrastructure Management. — ESRI White Paper, 2020. — 32 p.
22. Trimble. Trimble GEDO Solutions for Railway Track Surveying and Construction [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://kmcgeo.com/ua/zheleznye-dorogi/>
23. Ковальчук І. М., Гнатюк М. І. Сучасні геодезичні технології в транспортному будівництві: навчальний посібник. — Львів: ЛНУ, 2022. — 178 с.

БІБЛІОГРАФІЧНА ДОВІДКА

Тема бакалаврської роботи «Застосування сучасних геодезичних технологій при експлуатації залізничної інфраструктури».

Обсяг пояснювальної записки 50 аркушів.

Перелік графічних додатків:

1. Карта залізниць України
2. Глобальна навігаційна супутникова система
3. Шляховимірювальна система Trimble GEDO CE
4. Обладнання Trimble GEDO

23 .06.2025
