

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

ТИМЧЕНКО СЕРГІЙ ІГОРОВИЧ

УДК 005.8:004.6:625.7/.8(477)

ДИСЕРТАЦІЯ

**ЦИФРОВІЗАЦІЯ ДОРОЖНЬО-ІНФРАСТРУКТУРНИХ ПРОЄКТІВ
ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ГЕОІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ**

Спеціальність: 073 – Менеджмент

Галузь знань: 07 – «Управління та адміністрування»

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії вперше

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело


_____ С. І. Тимченко

Науковий керівник: Єгорченкова Наталія Юріївна, д. т. н., професор

Київ-2025

АНОТАЦІЯ

Сергій Тимченко. Цифровізація дорожньо-інфраструктурних проєктів із застосуванням геоінформаційних технологій – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 073 «Менеджмент». – Київський національний університет будівництва і архітектури Міністерство освіти і науки України, Київ, 2025.

У світлі сучасних трансформацій дорожньо-транспортної галузі цифровізація управлінських процесів стає не лише технологічною вимогою, а й необхідною умовою підвищення ефективності та прозорості реалізації інфраструктурних проєктів. Зростання масштабів будівництва, ускладнення логістичних моделей, зміна кліматичних і соціальних умов, а також зростаючий суспільний запит на відкритість процесів вимагають впровадження нових інформаційно-аналітичних систем, що здатні забезпечити ефективне управління на всіх етапах життєвого циклу дорожніх об'єктів. У цьому контексті геоінформаційні технології (ГІС) виступають як ключовий інструмент цифрової трансформації дорожньо-інфраструктурного менеджменту. Дисертаційна робота присвячена вирішенню актуальної наукової проблеми розробки моделей, методів і технологічних рішень для цифрового управління дорожньо-інфраструктурними проєктами з використанням геоінформаційних систем (ГІС) та інструментів просторового аналізу. Запропонований підхід спрямований на підвищення ефективності, прозорості та обґрунтованості управлінських дій на всіх етапах життєвого циклу інфраструктурних об'єктів в умовах масштабної повоєнної відбудови України.

Актуальність дослідження багатократно посилюється викликами воєнного часу. Масштабні руйнування, завдані дорожній інфраструктурі внаслідок бойових дій (станом на листопад 2024 року пошкоджено понад 26 тисяч кілометрів доріг та 344 мости), поставили перед державою безпрецедентні завдання. Це зумовлює нагальну потребу не просто у відновленні, а в якісній модернізації галузі на нових технологічних засадах. В умовах обмежених ресурсів та підвищених вимог до

прозорості з боку міжнародних партнерів традиційні підходи до управління проєктами втрачають свою ефективність.

Саме в цьому контексті цифровізація та геоінформаційні технології перетворюються з перспективного напрямку на критично важливий інструмент антикризового управління та стратегічного планування. ГІС дозволяють оперативно збирати та аналізувати дані про пошкодження, створювати цифрові карти руйнувань, моделювати сценарії відновлення та оптимізувати розподіл ресурсів на основі багатокритеріального аналізу. Проте, попри наявність окремих ініціатив (DREAM, ONOVA GIS HUB) та усвідомлення важливості проблеми, досі бракувало системного наукового підходу до розробки моделей цифрового управління дорожніми проєктами, адаптованих до українських реалій.

Вирішення цієї проблеми можливе за умов розробки та впровадження цілісного комплексу моделей та методів, що інтегрують принципи проєктного менеджменту з аналітичними можливостями ГІС, BIM, IoT та Big Data. Запропонований у роботі підхід дозволяє створити єдиний інформаційний простір, забезпечити проактивне управління ризиками, обґрунтувати пріоритети відновлення та підвищити якість управлінських рішень, що сприяє не лише ефективній відбудові, а й довгостроковому сталому розвитку транспортної інфраструктури України.

Основна частина дисертаційної роботи складається зі вступу, чотирьох розділів та загальних висновків.

У Розділі 1 проведено аналіз теоретико-методологічних засад цифровізації дорожньо-інфраструктурних проєктів, систематизовано наукові підходи, досліджено сучасний стан технологій та виявлено ключові бар'єри для їх впровадження в Україні.

Розділ 2 присвячений розробці концептуальної моделі цифрового управління на основі принципу цифрового двійника, удосконаленню методу управління проєктами та формуванню комплексу аналітичних моделей для підтримки прийняття рішень.

У Розділі 3 розроблено метод комплексної оцінки ефективності цифрових рішень та обґрунтовано інноваційний інструмент – індекс цифрової зрілості (DMI) з детальною методикою його розрахунку.

У Розділі 4 викладено результати практичної апробації розробленого інструментарію, проведено оцінку ефективності та надано стратегічні рекомендації щодо використання ГІС у менеджменті.

Основними результатами дисертаційного дослідження є:

- узагальнено теоретико-методологічні засади цифрової трансформації управління інфраструктурними проєктами та систематизовано ключові бар'єри на шляху її реалізації в Україні;

- розроблено концептуальну модель цифрового управління дорожньо-інфраструктурними проєктами на основі принципу динамічного цифрового двійника;

- удосконалено метод управління дорожньо-інфраструктурними проєктами, що реалізує проактивний, аналітично орієнтований підхід та забезпечує наскрізну інтеграцію даних (digital thread);

- розроблено комплекс аналітичних моделей (оптимізаційних, прогностичних, імовірнісних) для кількісного обґрунтування управлінських рішень у сфері планування ресурсів, оцінки технічного стану та аналізу ризиків ДТП;

- запропоновано та обґрунтовано індекс цифрової зрілості (DMI) як інтегральний інструмент для комплексної діагностики та порівняльної оцінки організацій дорожньої галузі;

- проведено комплексну діагностику цифрової зрілості на прикладі КП «Центр організації дорожнього руху», що підтвердило високий рівень ефективності впроваджених цифрових рішень;

- розроблено практичні рекомендації для органів влади та комунальних підприємств щодо стратегічного використання ГІС, стандартизації даних, розвитку кадрового потенціалу та масштабування цифрових практик.

Наукова новизна дисертаційного дослідження полягає у розробці цілісної методологічної основи цифрового управління дорожньо-інфраструктурними проєктами.

Вперше:

- запропоновано метод розрахунку індексу цифрової зрілості (Digital Maturity Index, DMI) як інтегрального показника рівня цифровізації організацій у дорожньо-інфраструктурній сфері, що базується на критеріях технологічного впровадження (TAL), якості даних (DQA), кваліфікації персоналу (SCL) та економічного ефекту (EI);

- розроблено концептуальну модель цифрового управління дорожньо-інфраструктурними проєктами з використанням ГІС, що враховує специфіку просторово-часових даних та їх вплив на процес прийняття управлінських рішень.

Удосконалено:

- метод управління дорожньо-інфраструктурними проєктами на основі інтегрованих цифрових моделей, який, на відміну від традиційних підходів, базується на концепції динамічного цифрового двійника та проактивному, аналітично орієнтованому підході;

- метод комплексної оцінки ефективності управлінських рішень, який, на відміну від існуючих, базується на конвергенції кількісної оцінки (KPI), аналітичного моделювання, якісного стратегічного аналізу та інтегральної оцінки за допомогою індексу DMI.

Набули подальшого розвитку:

- класифікація ключових бар'єрів (фінансових, технічних, організаційно-кадрових, нормативно-правових) на шляху цифровізації дорожньо-інфраструктурних проєктів в Україні, доповнена механізмом їх подолання;

- модель управління життєвим циклом дорожньо-інфраструктурних проєктів, що базується на наскрізній інтеграції геоінформаційних технологій на всіх етапах, забезпечуючи безперервність та цілісність проєктних даних (digital thread).

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості їх безпосереднього використання органами державної влади та комунальними

підприємствами при реалізації проєктів модернізації та відбудови дорожньої інфраструктури. Застосування розробленого індексу DMI та аналітичних моделей дозволяє підвищити обґрунтованість інвестиційних рішень, оптимізувати розподіл ресурсів та посилити прозорість, що відповідає цілям Національної транспортної стратегії України до 2030 року та Закону України «Про національну інфраструктуру геопросторових даних».

Практичне значення підтверджується апробацією результатів дослідження у виробничій діяльності Служби дислокації ТЗРДР комунального підприємства «Центр організації дорожнього руху» (м. Київ), зокрема при цифровій обробці результатів обстежень, плануванні маршрутів моніторингу, супроводі бази геопросторових даних та створенні веб-модуля для обліку документації. Результати дослідження також підтверджуються трьома свідоцтвами про реєстрацію авторського права на твір та публікаціями у фахових наукових виданнях.

Ключові слова: цифровізація, геоінформаційні технології, дорожня інфраструктура, управління проєктами, просторове моделювання, цифрове планування, Big Data, цифровий двійник, повоєнне відновлення, транспортна стратегія, інфраструктурні рішення.

ABSTRACT

Serhii Tymchenko. Digitalization of road infrastructure projects using geographic information technologies – A qualification research paper submitted as a manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in the specialty 073 “Management”. – Kyiv National University of Construction and Architecture, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2025

In the context of modern transformations in the road transport sector, the digitalization of management processes is becoming not only a technological requirement but also a critical condition for improving the efficiency and transparency of infrastructure project implementation. The growing scale of construction, increasing complexity of logistics models, changing climatic and social conditions, as well as rising public demand for process transparency, necessitate the implementation of new information-analytical systems capable of ensuring effective management throughout the entire life cycle of road infrastructure objects. In this context, Geographic Information Systems (GIS) serve as a key tool for the digital transformation of road infrastructure management.

This dissertation addresses the urgent scientific challenge of developing models, methods, and technological solutions for the digital management of road infrastructure projects using GIS and spatial analysis tools. The proposed approach is aimed at enhancing the efficiency, transparency, and justification of managerial actions at all stages of the infrastructure project life cycle, particularly in the context of Ukraine's large-scale post-war reconstruction.

The relevance of the research is significantly reinforced by the challenges of wartime. The large-scale destruction of road infrastructure caused by military actions—over 26,000 kilometers of roads and 344 bridges damaged as of the end of 2024—has presented the state with unprecedented tasks. This has created an urgent need not merely for restoration but for a qualitative modernization of the sector based on advanced technological foundations. Under conditions of limited resources and heightened demands for transparency from international partners, traditional approaches to project management have proven increasingly ineffective.

In this context, digitalization and geoinformation technologies have shifted from being a promising direction to becoming a critically important tool for crisis management and strategic planning. GIS technologies enable the rapid collection and analysis of damage data, the creation of digital maps of destruction, the modeling of reconstruction scenarios, and the optimization of resource allocation based on multicriteria analysis. However, despite several individual initiatives (such as DREAM and ONOVA GIS HUB) and the growing recognition of the issue's importance, a systematic scientific approach to developing digital project management models tailored to the Ukrainian context has been lacking.

Addressing this problem is possible through the development and implementation of a comprehensive set of models and methods that integrate the principles of project management with the analytical capabilities of GIS, BIM, IoT, and Big Data. The approach proposed in this study enables the creation of a unified information environment, supports proactive risk management, substantiates recovery priorities, and enhances the quality of managerial decisions. This contributes not only to effective reconstruction but also to the long-term sustainable development of Ukraine's transport infrastructure.

The main body of the dissertation consists of an introduction, four chapters, and general conclusions.

Chapter 1 presents an analysis of the theoretical and methodological foundations of digitalization in road infrastructure projects, systematizes scientific approaches, examines the current state of technologies, and identifies key barriers to their implementation in Ukraine.

Chapter 2 focuses on the development of a conceptual model of digital management based on the digital twin principle, the improvement of project management methodology, and the formation of a set of analytical models to support decision-making.

Chapter 3 introduces a method for comprehensive evaluation of the effectiveness of digital solutions and substantiates an innovative tool – the Digital Maturity Index (DMI), including a detailed methodology for its calculation.

Chapter 4 presents the results of the practical testing of the developed tools using the case of the Municipal Enterprise "Center for Traffic Management" (Kyiv), evaluates their effectiveness, and provides strategic recommendations on the use of GIS in management.

The main results of the dissertation research include:

- the theoretical and methodological foundations of the digital transformation of infrastructure project management have been summarized, and key barriers to its implementation in Ukraine have been systematized;
- a conceptual model of digital management for road infrastructure projects based on the principle of a dynamic digital twin has been developed;
- the method of managing road infrastructure projects has been improved to implement a proactive, analytically oriented approach that ensures end-to-end data integration (digital thread);
- a set of analytical models (optimization, predictive, probabilistic) has been developed to provide quantitative justification for managerial decisions in resource planning, technical condition assessment, and road accident risk analysis;
- the Digital Maturity Index (DMI) has been proposed and substantiated as an integral tool for comprehensive diagnostics and comparative evaluation of organizations in the road sector;
- a comprehensive digital maturity assessment has been conducted using the example of the Municipal Enterprise "Center for Traffic Management," confirming a high level of effectiveness of the implemented digital solutions (DMI = 90.88);
- practical recommendations have been developed for public authorities and municipal enterprises regarding the strategic use of GIS, data standardization, capacity building, and scaling of digital practices.

The scientific novelty of the dissertation lies in the development of a comprehensive methodological framework for the digital management of road infrastructure projects.

For the first time:

- a method for calculating the Digital Maturity Index (DMI) has been proposed as an integral indicator of the digitalization level of organizations in the road infrastructure sector. The index is based on four key criteria: Technology Adoption Level (TAL), Data Quality Assessment (DQA), Staff Competency Level (SCL), and Economic Impact (EI);
- a conceptual model of digital management for road infrastructure projects using GIS has been developed, taking into account the specifics of spatiotemporal data and their influence on the decision-making process.

Improved:

- the method of managing road infrastructure projects based on integrated digital models, which, unlike traditional approaches, is grounded in the concept of a dynamic digital twin and a proactive, analytically oriented approach;
- the method for comprehensive evaluation of managerial decision effectiveness, which, unlike existing methods, is based on the convergence of quantitative assessment (KPIs), analytical modeling, qualitative strategic analysis, and an integral evaluation using the DMI.

Further developed:

- the classification of key barriers (financial, technical, organizational and human resource, regulatory and legal) to the digitalization of road infrastructure projects in Ukraine, supplemented by a mechanism for overcoming them;
- the model for managing the life cycle of road infrastructure projects based on the end-to-end integration of geoinformation technologies at all stages, ensuring continuity and integrity of project data (digital thread).

The practical significance of the obtained results lies in their direct applicability by government authorities (such as the State Agency for Restoration and Infrastructure Development of Ukraine) and municipal enterprises in the implementation of road infrastructure modernization and reconstruction projects. The use of the developed Digital Maturity Index (DMI) and analytical models enables better justification of investment decisions, optimization of resource allocation, and enhanced transparency, aligning with the objectives of the National Transport Strategy of Ukraine until 2030 and the Law of Ukraine “On the National Infrastructure for Geospatial Data.”

The practical relevance is confirmed by the testing of the research outcomes in the operational activities of the Traffic Control Devices Deployment Service of the Municipal Enterprise “Center for Traffic Management” (Kyiv), particularly in the digital processing of inspection results, planning of monitoring routes, maintenance of the geospatial database, and development of a web module for documentation management. The results are further validated by three certificates of copyright registration and publications in professional scientific journals.

Keywords: digitalization; geographic information technologies; road infrastructure; project management; spatial modeling; digital planning; Big Data; digital twin; post-war recovery; transport strategy; infrastructure solutions.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Тимченко, С. (2024). Концепція цифровізації дорожньо-інфраструктурних проєктів в Україні: використання геоінформаційних технологій для підвищення ефективності управління. Управління розвитком складних систем, (60), с. 95–104. <https://doi.org/10.32347/2412-9933.2024.60.95-104>.

Особистий внесок автора полягає у формулюванні концепції цифровізації дорожньо-інфраструктурних проєктів в умовах воєнного стану, виокремленні основних бар'єрів впровадження цифрових рішень та обґрунтуванні послідовної моделі впровадження геоінформаційних технологій в управління дорожньою інфраструктурою.

2. Тимченко, С. (2025). Геоінформаційні системи в управлінні дорожньою інфраструктурою: виклики та рішення для України. Економіка та суспільство, (71). <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2025-71-154>.

Особистий внесок автора полягає в узагальненні міжнародного та українського досвіду цифровізації управління дорожньою інфраструктурою, систематизації регіональних ініціатив та формулюванні практичних рекомендацій щодо впровадження геоінформаційних систем у проєктне управління дорожньо-інфраструктурними об'єктами.

3. Тимченко, С. (2025). Застосування ГІС у менеджменті проєктів безпеки дорожнього руху: аналітичні інструменти та Український досвід. Економіка та суспільство, (74). <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2025-74-55>.

Особистий внесок автора полягає в обґрунтуванні доцільності використання просторового аналізу в проєктах з безпеки дорожнього руху, розробленні IT-архітектури ГІС-рішень для підтримки управлінських рішень, а також в аналізі практичних кейсів з міст України.

4. Васильєв І., Безшапкін С., Тимченко С. (2023). Проєкти організації дорожнього руху: питання понятійного апарату та нормативно-правового забезпечення в контексті національної безпеки та оборони країни. Управління розвитком складних систем, (56), 31–39. <https://doi.org/10.32347/2412-9933.2023.56.31-39>

Особистий внесок автора полягає в участі в аналізі нормативного тлумачення понять у сфері організації дорожнього руху та у формуванні висновків щодо їх уточнення в контексті реалізації проєктів модернізації

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

5. Веренич О. В., Безшапкін С. М., Васильєв І. А., Тимченко С. І. Роль просторових даних у реалізації інфраструктурних проєктів на прикладі організації дорожнього руху територіальних громад. Управління проєктами у розвитку суспільства. Управління проєктами післявоєнної розбудови України : тези доповідей XXI Міжнар. конф. / відповідальний за випуск С. Д. Бушуєв. м. Київ, 24 травня 2024 р. Київ : КНУБА, 2024. С. 86–90. URL: <https://repository.knuba.edu.ua/handle/123456789/13268>.

Особистий внесок автора полягає в участі у висвітленні можливостей використання цифрових технологій (ГІС, вебкартографії, цифрового зору) для збору, обробки та аналізу просторових даних в інфраструктурних проєктах у сфері організації дорожнього руху

ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ	2
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	16
ВСТУП.....	18
РОЗДІЛ 1. Теоретико-методологічні засади цифровізації дорожньо-інфраструктурних проєктів	27
1.1 Науково-методологічні засади цифрової трансформації дорожньо-інфраструктурних проєктів: аналіз літературних джерел.....	27
1.2 Аналіз сучасного стану та тенденцій розвитку цифрових технологій і ГІС у сфері управління дорожньо-інфраструктурними проєктами	33
1.3 Огляд існуючих методологій управління дорожньо-інфраструктурними проєктами та їх адаптація до вимог цифрової епохи	45
1.4 Визначення ключових принципів та підходів до інтеграції ГІС у процеси управління дорожньою інфраструктурою	52
1.5 Аналіз нормативно-правової бази	56
Висновок до першого розділу	59
РОЗДІЛ 2. Моделі та методи цифровізації управління дорожньо-інфраструктурними проєктами	61
2.1 Концептуальна модель менеджменту цифровізації дорожньо-інфраструктурних проєктів із використанням ГІС	61
2.2 Етапи цифровізації та роль геопросторових даних у підтримці управлінських рішень	86
2.3 Методи збору, аналізу та візуалізації даних для оптимізації управління..	95
Висновки до другого розділу	104
РОЗДІЛ 3. Моделювання та оцінка ефективності цифровізації управління дорожньо-інфраструктурними проєктами	106
3.1 Методу комплексної оцінки ефективності управлінських рішень у дорожньо-інфраструктурних проєктах	106

3.2 Інструментарій кількісної оцінки на основі КРІ та статистичних методів	113
3.3. Застосування якісних та стратегічних методів аналізу	116
3.4 Розробка та обґрунтування моделі індексу цифрової зрілості (DMI) для оцінки дорожньо-інфраструктурних проєктів.....	119
Висновки до третього розділу.....	143
РОЗДІЛ 4. Практичне впровадження та оцінка цифровізації дорожньо-інфраструктурних проєктів	145
4.1 Аналіз практичного впровадження геоінформаційних технологій в управлінні дорожньою інфраструктурою України	145
4.2 Діагностика цифрової зрілості та моделювання шляхів підвищення ефективності управління на прикладі КП «Центр організації дорожнього руху»	150
4.3 Оцінка ефективності впровадження цифровізації в контексті світового досвіду	163
4.4 Рекомендації для стратегічного використання ГІС у менеджменті	166
Висновок до четвертого розділу	173
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	175
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	177
ДОДАТКИ	197
ДОДАТОК А	198
ДОДАТОК Б.....	199
ДОДАТОК В.....	202
ДОДАТОК Г	204

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

- БД – База даних;
- ГІС – Геоінформаційні технології / Геоінформаційна система;
- ГЦЦК – Галузевий центр цифровізації та кібербезпеки;
- ДСТУ – Державний стандарт України;
- ДТП – Дорожньо-транспортна пригода;
- КІБ – Культура інформаційної безпеки;
- КП – Комунальне підприємство;
- НДР – Науково-дослідна робота;
- НІГД – Національна інфраструктура геопросторових даних;
- ОДР – Організування дорожнього руху;
- СОУ – Стандарт організації України;
- ТЗРДР – Технічні засоби регулювання дорожнього руху;
- ТРІЗ – Теорія вирішення винахідницьких проблем;
- ЦОДР – Центр організації дорожнього руху;
- ШІ – Штучний інтелект;
- API – Application Programming Interface (Інтерфейс прикладного програмування);
- BIM – Building Information Modeling (Інформаційне моделювання будівель);
- CoST – The Infrastructure Transparency Initiative (Ініціатива прозорості інфраструктури);
- CDOT – Colorado Department of Transportation (Департамент транспорту штату Колорадо);
- CPM – Critical Path Method (Метод критичного шляху);
- CRM – Система управління зверненнями громадян;
- DIIM – Dynamic Integrated Intelligence Model (Динамічна інтегрована модель інтелекту);
- DMI – Digital Maturity Index (Індекс цифрової зрілості);

- DQA – Data Quality Assessment / Data Quality and Availability (Оцінка якості даних / Якість та доступність даних);
- EI – Economic Impact (Економічний ефект);
- ERP – Enterprise Resource Planning (Системи планування ресурсів);
- FHWA – Federal Highway Administration (Федеральна адміністрація шосейних доріг США);
- GIS – Geographic Information System (Геоінформаційна система);
- GPS – Global Positioning System (Глобальна система позиціонування);
- IoT – Internet of Things (Інтернет речей);
- IRI – International Roughness Index (Міжнародний індекс рівності);
- ISSoP – Information Security System of Projects maturity model (Модель зрілості системи інформаційної безпеки проєктів);
- ITS – Intelligent Transport Systems (Інтелектуальні транспортні системи);
- KPI – Key Performance Indicators (Ключові показники ефективності);
- MDM – Multidimensional Data Models (Багатовимірні моделі даних);
- MMIO – Modified Multidimensional Information Objects (Модифіковані багатовимірні інформаційні об'єкти);
- OLAP – OnLine Analytical Processing (Аналітична обробка в реальному часі);
- PERT – Program Evaluation and Review Technique (Метод оцінки та аналізу програм);
- RAMS – Road Asset Management System (Система управління дорожніми активами);
- SCL – Staff Competency Level (Кваліфікація персоналу);
- SWOT – Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats (Сильні сторони, Слабкі сторони, Можливості, Загрози);
- TAL – Technology Adoption Level (Рівень впровадження технологій);
- TEN-T – Trans-European Transport Network (Транс'європейська транспортна мережа);
- VR – Virtual Reality (Віртуальна реальність);
- WIM – Weigh-in-Motion (Зважування в русі).

ВСТУП

Актуальність теми. Сучасний розвиток дорожньо-транспортної інфраструктури в Україні та світі супроводжується зростанням складності проєктів, посиленням вимог до їх ефективності, прозорості, екологічності та адаптивності до змін зовнішнього середовища. В умовах урбанізації, кліматичних змін, нестабільного фінансування та постійного оновлення нормативної бази традиційні підходи до управління дорожніми проєктами втрачають свою ефективність.

Ця актуальність набуває особливої гостроти в умовах воєнного стану та повоєнного відновлення України. Масштабні руйнування дорожньої інфраструктури, завдані внаслідок бойових дій, поставили перед державою безпрецедентні виклики. Станом на кінець 2024 року було пошкоджено понад 26 тисяч кілометрів доріг та 344 мости [1]. Це зумовлює нагальну потребу не просто у відновленні, а в якісній модернізації галузі на нових технологічних засадах. Ключовими завданнями стають оперативна оцінка завданих збитків, обґрунтоване визначення пріоритетів відбудови в умовах обмежених ресурсів та забезпечення максимальної прозорості використання коштів, зокрема від міжнародних партнерів.

Саме в цьому контексті цифровізація та геоінформаційні технології (ГІС) перетворюються з перспективного напрямку на критично важливий інструмент антикризового управління та стратегічного планування. ГІС дозволяють оперативно збирати та аналізувати дані про пошкодження за допомогою супутникових знімків і безпілотних літальних апаратів, створювати цифрові карти руйнувань, моделювати сценарії відновлення та оптимізувати розподіл ресурсів на основі багатокритеріального аналізу. Такі платформи, як DREAM та ONOVA GIS HUB, вже сьогодні демонструють потенціал цифрових рішень для забезпечення підзвітності та ефективної координації процесів відбудови.

На рівні державної політики цифровізація управління дорожньою галуззю визнана одним із пріоритетів, що відображено у низці стратегічних документів, таких як Національна транспортна стратегія. Проте, попри наявність окремих ініціатив та усвідомлення важливості проблеми, системного наукового підходу до

розробки моделей цифрового управління дорожньо-інфраструктурними проєктами, адаптованих до умов повоєнного відновлення, все ще бракує. Це створює гостру потребу у комплексному дослідженні даної теми, формуванні науково обґрунтованих підходів та інструментів для інтеграції ГІС-технологій у практику управління інфраструктурними ініціативами.

Таким чином, актуальність теми дисертаційного дослідження зумовлена об'єктивною необхідністю цифрової трансформації управлінських процесів у дорожній галузі, що багатократно посилюється викликами воєнного часу та завданнями масштабної повоєнної відбудови, а також недостатнім рівнем наукової розробленості питань використання геоінформаційних систем для забезпечення ефективного, прозорого та сталого розвитку та управління транспортною інфраструктурою України.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Робота над дисертацією виконувалась на кафедрі управління проєктами Київського національного університету будівництва і архітектури. Дисертація відповідає тематичному спрямуванню наукових розробок в рамках: науково-дослідної роботи (НДР) «Методологія управління проєктами модернізації організування дорожнього руху воєнної та повоєнної відбудови територіальних громад (№ 4 ДБ-2023)», номер державної реєстрації 0123U101943, керівник роботи д. т. н. професор, С. Д. Бушуєв (станом на кінець 2024 року реалізовано два етапи НДР); науково-дослідної роботи «Ціннісно-орієнтоване управління в умовах дигіталізації суспільства» (державний реєстраційний номер 0121U114473).

Крім того, дисертаційна робота пов'язана з реалізацією положень Закону України «Про національну інфраструктуру геопросторових даних» (№ 554-IX від 13.04.2020), що створює нормативну базу для широкого впровадження геоінформаційних систем у державне управління, включаючи транспортну галузь

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційного дослідження є розробка моделей, методів і технологічних рішень для цифрового управління дорожньо-інфраструктурними проєктами з використанням геоінформаційних систем, що дозволяють забезпечити ефективну інтеграцію просторових даних,

автоматизацію процесів прийняття рішень та підвищення результативності управлінських дій на всіх етапах життєвого циклу об'єкта інфраструктури.

Для досягнення поставленої мети в роботі необхідно розв'язати такі завдання:

- Обґрунтувати теоретико-методологічні засади цифрової трансформації управління інфраструктурними проєктами в умовах впровадження ГІС-технологій;
- Проаналізувати сучасні функціональні можливості геоінформаційних систем у сфері планування, реалізації та моніторингу дорожньо-будівельних ініціатив;
- Розробити концептуальну модель цифрового управління дорожньо-інфраструктурними проєктами та удосконалити на її основі метод управління дорожньо-інфраструктурними проєктами на основі інтегрованих цифрових моделей;
- Розробити комплекс аналітичних моделей для підтримки прийняття управлінських рішень у дорожньо-інфраструктурних проєктах, що включає моделі оптимізації ресурсів, прогнозування технічного стану та оцінки ризиків
- Обґрунтувати та запропонувати індекс цифрової зрілості (DMI) як інструмент для комплексної оцінки рівня цифровізації організацій, що реалізують дорожньо-інфраструктурні проєкти;
- Визначити організаційні умови та надати практичні рекомендації щодо впровадження геоінформаційних технологій у державному і приватному секторах інфраструктурного управління.

Об'єктом дослідження є процеси цифровізації та управління дорожньо-інфраструктурними проєктами на основі застосування геоінформаційних технологій, просторового аналізу, інструментів Big Data та сценарного моделювання.

Предметом дослідження є цифрові моделі та методи управління дорожньо-інфраструктурними системами, які формуються, функціонують і використовуються в рамках управління дорожньо-інфраструктурними проєктами.

Гіпотеза дослідження полягає в припущенні, що впровадження геоінформаційних систем в управління дорожньо-інфраструктурними проєктами дозволяє суттєво підвищити ефективність реалізації проєктів за рахунок підвищення точності прогнозування, оптимізації ресурсного забезпечення, зменшення адміністративного навантаження та посилення прозорості рішень, ухвалених у межах інфраструктурної політики.

Методи дослідження. Методологічною основою дисертаційної роботи є загальнонаукові принципи наукового пізнання, положення системного підходу, методологія управління проєктами, а також концепції цифрової трансформації інфраструктурної галузі із залученням геоінформаційних технологій. Дослідження ґрунтується на застосуванні комплексу загальнонаукових та спеціальних методів, що забезпечили системний аналіз процесів цифровізації управління дорожньо-інфраструктурними проєктами.

Серед загальнонаукових методів використано аналіз і синтез – для обґрунтування теоретичних засад цифрового управління та структурування ключових понять; індукцію та дедукцію – для формулювання гіпотез щодо впливу геоінформаційних технологій на ефективність управлінських процесів; порівняльний аналіз – для зіставлення традиційних та цифрових моделей управління проєктами; системний підхід – для побудови цілісної моделі цифрового управління дорожньо-інфраструктурними об’єктами.

До спеціальних методів належать просторове моделювання, що застосовувалося для побудови цифрових карт, аналізу геолокаційних характеристик об’єктів і прогнозування ризиків; геоінформаційний аналіз, який забезпечив інтеграцію просторових даних у процес підтримки управлінських рішень; а також методи візуалізації та інтерпретації даних із використанням спеціалізованого програмного забезпечення (QGIS, ArcGIS) для подання результатів дослідження у графічній формі.

Наукова новизна одержаних результатів

Наукова новизна дисертаційного дослідження полягає у розробці концептуальних та прикладних моделей та методів цифрового управління

дорожньо-інфраструктурними проєктами на основі використання геоінформаційних технологій.

Вперше:

- запропоновано метод розрахунку індексу цифрової зрілості (Digital Maturity Index, DMI) як інтегрального показника рівня цифровізації організацій у дорожньо-інфраструктурній сфері. Індекс базується на чотирьох критеріях: рівень впровадження технологій (TAL), якість і доступність даних (DQA), кваліфікація персоналу (SCL) та економічний ефект (EI), що дозволяє здійснювати комплексну та порівняльну оцінку цифрового розвитку;

- розроблено концептуальну модель цифрового управління дорожньо-інфраструктурними проєктами з використанням ГІС, що враховує специфіку просторово-часових даних та їх вплив на процес прийняття управлінських рішень.

Удосконалено:

- метод управління дорожньо-інфраструктурними проєктами на основі інтегрованих цифрових моделей, який, на відміну від традиційних підходів, базується на концепції динамічного цифрового двійника. Удосконалення полягає у впровадженні проактивного, аналітично орієнтованого підходу, що забезпечує постійний зворотний зв'язок з фізичним об'єктом на основі даних з ГІС, ВІМ та IoT-сенсорів, дозволяючи підтримувати прийняття рішень на всіх етапах життєвого циклу проєкту;

- метод комплексної оцінки ефективності управлінських рішень, який, на відміну від існуючих, дозволяє вимірювати не лише прямі фінансові показники, а й довгострокові та непрямі ефекти від цифровізації. Удосконалення полягає у конвергенції чотирьох взаємодоповнюючих аналітичних блоків: 1) кількісної оцінки на основі КРІ та статистичних методів; 2) аналітичного моделювання та прогнозування; 3) якісного стратегічного аналізу; 4) інтегральної оцінки за допомогою розробленого індексу цифрової зрілості (DMI).

Одержало подальшого розвитку:

- класифікація ключових бар'єрів (фінансових, технічних, організаційно-кадрових, нормативно-правових) на шляху цифровізації дорожньо-

інфраструктурних проєктів в Україні, яка, на відміну від існуючих загальних оглядів, доповнена механізмом їх подолання на основі адаптації міжнародного досвіду та використання інструментів державно-приватного партнерства;

- модель управління життєвим циклом дорожньо-інфраструктурних проєктів, яка, на відміну від фрагментарних підходів, базується на наскрізній інтеграції геоінформаційних технологій на всіх етапах: від передпроектного аналізу та планування до будівництва, експлуатації та моніторингу, що забезпечує безперервність та цілісність проєктних даних (digital thread).

Особистий внесок здобувача. Усі теоретичні положення, аналітичні узагальнення та прикладні результати, викладені в дисертації, одержані особисто здобувачем на основі самостійного опрацювання джерел, аналізу практики цифровізації та розробки власних пропозицій у сфері управління дорожньо-інфраструктурними проєктами.

Отримані результати використано при підготовці публікацій та в межах виконання дослідницької роботи згідно з науковими планами університету.

Теоретичне значення одержаних результатів. Теоретичне значення результатів дисертації полягає у розробці інтегрованої концептуальної моделі цифрового управління дорожньо-інфраструктурними проєктами, яка базується на принципах динамічного цифрового двійника та наскрізній інтеграції ГІС на всіх етапах життєвого циклу проєкту. Реалізація цієї моделі забезпечується обґрунтованим методологічним підходом до комплексної оцінки рівня цифрових перетворень, що базується на індексі цифрової зрілості (DMI), а також удосконаленим методологічним інструментарієм, що включає метод управління на основі інтегрованих цифрових моделей та метод комплексної оцінки ефективності рішень. Робота також поглиблює наукові уявлення про життєвий цикл інфраструктурних проєктів та систематизує ключові бар'єри на шляху цифровізації, що створює теоретичну базу для розробки стратегій їх подолання. У сукупності, ці результати розвивають теорію менеджменту в частині управління складними проєктами в умовах цифрових перетворень та підвищеної невизначеності

Практичне значення одержаних результатів. Практичне значення одержаних результатів полягає у спрямуванні цифрових рішень на підвищення ефективності управління дорожньо-інфраструктурними проєктами. Запропоновані моделі та методи цифрового аналізу дозволяють підвищити обґрунтованість прийняття управлінських рішень з урахуванням просторових, організаційних та соціально-економічних факторів.

Розроблений індекс цифрової зрілості (DMI) виступає інструментом багатокритеріальної оцінки цифрового потенціалу організацій, що дає змогу формувати сценарії цифрової трансформації та адаптувати стратегії реалізації проєктів відповідно до поточного рівня цифровізації.

Практичне значення отриманих результатів підтверджується:

- апробацією результатів у роботі служби дислокації технічних засобів регулювання дорожнього руху комунального підприємства «Центр організації дорожнього руху» (м. Київ) при здійсненні виробничих процесів та окремих технологічних операцій, пов'язаних із впровадженням ОДР та цифровізацією (додаток А):

- свідоцтвом про реєстрацію авторського права на твір № 132661 «Літературний письмовий твір наукового характеру «Рекомендації щодо змін у нормативно-правовій базі щодо організації дорожнього руху з врахуванням вимог до національної безпеки та оборони країни», зареєстровано 13.01.2025 (додаток Б);

- свідоцтвом про реєстрацію авторського права на твір № 132662 «Літературний письмовий твір наукового характеру «Звіт щодо впливу наслідків воєнних дій в контексті організації дорожнього руху щодо безпеки вулично-дорожньої мережі для населення територіальних громад та впливу на національну безпеку та оборону країни», зареєстровано 13.01.2025 (додаток Б);

- свідоцтвом про реєстрацію авторського права на твір № 132663 «Літературний письмовий твір наукового характеру «Звіт щодо існуючих методологій управління проєктами для інфраструктурних проєктів та програм в контексті їх застосування для організації дорожнього руху із зазначенням переваг та недоліків та визначенням пріоритетних методології чи їх конвергенції для

управління інфраструктурними проєктами в контексті їх використання для організації дорожнього руху», зареєстрованого 13.01.2025 (додаток Б).

Апробація результатів дослідження. Результати дисертаційного дослідження Тимченка Сергія Ігоровича на тему «Цифровізація дорожньо-інфраструктурних проєктів із застосуванням геоінформаційних технологій» були апробовані у виробничій діяльності Служби дислокації технічних засобів регулювання дорожнього руху комунального підприємства «Центр організації дорожнього руху» (м. Київ) (додаток А).

Апробація здійснювалась під час виконання завдань, пов'язаних із цифровою обробкою результатів обстеження технічних засобів регулювання дорожнього руху, плануванням маршрутів за допомогою ГІС, аналізом даних щодо дорожньо-транспортних пригод, супроводом бази геопросторових даних, впровадженням елементів електронної схеми організації дорожнього руху, а також підготовкою інструктивних матеріалів і навчанням персоналу. Окремо слід відзначити участь у створенні веб-модуля для обліку архівної документації з ОДР, що дозволило покращити оперативність доступу до інформації.

Практичне впровадження запропонованих у дослідженні підходів підтвердило їхню ефективність, сприяло оптимізації операційних процесів, підвищенню точності, актуальності та доступності геопросторових і проєктних даних, а також покращенню внутрішньої комунікації між структурними підрозділами підприємства.

Публікації.

За результатами проведеного дисертаційного дослідження опубліковано 5 наукових праць, з них 4 статті в наукових виданнях, включених до переліку наукових фахових видань України з присвоєнням категорії «Б», затверджених Міністерством освіти і науки України, у тому числі 3 одноосібно, 1 - тези у збірнику матеріалів міжнародної конференції. Список опублікованих праць за темою дисертаційного дослідження, поданий в додатку В.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається з анотації, вступу, чотирьох розділів, висновків та 4 додатків. У роботі містяться посилання на 156

літературних джерела. Загальний обсяг дисертації становить 214 сторінок, з них 159 сторінок основної частини, який містить 12 рисунків, 12 таблиць.

РОЗДІЛ 1. Теоретико-методологічні засади цифровізації дорожньо-інфраструктурних проєктів

1.1 Науково-методологічні засади цифрової трансформації дорожньо-інфраструктурних проєктів: аналіз літературних джерел

Комплексний характер управління цифровізацією дорожньо-інфраструктурних проєктів обумовлює синтез наукових досліджень, які виникають на перетині проєктного менеджменту, цифрової трансформації транспортних систем, просторового планування та інформаційних технологій. Аналіз наукових праць за останні роки дозволяє виділити декілька основних напрямів таких досліджень.

Напрямок 1: Еволюція методологій управління інфраструктурними проєктами.

Ключовим напрямом сучасних наукових досліджень є обґрунтування та вибір методологій управління, здатних відповідати на виклики, що постають перед інфраструктурними проєктами, особливо в умовах високої невизначеності. Аналіз праць показує відхід від суто класичних моделей до більш гнучких та комбінованих підходів.

Так, С. Д. Бушуєв, О. В. Веренич, Л. О. Терейковська та О. С. Войтенко обґрунтовують доцільність застосування синкретичного (гібридного) підходу, який поєднує стабільність та передбачуваність водоспадної моделі (Waterfall) з адаптивністю гнучких методологій (Agile). Такий підхід пропонується як найбільш ефективний для дорожніх проєктів, де частина завдань вимагає чіткої послідовності (наприклад, розробка та затвердження нормативно-правових документів), а інша – ітеративності та швидкого реагування на зміни (наприклад, розробка інформаційних систем та програмного забезпечення) [2]. Ця ідея знаходить своє продовження в дослідженнях О. С. Войтенко та І. А. Васильєв, присвячених модернізації комунальних підприємств у сфері ОДР в умовах воєнного та післявоєнного стану, де змішаний підхід також розглядається як інструмент для реалізації комплексних територіальних мультипроєктів [3].

Тенденція до застосування адаптивних підходів (Agile, Scrum, PRINCE2) простежується і в роботах Н. С. Бушуєвої та О. В. Черниш, які аналізують управління проектами сталого розвитку, що реалізуються в ризиковому середовищі, де гнучкість є запорукою стійкості до зовнішніх впливів [4]. Водночас С. В. Захарчишин та О. Б. Зачко наголошують, що навіть при переході до гнучких практик, не втрачають актуальності класичні інструменти мережевого планування, такі як метод критичного шляху (CPM) та метод оцінки та аналізу програм (PERT), які залишаються важливими для стратегічного планування та оцінки ризиків у масштабних інфраструктурних проєктах, особливо в екстремальних умовах воєнного стану [5].

Таким чином, науковці сходяться на думці, що не існує єдиної універсальної методології, а її вибір має бути контекстуальним, із все більшим зміщенням акценту в бік гібридних моделей, що забезпечують необхідний баланс між структурованістю та адаптивністю.

Напрямок 2: Технологічний фундамент: інтеграція даних та цифрові двійники.

Основою цифрової трансформації дорожньої інфраструктури є створення єдиного інформаційного середовища, яке забезпечує цілісність та безперервність даних протягом усього життєвого циклу проєкту. У своїх працях Т. А. Гончаренко детально досліджує цю проблематику, акцентуючи увагу на тому, що ключовим завданням у цьому напрямі є технологічна та методологічна інтеграція ГІС, що надають просторовий контекст, та BIM, яка пропонує деталізовані інформаційно насичені моделі окремих об'єктів. Саме синергія цих технологій, доповнена даними з IoT, закладає фундамент для створення цифрових двійників (Digital Twins) міських та інфраструктурних об'єктів [6]. Розвиток концепції цифрових двійників є також ключовим напрямом міжнародних досліджень, де, зокрема, M. Buuveibaatar, Y. Yan та їхні співавтори пропонують концептуальні каркаси для цифрових двійників в управлінні дорогами, пропонуючи багаторівневі моделі для збору, обробки, моделювання та аналізу даних [7;8]. При цьому, як зазначають A. Pavard, A. Dony та P. Bordin, однією з головних проблем залишається забезпечення

безперебійної інтеграції між ГІС, що відповідають за ширший просторовий контекст, та BIM, що містить детальну інформацію про конкретний об'єкт [9].

Для вирішення цієї фундаментальної проблеми інтеграції українські вчені пропонують інноваційні методи роботи з даними. Так, у працях В. Михайленка, Т. Гончаренко, К. Чуприни та Т. Лященко розроблено методику інтегрованого опрацювання інформації на основі модифікованих багатовимірних інформаційних об'єктів (MMIO). Цей підхід дозволяє ієрархічно представляти різні типи просторових даних в єдиній моделі, що значно спрощує структуру баз даних та покращує якість інтеграції ГІС та BIM [10]. Для ефективного аналізу топологічних відносин між об'єктами (таких як сусідство, перетин, вкладеність) Т. Гончаренко, Г. Рижаківа та інші співавтори пропонують використовувати багатовимірні моделі даних (MDM) та OLAP-технології. Такий підхід, що базується на зберіганні інформації про взаємозв'язки у вигляді бінарних топологічних матриць, істотно прискорює виконання просторових запитів та підвищує якість контролю даних при генеральному плануванні [11].

Таким чином, наукові дослідження в цьому напрямку спрямовані на створення надійного технологічного підґрунтя для цифрових платформ управління, де інтегровані та структуровані дані є основою для подальшого аналізу, моделювання та прийняття обґрунтованих рішень.

Напрямок 3: Управління проєктами в умовах високої невизначеності та ризиків.

Зростаюча складність інфраструктурних проєктів та нестабільність зовнішнього середовища актуалізують дослідження, присвячені управлінню ризиками. Особливої гостроти ця проблематика набуває в умовах воєнного стану та повоєнної відбудови України. Так, С. В. Захарчишин та О. Б. Зачко, аналізуючи світовий досвід, наголошують на необхідності стратегічного планування, що враховує типові проблеми масштабних проєктів, та пропонують використання класичних методів оцінки ризиків, як-от CPM та PERT. Ефективне управління в таких умовах, на їхню думку, вимагає створення матеріальних резервів, тісної співпраці з державними структурами та забезпечення безпеки логістики [5]. Ці

принципи системного ризик-менеджменту знаходять своє відображення і в працях Н. С. Бушуєвої та О. В. Черниш, які розглядають їх у контексті проєктів сталого розвитку, де гнучкість, управління стейкхолдерами та здатність протистояти зовнішнім впливам є ключовими факторами успіху [4].

Окремим, проте невід'ємним аспектом управління ризиками в умовах цифровізації є забезпечення інформаційної безпеки. Цей напрям глибоко досліджується у працях М. Дорош, О. Трунова, І. Скітера та інших співавторів. Вони пропонують моделювати та аналізувати специфічні ризики в транспортно-логістичних центрах за допомогою нечіткої логіки (fuzzy logic) та методу аналізу ієрархій (Fuzzy АНР). Такий підхід дозволяє кількісно оцінювати рівень загрози та обирати ефективні стратегії захисту, формуючи основу для систем підтримки прийняття рішень [12; 13]. Важливим доповненням є дослідження людського фактора, де М. М. Войцеховська, М. С. Дорош, В. Ф. Гречанінов та О. В. Веренич пропонують функціональні моделі для автоматизованої оцінки культури інформаційної безпеки (КІБ) в організації та моделі зрілості системи інформаційної безпеки проєктів (ISSoP), що дозволяє поетапно інтегрувати безпекові процеси безпосередньо в життєвий цикл цифрового проєкту [14].

Таким чином, дослідження в цій сфері охоплюють широкий спектр підходів до управління ризиками: від стратегічного планування в екстремальних умовах до деталізованого математичного моделювання специфічних загроз, що виникають внаслідок цифрової трансформації.

Напрямок 4: Компетентнісний підхід та інноваційний потенціал організації.

Успіх складних цифрових проєктів визначається не лише технологіями, а й рівнем компетентності та інтелекту управлінських команд. У зв'язку з цим у працях С. Д. Бушуєва, Н. С. Бушуєвої, В. Бушуєвої та Д. Бушуєва розвивається компетентнісний підхід до управління. Ними запропонована динамічна інтегрована модель інтелекту (DІІМ), яка розглядає управлінський інтелект не як фіксовану характеристику, а як динамічну сукупність навичок. Модель структурує інтелект за двома високорівневими категоріями – рухомий та кристалізований – та сімома взаємопов'язаними компетентностями нижчого рівня: стратегічною,

управлінською, емоційною, соціальною, когнітивною, бізнесовою та технічною. Застосування цієї моделі, особливо в гнучкому Agile-середовищі, дозволяє посилити навички членів команди, покращити процеси вирішення проблем та, як наслідок, досягти кращих результатів проєкту [15].

Поряд із розвитком компетенцій, науковці пропонують системні інструменти для оцінки та стимулювання інноваційної спроможності самої організації. Зокрема, у роботі С. Бушуєва, Н. Бушуєвої, Д. Бушуєва та О. Ільїна, для цього адаптується теорія вирішення винахідницьких проблем (ТРІЗ) до сучасного середовища штучного інтелекту (ШІ). Розроблена на основі ТРІЗ методика дозволяє ідентифікувати ключові індикатори інноваційності та, використовуючи класичні інструменти (40 принципів, матриця суперечностей), формувати конкретні рекомендації для вдосконалення інноваційних процесів. Дослідження виділяє Pareto-набір із восьми ТРІЗ-принципів (зокрема, поділ, агрегація, зворотний зв'язок), які мають найбільший вплив на інноваційні проєкти у сфері ШІ, та пропонує систему критеріїв для вибору оптимальних рішень [16].

Отже, ці дослідження надають керівникам проєктів конкретні моделі та інструменти для роботи з двома ключовими активами в цифрову епоху: інтелектом команди та інноваційним потенціалом організації.

Напрямок 5. Інтелектуальне моделювання та оцінка ефективності.

Для підтримки прийняття рішень у складних транспортних системах науковці застосовують методи інтелектуального моделювання. Зокрема, у працях О. Зачко, В. Демчини та І. Зачка досліджується використання дискретно-подієвого моделювання для аналізу проєктів розвитку транспортної інфраструктури. Такий підхід, реалізований за допомогою спеціалізованих програмних засобів (наприклад, VISSIM, AnyLogic), дозволяє проводити віртуальні експерименти з транспортною мережею, враховувати потреби стейкхолдерів та оцінювати ризики, що в кінцевому підсумку суттєво зменшує витрати часу та коштів на реалізацію проєктів [17].

Водночас для оцінки результатів реалізованих проєктів та їхнього впливу на розвиток громад розробляються комплексні системи індикаторів. Так, О. Веренич, Є. Бойко та О. Войтенко, спираючись на міжнародні Белладжійські принципи

(Bellagio principles), пропонують комплексну систему показників для оцінки сталого розвитку територіальних громад. Їхня методика охоплює п'ять ключових сфер (забезпечення життєдіяльності, територіальний розвиток, підприємництво, соціальна та екологічна відповідальність) та передбачає розрахунок інтегрального показника сталості на основі нормалізованих значень КРІ. Такий інструментарій дозволяє об'єктивно оцінювати ефективність управлінських рішень, у тому числі в інфраструктурних проєктах, та спрямовувати розвиток громад у бік більшої стійкості [18].

Отже, ці дослідження забезпечують управлінців інструментами для повного циклу аналітичної підтримки проєктів: від прогностного моделювання потенційних рішень до вимірювання їхніх кінцевих результатів та довгострокового впливу на сталий розвиток.

Напрямок 6. Становлення та проблеми впровадження ГІС в дорожній галузі України: науковий дискурс.

Історично дорожня мережа України, сформована переважно в середині ХХ століття, не була розрахована на сучасні транспортні навантаження, а її розвиток та утримання впродовж років незалежності відбувалися в умовах хронічного недофінансування [19]. Це призвело до ситуації, коли переважна більшість доріг вичерпала свій ресурс, а управлінські рішення приймалися в умовах часткової невизначеності, без наявності об'єктивної та актуальної інформації [19]. Усвідомлення цієї проблеми стало поштовхом до розвитку наукової думки та державних програм з інформатизації галузі.

Науковий дискурс щодо застосування ГІС розпочався ще наприкінці 2000-х років. У своїх працях В. В. Сизоненко та Л. Л. Рибіцький обґрунтовували необхідність переходу до інтегрованих баз дорожніх даних, а Л. Л. Рибіцький та Г. А. Харченко розробляли концепції національної ГІС як інформаційної системи для всіх учасників руху [20; 21]. Ці ідеї знайшли практичне втілення у державних програмах, починаючи з 2002 року, коли було розпочато переведення дорожніх паспортів в електронну форму та розробку спеціалізованих систем: контролю стану

покриття (СУСП), управління мостами (АЕСУМ), обліку інтенсивності руху та аналізу ДТП [19].

Ключовим етапом став перехід від використання відносних лінійних прив'язок до повноцінних геоінформаційних технологій, що було закріплено в галузевих стандартах, які вимагали побудови тривимірних цифрових моделей доріг [19]. Паралельно розвивалася і академічна наука: О. Ю. Тимощук та О. І. Рахуба досліджували практичні проблеми впровадження ГІС [22], а інші вчені фокусувалися на використанні ГІС для конкретних завдань, як-от паспортизація та інвентаризація доріг [23] та інтеграція GPS-технологій у процеси інженерних вишукувань [24].

Проте, попри значні наукові та практичні напрацювання, створення єдиної національної ГІС зіткнулося з труднощами, пов'язаними з фінансовими та політичними кризами, що призвело до певної стагнації процесів у 2010-2018 роках [19]. Як зазначають О. Г. Тімінський та Р. Содома зі співавторами, на практиці цифровізація в Україні досі часто має фрагментарний, несистемний характер і здебільшого зосереджена на зборі даних, а не на їх глибокій інтеграції [25; 26]. Ця прогалина між наявними технологіями та їхнім системним впровадженням актуалізує дослідження провідних наукових шкіл С. Д. Бушуєва, О. Б. Зачко, А. М. Тригуби, що присвячені розвитку організаційної зрілості, адаптації моделей управління та впровадженню сучасних підходів до менеджменту проєктів [26-29]. Це підкреслює, що успіх цифрової трансформації дорожньої галузі залежить не лише від технологій, а й від впровадження відповідних сучасних моделей управління.

1.2 Аналіз сучасного стану та тенденцій розвитку цифрових технологій і ГІС у сфері управління дорожньо-інфраструктурними проєктами

У сучасних умовах швидкого розвитку інформаційних технологій, цифровізація стала ключовим фактором трансформації управління дорожньо-інфраструктурними проєктами. Традиційні методи вже не спроможні відповідати

вимогам динамічного світу, де успіх залежить від доступу до актуальних даних, гнучкості в адаптації до змін та обґрунтованих прогнозів.

В умовах воєнного стану в Україні цифрові технології набули особливого значення через необхідність швидкого реагування на пошкодження дорожньої інфраструктури. Руйнування доріг і мостів у регіонах бойових дій (наприклад, Харківська, Донецька та Херсонська області) зумовили потребу у використанні цифрових технологій для оперативної оцінки стану, планування ремонтних робіт та ефективної координації ресурсів.

Серед цифрових технологій особливе значення для дорожньо-інфраструктурних проєктів мають ГІС, BIM, IoT та Big Data. ГІС забезпечують інтеграцію геопросторових, технічних та управлінських даних, що дозволяє комплексно підходити до управління інфраструктурними об'єктами на різних етапах життєвого циклу проєктів. Впровадження ГІС у процес планування дає можливість здійснювати просторовий аналіз, оптимізувати маршрути, визначати потенційні впливи проєктів на довкілля та населення. Світова практика застосування ГІС у сфері дорожньої інфраструктури демонструє активну інтеграцію цих систем на всіх етапах управління проєктами, що підтверджується численними міжнародними кейсами, зокрема описаними далі в розділі.

Автоматизація процесів збору даних шляхом використання IoT і сенсорних технологій дозволяє зменшити похибки та прискорити обробку інформації. Наприклад, датчики дорожнього покриття оперативно передають дані про його стан, що дозволяє своєчасно приймати управлінські рішення на етапах будівництва та експлуатації.

Моніторинг дорожньої інфраструктури за допомогою ГІС забезпечує централізоване управління та контроль, що особливо актуально для України через значну територіальну протяжність і необхідність об'єднання різномірних джерел даних.

Перспективи цифровізації дорожньої інфраструктури в Україні пов'язані з подоланням таких бар'єрів, як нестача фінансування, організаційні труднощі, низький рівень підготовки персоналу. Серед можливих шляхів подолання цих

бар'єрів є залучення міжнародних організацій та донорів (ЄС, USAID, Світовий банк), а також використання досвіду вітчизняних ініціатив, таких як проєкт Digital Road від Укравтодору.

Отже, цифрові технології, зокрема ГІС, є необхідною умовою підвищення ефективності управління дорожньо-інфраструктурними проєктами в Україні. Особливо важливим є їх використання у контексті післявоєнного відновлення інфраструктури, що вимагає подолання наявних бар'єрів та посилення співпраці з міжнародними організаціями.

Глобальний контекст.

Глобальні тенденції цифровізації в управлінні дорожньо-інфраструктурними проєктами впливають на формування місцевих політик, спонукаючи країни до інтеграції міжнародних стандартів і практик. Процеси глобалізації та інтернаціоналізації стандартів сприяють уніфікації підходів до впровадження цифрових рішень, що дозволяє країнам не лише покращувати внутрішні процеси управління, але й підвищувати свою конкурентоспроможність на світовому рівні. Наприклад, прийняття стандартів ISO для ГІС або BIM у національному законодавстві допомагає забезпечити сумісність даних і технологій, що є критичним для міжнародної співпраці та інвестицій. Це також створює передумови для впровадження передових методів управління, які раніше були доступні лише в найбільш розвинених економіках.

Глобальні тенденції цифровізації суттєво змінюють управління дорожньо-інфраструктурними проєктами. Сучасні дорожньо-інфраструктурні проєкти все частіше використовують цифрові технології на всіх етапах – від планування та будівництва до експлуатації та управління. Наприклад, ГІС забезпечують точне картографування територій і прогнозування стану інфраструктури, тоді як BIM стає стандартом моделювання дорожніх об'єктів у багатьох країнах, підвищуючи точність проєктування та оптимізуючи витрати.

Підходи до цифровізації, які ґрунтуються на автоматизації та прогнозованому аналізі за допомогою ІТ-інструментів, є універсальними для підвищення ефективності управління проєктами, зокрема в дорожньо-інфраструктурній сфері.

У статі [25] зазначається, що такі інструменти дозволяють оптимізувати процеси та передбачати ризики, що має безпосереднє застосування для планування й експлуатації дорожньої інфраструктури, де точність даних і оперативність рішень відіграють ключову роль.

Серед глобальних трендів також виділяються ШІ, IoT і Big Data, які трансформують транспортний комплекс, зокрема дорожню інфраструктуру, підвищуючи безпеку, прозорість і ефективність управління [26, 30].

IoT дедалі активніше застосовується в управлінні дорожньою інфраструктурою. Сенсори, встановлені на дорогах, мостах і транспортних засобах, передають дані в реальному часі, що дозволяє ефективно контролювати стан інфраструктури. Це створює основу для систем "розумних доріг", які можуть самостійно інформувати управлінців про потребу в ремонті або про аварійні ситуації.

Екологічна складова також відіграє важливу роль у процесі цифровізації. Уряди багатьох країн активно підтримують ініціативи, які спрямовані на зниження вуглецевого сліду транспортних систем. Використання цифрових інструментів для оптимізації маршрутів та управління транспортними потоками дозволяє зменшити викиди CO₂ і підвищити ефективність використання енергоресурсів.

Загалом, цифровізація не лише змінює підходи до управління дорожньо-інфраструктурними проєктами, але й стимулює перехід до більш сталих і розумних транспортних систем. Ці глобальні тенденції формують основу для майбутнього розвитку інфраструктури, яка буде не лише економічно вигідною, але й орієнтованою на довгостроковий екологічний та соціальний ефект.

Регіональний аналіз. Розвиток цифрових технологій у дорожньо-інфраструктурних проєктах має свої особливості в різних регіонах світу, що обумовлено як рівнем економічного розвитку, так і урядовою підтримкою інновацій. Кожен регіон демонструє унікальний підхід до впровадження цифровізації, враховуючи локальні потреби, виклики та наявні ресурси. Аналіз практик, які реалізуються у провідних країнах світу, дозволяє не лише зрозуміти глобальні тенденції, але й визначити перспективні напрями для адаптації та

впровадження подібних рішень в інших країнах, зокрема в Україні. У цьому контексті доцільно розглянути ключові досягнення цифровізації в управлінні дорожньою інфраструктурою в таких регіонах, як США, Європейський Союз і Азія.

США. Сполучені Штати є лідером у цифровізації дорожньо-інфраструктурних проєктів, активно застосовуючи ГІС для планування та моніторингу доріг. Департамент транспорту штату Колорадо (CDOT) впровадив ГІС-дашборди на базі Esri ArcGIS, які автоматизують моніторинг дорожнього господарства, підвищують точність даних і дозволяють перейти до проактивного управління, наприклад, прогнозуючи знос покриття на основі даних про обробку протиожеледними реагентами [31]. Крім того, у США розвиваються концепції Digital Twin для моніторингу інфраструктури в реальному часі [32], впроваджується BIM як стандарт проєктування за рекомендаціями FHWA (Federal Highway Administration) для зменшення витрат і покращення координації [33], а також застосовуються IoT і AI для управління трафіком, як у системі Smart Mobility в Каліфорнії чи AI-аналітиці в Нью-Йорку і Лос-Анджелесі [34].

Європейський Союз ЄС активно просуває цифровізацію дорожньої інфраструктури через ініціативи Digital Single Market та проєкту Trans-European Transport Network (TEN-T), які забезпечують гармонізацію транспортних систем і впровадження “розумних” коридорів із електронними системами управління трафіком [35]. У рамках TEN-T розвиваються мультимодальні платформи та електрифікація для підвищення енергоефективності й зниження викидів. Важливим інструментом є BIM, обов’язковий у країнах на кшталт Великої Британії, Німеччини та Франції. Наприклад, проєкт Crossrail у Лондоні використав BIM для створення цифрових моделей, що оптимізували проєктування, зменшили витрати на виправлення помилок і покращили управління ресурсами в реальному часі [36]. Крім того, ініціатива INSPIRE створює стандарти для обміну геоданими, сприяючи координації багатонаціональних проєктів. У Швеції ГІС застосовують для централізованого моніторингу доріг і планування ремонтів [37 ст 8], а в Італії проєкт Smart Road інтегрує IoT-сенсори для динамічного управління швидкістю та інформування водіїв про небезпеки [38].

Досвід ЄС демонструє важливість **спільних стандартів і інтегрованих цифрових систем**: від сумісності даних до використання цифрових моделей для підвищення безпеки, екологічності та ефективності транспорту.

Азія. Країни Азії, зокрема Китай, Японія та Південна Корея, активно впроваджують цифрові технології в дорожню інфраструктуру. У Південній Кореї система 'Unick', розроблена ETRI, оптимізує сигнали світлофорів у реальному часі, скорочуючи час у дорозі на 15% і зменшуючи викиди, як продемонстровано на 10 перехрестях у Daejeon [39]. Інша система, 'TIMOS' від Bit Sensing, використовує радари, камери та AI для моніторингу дорожніх зон у містах Wonju, Jeju, Seongnam і Daegu, підвищуючи безпеку [39]. У Китаї технологія Digital Twin застосовується для моніторингу масштабних об'єктів, як-от міст Гонконг-Чжухай-Макао, де сенсори забезпечують реальний час моніторингу конструкцій і прогнозування дефектів [40]. Японія інтегрує IoT у “розумні дороги”, оснащені сенсорами, які інформують водіїв про погодні умови та затори, а також використовує роботизовані системи для безпеки руху. У мегаполісах, як Сеул і Токіо, IoT і Big Data підтримують “розумні” транспортні рішення, що відповідають викликам урбанізації.

Основні виклики та обмеження цифровізації.

Цифровізація управління дорожніми проєктами в Україні є надзвичайно актуальним напрямком модернізації інфраструктури. Проте, впровадження сучасних цифрових технологій стикається з низкою суттєвих бар'єрів, які стримують ефективну трансформацію галузі. Аналіз цих обмежень, а також вивчення перспектив цифровізації, дозволяє окреслити подальші напрямки розвитку та визначити шляхи подолання існуючих труднощів.

Фінансові виклики. Одним із головних бар'єрів цифровізації є значні фінансові вкладення. Впровадження інструментів, таких як ГІС, Digital Twin, IoT та Big Data, потребує серйозних витрат на створення інфраструктури, придбання ліцензійного програмного забезпечення (наприклад, ArcGIS, Bentley OpenRoads, Autodesk InfraWorks), а також на навчання персоналу та підтримку систем. Це робить фінансові обмеження спільним викликом для цифровізації в багатьох

сферах [25]. Глобально ці витрати ускладнюються такими економічними факторами, як обмежений доступ до фінансування, інфляція та валютні коливання [26]. Проблема є особливо гострою для країн, що розвиваються, де пріоритет часто віддається базовим інфраструктурним проектам, а нерівномірний розподіл ресурсів призводить до цифрового розриву між мегаполісами та сільською місцевістю.

В Україні цей фінансовий бар'єр посилюється недостатнім державним фінансуванням. Це ускладнює впровадження ГІС-рішень в інженерно-геодезичних вишукуваннях [41]. З подібними обмеженнями стикаються і малі та середні підприємства у сфері транспортної логістики, хоча доступність універсальних цифрових платформ поступово знижує цей поріг входу, залишаючи актуальним питання доцільності таких інвестицій [42]. Для подолання бар'єрів застосовують стратегії, що поєднують альтернативне фінансування (гранти, програми, інвестиції від Світового банку, ЄБРР) з оптимізацією витрат. Одне з рішень – використання ПЗ з відкритим кодом (QGIS, OpenStreetMap), що дозволяє зменшити витрати на ліцензії.

Технічні виклики. Інтеграція цифрових технологій у дорожнє будівництво та управління інфраструктурою стикається з низкою технічних викликів, ключовим з яких є проблема сумісності та інтеграції даних. Дані з різних платформ, таких як ГІС, BIM, ERP та IoT, часто мають різні формати, що ускладнює їхню синхронізацію. Ця проблема, що не є унікальною для дорожньої інфраструктури [25], особливо гостро проявляється в Україні. Одним із перших викликів є недостатність комплексного підходу до збору та обробки даних, що призводить до фрагментації систем управління, коли дані збираються окремими структурами за відсутності єдиної інтегрованої платформи. Такий розрізнений підхід ускладнює об'єднання та аналіз інформації, що є необхідним для прийняття обґрунтованих управлінських рішень [43 с. 13].

Як наслідок, накопичена інформація часто є різномірною та розмежованою, що ускладнює її порівняння та аналіз [44 ст. 210, 213]. Зокрема, у процесі інтеграції просторових даних виникає потреба у вирішенні питань семантики, топології, форматів і стандартів геопросторових даних [45 ст 242].

Додатково, ефективному функціонуванню сучасних ГІС перешкоджають нестача високошвидкісного інтернету в окремих регіонах та недостатня потужність серверів і обчислювальних систем для роботи зі складними ГІС-моделями, що потребують значних ресурсів.

Для подолання цих технічних обмежень необхідно розробити та впровадити стандартизовані протоколи обміну даними, які б забезпечили сумісність між різними системами. Важливими кроками також є використання хмарних технологій для зберігання та обробки ГІС-даних, що дозволяє забезпечити доступність та масштабованість ресурсів, та державні ініціативи з розширення інвестицій у цифрову інфраструктуру

Організаційні та кадрові виклики. Нестача кваліфікованих кадрів, здатних працювати з сучасними цифровими технологіями, є суттєвим бар'єром у цифровізації багатьох галузей [25], зокрема й дорожньо-інфраструктурної. Ефективне використання ГІС, BIM, IoT та Big Data вимагає від працівників не лише технічних знань, але й навичок аналізу великих обсягів даних та роботи з хмарними технологіями. Дефіцит таких фахівців у державних установах та компаніях безпосередньо уповільнює процес цифрової трансформації.

Іншим вагомим викликом є опір змінам. Багато організацій не готові адаптувати свої внутрішні процеси до нових цифрових стандартів, а персонал, що звик до традиційних методів управління, створює додаткові перешкоди. Як зазначається у звіті про реалізацію інфраструктурних проєктів в Україні, опір змінам з боку деяких стейкхолдерів та несприйняття нововведень частиною громадськості є значними перешкодами [46 ст. 48]. Цей опір часто посилюється недостатньою мотивацією персоналу до підвищення кваліфікації через брак фінансових стимулів.

Окрім внутрішніх кадрових проблем, цифровізація ускладнюється через складнощі у співпраці із зацікавленими сторонами. Недостатня залученість підприємств та органів влади до процесу ускладнює отримання необхідної інформації та затягує процес узгодження позицій [46 ст. 48].

Для подолання цих викликів необхідно впроваджувати освітні програми та тренінги, спрямовані на підвищення кваліфікації спеціалістів. Важливим є стимулювання державно-приватного партнерства для фінансування освітніх ініціатив, а також використання автоматизованих систем навчання, зокрема онлайн-курсів та сертифікаційних програм, що дозволяє працівникам здобувати нові знання у зручний для них час та темп.

Нормативно-правові обмеження. Суттєвим бар'єром для цифрової трансформації є відставання нормативно-правової бази від швидких темпів розвитку технологій. Відсутність єдиних стандартів для інтеграції ГІС, BIM та IoT призводить до фрагментації даних та несумісності систем, що гальмує ефективне впровадження цифрових рішень у дорожньому секторі. В Україні ця проблема проявляється у відсутності цілісної системи регуляторних документів, що б регламентувала використання цифрових інструментів у дорожньо-інфраструктурних проєктах. Дослідження правових аспектів підтверджують, що чинне законодавство не забезпечує належного правового регулювання процесів цифровізації, що ускладнює впровадження інновацій у транспортну інфраструктуру [47]. Відсутність гармонізації національного законодавства з міжнародними стандартами, зокрема з європейськими директивами (напр., про веб-доступність) та стандартом EN 301 549, створює додаткові перешкоди для інтеграції передового досвіду та технологій [48 с. 10].

Окремою гострою проблемою є забезпечення кібербезпеки. Швидке поширення цифрових технологій у транспортній галузі підкреслює недостатність нормативних стандартів для захисту від кібератак, що підвищує вразливість інфраструктури [30]. Дані, зібрані через ГІС, містять критично важливу інформацію про інфраструктурні об'єкти, яка може стати мішенню для зловмисників. Незахищені системи вразливі до несанкціонованого втручання, що створює загрозу для безпеки транспортної мережі та може призвести до значних економічних і соціальних втрат.

Подолання цих викликів вимагає розробки та впровадження єдиних стандартів для цифрової інфраструктури, що забезпечить сумісність різних систем.

Критично важливим є посилення законодавства щодо кібербезпеки через запровадження строгих протоколів захисту даних, регулярних аудитів безпеки та інтеграції систем управління доступом, що обмежить доступ до чутливої інформації лише уповноваженим особам.

Соціальні виклики та цифрова нерівність. Соціальні виклики цифровізації дорожньої інфраструктури проявляються на різних рівнях управління та реалізації проєктів. Основною проблемою є недостатнє розуміння переваг цифрових технологій серед зацікавлених сторін, що призводить до опору змінам та уповільнення процесів модернізації. Особливо це стосується працівників, які мають побоювання щодо можливої втрати робочих місць через автоматизацію процесів.

Важливим аспектом є також цифрова нерівність між різними регіонами та соціальними групами. У той час як великі міста активно впроваджують ГІС та інші цифрові рішення, менші населені пункти часто залишаються осторонь цих процесів через обмежені ресурси та недостатню обізнаність щодо можливостей цифрових технологій.

Для подолання цих викликів необхідно впроваджувати комплексні програми з підвищення цифрової грамотності та проводити роз'яснювальні кампанії щодо переваг цифровізації. Важливим є також забезпечення поступового переходу до нових технологій, що дозволить працівникам адаптуватися та набути необхідних навичок. Створення програм перекваліфікації та навчання допоможе зменшити соціальну напругу та забезпечити ефективне впровадження цифрових рішень.

Перспективи цифровізації.

Попри існуючі бар'єри, цифровізація відкриває широкі можливості для розвитку дорожньо-інфраструктурної галузі України, особливо в умовах післявоєнного відновлення. Сучасні інформаційні системи дозволяють оперативно збирати дані про пошкодження об'єктів, розробляти стратегії відновлення та контролювати виконання ремонтних робіт. Перспективними напрямками є інтеграція штучного інтелекту для аналізу даних і оптимізації управлінських рішень [25], використання блокчейну для забезпечення прозорості процесів [30] та

розвиток стратегічних моделей управління з фокусом на екологічній сталості [26]. Важливо, що впровадження цифрових інструментів також дозволяє ефективніше боротися з корупцією [49 с. 4].

Ключовим фактором успіху є підтримка міжнародних партнерів та інтеграція передового досвіду. Фінансова і технічна допомога, як-от стратегічний план ЄС «Відновлення України» [50] та проєкт «Підтримка цифрової трансформації» (DTA) від USAID та UK Dev [51], створює сприятливі умови для впровадження комплексних цифрових систем, гармонізації стандартів і модернізації галузі.

Таким чином, проведений аналіз дозволяє не лише ідентифікувати, а й систематизувати ключові перешкоди на шляху цифрової трансформації дорожньої галузі. На основі цього, запропоновано комплексний механізм їх подолання, що базується на комбінації стратегічних заходів: залученні міжнародної фінансової та технічної допомоги для вирішення фінансових проблем; впровадженні єдиних стандартів даних та хмарних рішень для усунення технічних розривів; розвитку організаційного потенціалу через системне навчання кадрів; а також на подальшій актуалізації нормативно-правової бази відповідно до європейських практик.

Вплив воєнного стану на цифровізацію.

Війна в Україні суттєво вплинула на пріоритети цифровізації дорожньо-інфраструктурних проєктів. До початку воєнного стану основна увага приділялася розвитку інноваційних рішень для оптимізації процесів управління дорожньою інфраструктурою, включаючи планування, моніторинг та прогнозування. Однак після початку війни ці пріоритети змістилися у бік оперативного вирішення проблем, пов'язаних із руйнуваннями транспортної інфраструктури.

Пошкодження значної кількості об'єктів дорожньої інфраструктури спричинили необхідність термінового впровадження цифрових інструментів для збору даних про стан інфраструктури. Основним завданням стало створення цифрових карт пошкоджень, що дозволяють ефективно планувати роботи з відновлення. Крім того, в умовах воєнного стану зросло значення ГІС, які забезпечують швидкий доступ до актуальної інформації про стан доріг і мостів, а

також дозволяють пріоритизувати відновлювальні роботи на основі рівня їхньої критичності.

Система управління цифровізацією у воєнний період почала активно використовувати супутникові дані для аналізу масштабів руйнувань і оцінки ризиків подальшого руйнування об'єктів через бойові дії. Ці заходи допомогли мінімізувати витрати на обстеження пошкоджених ділянок і підвищили швидкість прийняття управлінських рішень.

Згідно з дослідженням Національного інституту стратегічних досліджень, у грудні 2024 року основними напрямками цифрових перетворень були наближення українського законодавства до законодавства ЄС у сфері електронних комунікацій, розвиток транскордонної семантичної сумісності мережових та інформаційних систем, а також управління плануванням і забудовою територій, проєктами розвитку інфраструктури та регіонального й місцевого розвитку [52].

Крім того, у вересні 2022 року Україна долучилася до Програми «Цифрова Європа» до 2027 року, що сприятиме пришвидшенню цифрової трансформації та відновленню економіки України. [53].

Таким чином, війна змусила переорієнтувати цифровізацію дорожньої інфраструктури з довгострокових проєктів на негайні заходи з відновлення та забезпечення безпеки транспортних шляхів.

Роль цифрових інструментів.

Воєнний стан значно активізував використання цифрових технологій у сфері управління дорожньою інфраструктурою. Цифрові інструменти відіграють критичну роль у зборі, обробці та аналізі інформації для швидкого прийняття рішень щодо відновлення пошкоджених об'єктів.

Одним із ключових інструментів є ГІС, які дозволяють:

- Збирати та візуалізувати дані про пошкодження дорожньої інфраструктури в реальному часі, використовуючи супутникові знімки та дрони.
- Аналізувати транспортні потоки та створювати оптимальні маршрути для гуманітарних та військових перевезень.
- Моделювати сценарії відновлення та прогнозувати можливі ризики.

- Крім ГІС, активно застосовуються технології Big Data, які дозволяють:
- Прогнозувати фінансові витрати на відновлення на основі зібраних даних про пошкодження.
- Оцінювати потребу в будівельних матеріалах та ресурсах.
- Автоматизувати процеси планування реконструкції, використовуючи штучний інтелект для аналізу великих масивів даних.

Цифрові платформи управління відновленням відіграють ключову роль у координації всіх учасників процесу. Вони забезпечують взаємодію між державними органами, міжнародними донорами та виконавцями проєктів. Такі платформи дозволяють:

- Вести централізований реєстр пошкоджень та робіт, що виконуються.
- Виконувати моніторинг використання коштів у реальному часі.
- Забезпечувати прозорість та ефективність процесів реконструкції.

Прикладом такого рішення є платформа "Dream", створена для обліку пошкодженої інфраструктури та координації відновлювальних робіт [54]. Також використовуються технології супутникового моніторингу, наприклад система Copernicus, яка забезпечує високоточний аналіз пошкоджень у межах програми підтримки ЄС [55].

Цифрові технології значно покращують управління дорожньою інфраструктурою в умовах воєнного стану. Вони забезпечують швидкість, точність і прозорість прийняття рішень, що сприяє ефективному відновленню транспортної мережі.

1.3 Огляд існуючих методологій управління дорожньо-інфраструктурними проєктами та їх адаптація до вимог цифрової епохи

Управління дорожньо-інфраструктурними проєктами є ключовим для забезпечення їхньої ефективності, безпеки та сталого розвитку, що критично важливо для економічного й соціального прогресу. Традиційні методології управління, такі як планування, виконання та контроль, стикаються з викликами цифрової епохи, що вимагає їхньої адаптації до сучасних умов. Ложачевська та

Марціпака [30] наголошують, що транспортні системи потребують інноваційних підходів для оптимізації ресурсів у мінливих умовах.

Інтеграція цифрових інструментів, таких як ГІС і BIM, у застарілі методи ускладнена великими обсягами даних і мультидисциплінарністю команд, що знижує ефективність без адаптації [9]. Наприклад, утримання доріг потребує комплексного аналізу взаємодії інфраструктури з оточенням, що не повною мірою охоплюється традиційними підходами [9]. Кейс платформи “GNOSIS” (56) демонструє, що без адаптації методологій до цифрових вимог ефективність управління суттєво знижується. Адаптація методологій до ГІС, BIM та інших цифрових інструментів є необхідною для якісного менеджменту дорожньої інфраструктури.

Огляд традиційних методологій

До цифрової трансформації управління дорожньо-інфраструктурними проєктами базувалося на традиційних методологіях, таких як waterfall і CPM, що вирізнялися структурованим процесним підходом із чітким плануванням і послідовним виконанням етапів (проєктування, закупівлі, будівництво) [57] (Рисунок 1.1).

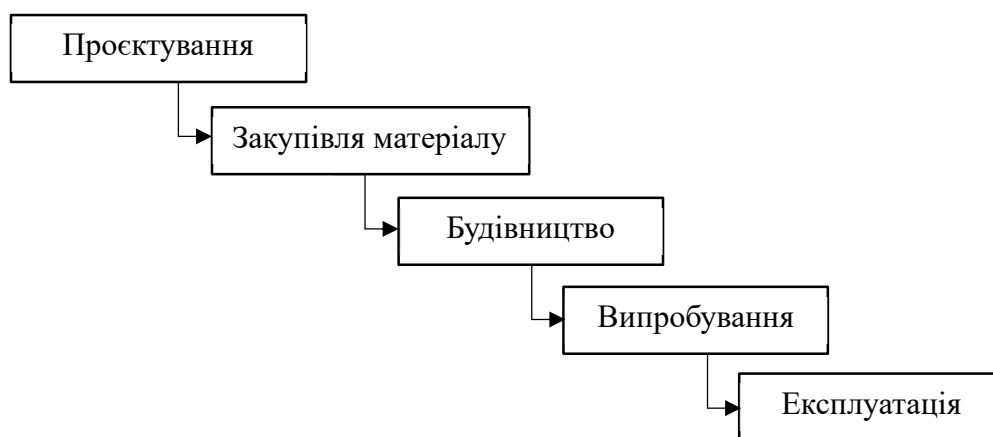


Рисунок 1.1 – Схема класичного Waterfall-підходу (джерело: сформовано автором)

CPM дозволяв оптимізувати ключові етапи, зосереджуючи ресурси на критичних завданнях, що було популярним у транспортних проєктах (Рисунок 1.2).

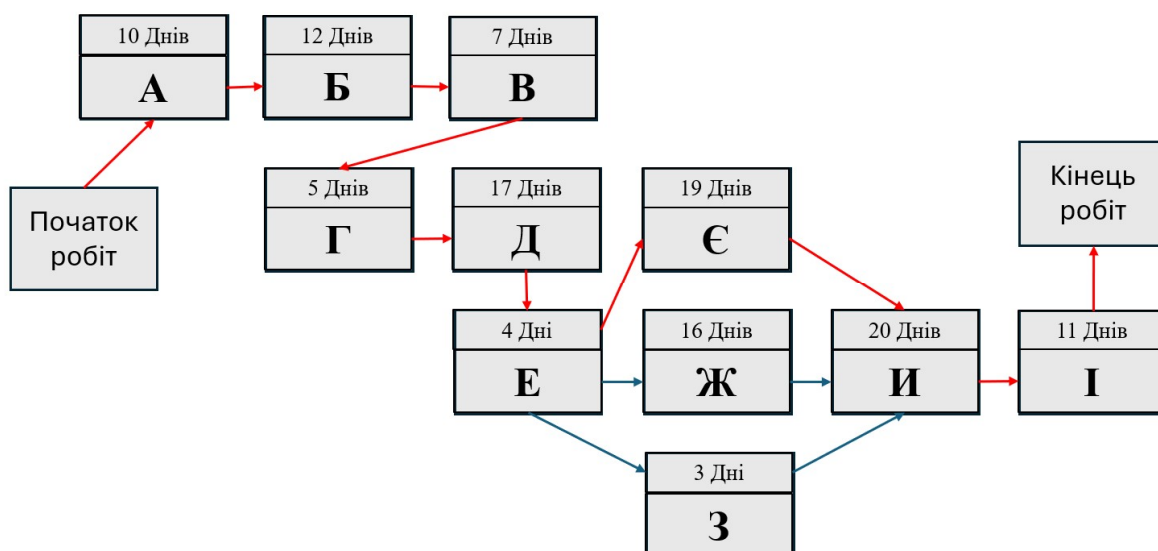


Рисунок 1.2 – Приклад схеми критичного шляху (CPM) (джерело: сформовано автором)

Для документування використовувалися паперова документація та локальні інструменти (Microsoft Project, Excel), які були стандартом, але обмежувалися ізольованим застосуванням.

Проте ці методи мали недоліки, що знижували їхню ефективність у сучасних умовах. Відсутність інтеграції між командами та системами ускладнювала координацію, а статична документація не відображала реального стану інфраструктури чи її взаємодії з оточенням [9]. Брак актуальних даних у реальному часі гальмував швидке реагування на зміни, призводив до неефективного використання ресурсів і збільшення витрат [58]. В таблиці 1.1 зображено порівняння Waterfall та Agile по ключовим характеристикам.

Таблиця 1.1 – Порівняння Waterfall і Agile за ключовими характеристиками

Критерій	Waterfall	Agile
Гнучкість	Низька	Висока
Планування	Попереднє	Ітеративне
Адаптивність	Обмежена	Висока
Доступ до даних	Статичний	Реальний час
Зворотний зв'язок	В кінці проєкту	Постійний
Підходить для	Стабільних етапів	Динамічних фаз

Джерело: сформовано автором

Таким чином, традиційні методології, попри структурованість, не відповідають динамічним умовам і цифровим можливостям сучасного управління дорожньою інфраструктурою.

Сучасні методології в умовах цифровізації

Цифрова трансформація сприяла впровадженню сучасних методів управління інфраструктурними проєктами, зокрема BIM – системного підходу до моделювання доріг із урахуванням їх структури та взаємодії з довкіллям [59]. Дослідження [9] підкреслюють ефективність інтеграції BIM з ГІС, що дозволяє створювати цілісні моделі з технічними та просторовими даними. У кейсі «GNOSIS» [56] така інтеграція дала змогу аналізувати стан мережі в реальному часі.

Іншим сучасним підходом є Agile та Scrum, що забезпечують гнучкість у фазах реалізації проєктів, особливо в умовах змін (наприклад, через погодні чи логістичні фактори) [60]. Дослідники [30] зазначають, що ітеративність і швидкий зворотний зв'язок підвищують ефективність, а гібрид Waterfall+Agile (як у кейсі «GNOSIS») дає змогу поєднувати структуроване планування з адаптивним виконанням (Рисунок 1.3).

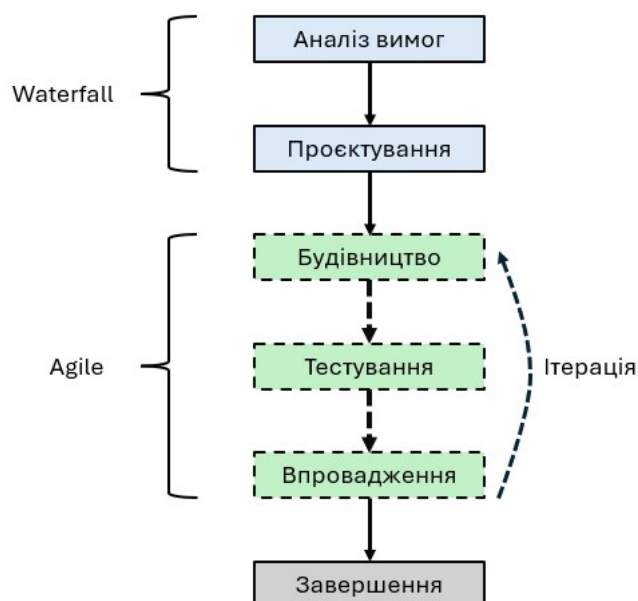


Рисунок 1.3 – Приклад схеми гібридного підходу Waterfall і Agile у дорожніх проєктах. Ілюструє комбінацію чіткого планування та ітеративної реалізації (джерело: сформовано автором)

Lean Construction спрямована на оптимізацію ресурсів у дорожньому будівництві, усуваючи неефективність, як-от надлишок матеріалів чи простої техніки [61]. поєднання таких підходів з автоматизацією підвищує продуктивність завдяки чіткому плануванню робочих потоків. Один з основних інструментів – Last Planner System®, що координує підрядників і мінімізує простої. Інтеграція Lean-підходів із хмарними технологіями покращує доступ до критичної інформації та знижує ризики дублювання даних. Наприклад, цифрові дашборди дозволяють оперативно контролювати хід робіт, а Big Data-аналітика допомагає виявляти проблемні зони та запобігати затримкам [62].

Інтеграція цих методів із цифровими інструментами, такими як BIM, ГІС та IoT, створює синергію для управління дорожньою інфраструктурою, де IoT збирає дані в реальному часі, а ГІС і BIM забезпечують їхній аналіз і візуалізацію для обґрунтованих рішень. Це оптимізує життєвий цикл проєктів і скорочує витрати, підвищуючи продуктивність.

Адаптація методологій до вимог цифрової епохи.

Цифровізація вимагає від управлінських методологій у дорожньо-інфраструктурних проєктах пристосування до зростання складності та обсягів даних. Гібридні підходи, що поєднують структурованість і гнучкість, стають ключовими. Дослідники [30] наголошують на важливості балансу між чітким плануванням і гнучкою реакцією. Waterfall ефективний на прогнозованих етапах (планування, проєктування), де необхідна стабільність [57]. Agile доцільний на динамічних фазах, як-от будівництво, де потрібна адаптація до змін, наприклад, затримок або погодних умов.

Цифрові платформи підсилюють гібридні підходи. Jira, MS Teams і Trello використовуються для управління задачами, відстеження прогресу, розподілу ресурсів і комунікації в реальному часі. Jira дозволяє планувати спринти, MS Teams – підтримує командну взаємодію [63]. Огляд функцій цифрових платформ для співпраці наведено в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 – Функції цифрових платформ для співпраці

Платформа	Функція	Перевага
Jira	Планування спринтів	Управління складними задачами
MS Teams	Комунікація	Швидкий обмін у реальному часі
Trello	Візуалізація процесів	Простота для невеликих команд

Джерело: сформовано автором

Системи моніторингу й звітності в реальному часі, вбудовані в цифрові платформи, підвищують прозорість та оперативність. Trello забезпечує просту візуалізацію процесів, що зручно для малих команд або окремих етапів [64]. Такі інструменти оптимізують співпрацю в мультидисциплінарних проєктах, зменшуючи затримки.

BIM, адаптований до дорожньої інфраструктури, є ключовим у цифровій трансформації. Інтеграція BIM з ГІС дозволяє створювати цифрові моделі, що поєднують інженерні та геопросторові дані, покращуючи планування та моніторинг [65]. У кейсі «GNOSIS» показано, як така інтеграція підтримує аналіз стану мережі в реальному часі.

Автоматизація й Big Data також покращують прийняття рішень. Завдяки IoT і великим даним можна виявляти ризики, зокрема проблемні ділянки будівництва [66]. Перепідготовка кадрів залишається критично важливою: без відповідних навичок цифрові інструменти не розкривають свій потенціал.

Переваги та виклики адаптації методологій.

Адаптація управлінських методологій до вимог цифрової епохи підвищує ефективність дорожньо-інфраструктурних проєктів і відповідає сучасним викликам. Однією з головних переваг є підвищення точності планування завдяки цифровим інструментам. Інтеграція BIM і ГІС дає змогу створювати детальні моделі, які охоплюють усі інфраструктурні аспекти. У кейсі «GNOSIS» цифрові двійники забезпечили точний аналіз стану мережі, зменшуючи помилки на етапі проєктування.

Скорочення строків реалізації забезпечується гнучкістю гібридних підходів і моніторингом у реальному часі. Поєднання Waterfall і Agile, дає змогу структуровано планувати та швидко реагувати на зміни під час будівництва («The use of the platform has resulted in a noticeable increase in productivity»). Цифрові платформи, зокрема Jira [63] та Trello, прискорюють координацію, скорочуючи час на ухвалення рішень і зменшуючи простой.

Оптимізація ресурсів завдяки цифровим інструментам знижує витрати. Інтеграція BIM з ГІС допомагає уникати надлишкових витрат через точне моделювання. Автоматизація й аналіз великих даних дозволяють прогнозувати потреби та виявляти неефективності [30], що підвищує економічність і конкурентоспроможність проєктів.

Втім, впровадження цифрових методологій у дорожньо-інфраструктурні проєкти стикається з низкою викликів. Основна проблема – нестача кваліфікованих фахівців. У традиційних галузях, як-от будівництво, трансформація гальмується через брак компетенцій і відсутність стратегії впровадження технологій. Дослідники [9, 25] зазначають, що ефективна робота з BIM і ГІС вимагає знання таких інструментів, як Autodesk Civil 3D чи GeoServer, маловідомих серед інженерів з класичною освітою та додають, що без належного навчання важко реалізувати потенціал автоматизації, що спричиняє затримки й зниження ефективності.

Інтеграція традиційних і цифрових систем ускладнена через використання застарілих практик, як-от паперова документація чи локальні бази, що погано сумісні з хмарними платформами та системами реального часу. Гармонізація різномірних даних для поєднання ГІС і BIM потребує значних ресурсів, ускладнюючи перехід для організацій із розвиненою традиційною інфраструктурою. Несумісність із сучасними технологіями (API, IoT) призводить до дублювання даних і додаткових витрат на модернізацію.

Опір змінам – ключовий бар'єр для впровадження нових підходів. Серед причин – вкоріненість традиційних методів (як-от Waterfall), обмежена готовність персоналу до новацій через страх змін, втрату впливу чи слабку комунікацію.

Дослідження [67 ст. 25] виокремлює технічні (нестача ресурсів, слабка інтеграція), культурні (звичка до старих схем, складність адаптації, особливо у старших працівників) і політичні чинники (перерозподіл влади, страх втратити позиції). У консервативному середовищі галузі це вимагає не лише технологій, а й активного управління змінами.

1.4 Визначення ключових принципів та підходів до інтеграції ГІС у процеси управління дорожньою інфраструктурою

Інтеграція ГІС у життєвий цикл дорожньої інфраструктури суттєво підвищує якість управління дорожніми проєктами. Поєднання просторових даних з інженерною інформацією дає цілісне уявлення про інфраструктурний об'єкт, що полегшує прийняття рішень на всіх етапах – від планування до експлуатації [68]. Застосування цифрових технологій у дорожніх проєктах забезпечує прозорість та підзвітність: актуальні дані про стан об'єктів і використання коштів стають доступними як управлінцям, так і громадськості [69]. Це сприяє ефективному плануванню розвитку доріг та контролю за використанням ресурсів. В результаті інтеграції ГІС підвищується оперативність управлінських дій та узгодженість між усіма учасниками проєкту.

Принципи інтеграції ГІС.

Принцип інтеграції даних. Усі геопросторові, технічні та управлінські дані мають об'єднуватись в єдину інформаційну базу. ГІС виступає інструментом, що усуває інформаційні бар'єри між системами, створюючи єдине джерело даних про дорожній об'єкт [70]. Для цього платформа функціонує як система запису, агрегуючи відомості з різних джерел (дороги, мости, фінанси тощо) в одну авторитетну систему. Це забезпечує ухвалення рішень на основі повної, узгодженої інформації, а не фрагментованих даних.

Принцип доступності. Усі зацікавлені сторони повинні мати оперативний доступ до актуальних даних у зручному форматі. Інтеграція ГІС із процесами проєктування й управління дозволяє інженерам накладати проєктні рішення на карту, а виконавцям – бачити ці зміни в реальному часі [133]. Це формує спільний

просторовий контекст для всіх учасників – від польових бригад до керівників проєктів і громад, сприяючи співпраці та усуваючи інформаційні розриви. Доступ до даних і візуалізація налаштовуються відповідно до ролі користувача, з урахуванням вимог безпеки [134].

Принцип автоматизації. Сучасні ГІС інтегруються з IoT і аналітичними алгоритмами, дозволяючи автоматичний збір та обробку великих обсягів даних. Датчики на інфраструктурних об'єктах у реальному часі фіксують трафік, погоду, вібрації, а машинне навчання аналізує ці дані для виявлення трендів і аномалій. Наприклад, система може спрогнозувати зношування мосту за певних умов і завчасно попередити про потребу ремонту [135]. Це дозволяє автоматизувати частину аналізу й планування (як-от графіки обслуговування), знижуючи залежність від людського чинника й пришвидшуючи ухвалення рішень [136].

Принцип зворотного зв'язку. Інформаційна система має постійно оновлюватись на основі фактичних даних з поля. Інтегрована ГІС функціонує як ядро цифрового контуру управління: дані з датчиків, інспекцій і користувачів оновлюють цифрову модель дороги. Це забезпечує двосторонній потік інформації – зміни на місцевості оперативно відображаються в моделі, а рішення, прийняті за її даними, надходять виконавцям [133]. Безперервний цикл “дані–аналіз–рішення–дія” підвищує адаптивність управління: система навчається, уточнює прогнози й коригує плани обслуговування.

Застосування ГІС на різних етапах життєвого циклу дорожньої інфраструктури.

Ефективність управління дорожньо-інфраструктурними проєктами залежить від застосування цифрових технологій на всіх етапах їхнього життєвого циклу. Використання ГІС забезпечує просторовий аналіз, моніторинг та управління даними, що є основою для прийняття рішень.

На кожному з етапів – від проєктування до експлуатації та стратегічного управління – ГІС виконують важливу функцію в інтеграції даних, контролі якості виконання робіт та оптимізації витрат.

Етап проєктування. ГІС забезпечує збір, обробку й аналіз просторових даних, необхідних для ефективного планування дорожньої інфраструктури. Вона дозволяє оцінювати місцевість, створювати інтерактивні карти та прогнозувати ризики, як-от підтоплення, зсуви ґрунту чи перевантаження мережі.

На стадії проєктування ГІС підтримує просторовий аналіз і прийняття рішень: інженери можуть порівнювати варіанти трасування з урахуванням рельєфу, інфраструктури та землекористування. Дані про геологію, гідрологію та екологічні обмеження дозволяють моделювати вплив дороги на довкілля та уникати ризикових зон [136].

Інтеграція ГІС з BIM забезпечує комплексне проєктування – від загального планування до конструктивних деталей – у єдиному середовищі. Це дозволяє прогнозувати бюджет, строки та екологічні наслідки. На початкових етапах, коли BIM-модель ще не готова, ГІС слугує платформою для збору вихідних даних і накладання креслень на карту, формуючи основу цифрового двійника [133].

Цифрові двійники, інтегровані з ГІС, допомагають моделювати результати проєкту та ідентифікувати проблеми на етапі планування, полегшуючи перехід до будівництва.

Етап будівництва. На стадії будівництва інтегрована ГІС виконує функції моніторингу та контролю. Всі роботи відстежуються через цифрову карту: у реальному часі видно прогрес на ділянках, переміщення техніки з GPS, використання матеріалів. IoT-датчики, зокрема сенсори ущільнення ґрунту чи температури асфальту, автоматично фіксують відповідність технології.

ГІС дозволяє порівнювати фактичні дані з планами, візуалізуючи будівельний прогрес. Дрони та супутникові знімки дають ортофотоплани, які інтегруються в систему для створення 3D-моделей і виявлення відхилень.

Інтеграція ГІС з BIM сприяє координації учасників проєкту, дозволяє уникати конфліктів і своєчасно вносити корективи [133]. ГІС, поєднані з IoT, BIM та технологією Digital Twin, створюють єдину платформу для оперативного моніторингу та ефективного контролю, що підвищує прозорість, зменшує ризики й покращує управління.

Етап експлуатації. Під час експлуатації ГІС слугує основним інструментом моніторингу стану інфраструктури й планування обслуговування. Дані про дороги (довжина, конструкція, технічний стан, інтенсивність руху) зберігаються в ГІС і прив'язані до координат. Завдяки цьому автоматично фіксуються дефекти на основі інспекцій, сенсорів або скарг користувачів через додатки.

ГІС у поєднанні з IoT забезпечує моніторинг у реальному часі: сенсори збирають дані про покриття, рух і погоду, передаючи їх до централізованої системи. Алгоритми ШІ аналізують ці дані й автоматизують прийняття рішень [30]. Наприклад, системи “розумних доріг” можуть повідомляти про аварії, пошкодження покриття або погодні загрози. Інтеграція з Digital Twin дозволяє не лише фіксувати поточний стан, а й прогнозувати зношення [26].

ГІС також оптимізує планово-попереджувальне обслуговування:

- аналіз ремонтів і трафіку визначає час наступного втручання [135].
- планувальники моделюють сценарії утримання та оцінюють їх вплив на інфраструктуру та бюджет;
- автоматизований збір даних дозволяє пріоритизувати ділянки за критичністю.

Таким чином, експлуатація стає проактивною: проблеми вирішуються до настання критичних наслідків. Це продовжує термін служби покриття та підвищує ефективність витрат на утримання [136].

Етап управління. Інтеграція ГІС з управлінськими системами (проектний менеджмент, фінанси, облік) забезпечує прозорість життєвого циклу дорожніх об'єктів і підвищує ефективність рішень. ГІС дозволяє прив'язати етапи будівництва або ремонту до конкретної ділянки на карті, забезпечуючи візуальний контроль за прогресом.

Поєднання з ERP-системами надає доступ до фінансової інформації: натиснувши на об'єкт на карті, можна дізнатись про підрядника, тендер, кошторис і витрати [132]. Це підвищує прозорість фінансування та контроль за бюджетом.

ГІС виконує роль шлюзу між інформаційними системами (BIM, бази даних, САПР), обмінюючись даними через стандартизовані формати та вебсервіси без втрат інформації [133].

На основі ГІС створюються інформаційні панелі (dashboard), які об'єднують географію, фінанси та технічні дані в єдиній системі, дозволяючи керівництву бачити повну картину й ухвалювати стратегічні рішення на основі актуальної інформації.

Інтеграція з BIM та управлінськими платформами. Для технічної інтеграції необхідна сумісність форматів і систем. Сучасні рішення використовують відкриті API та стандартизовані формати, зокрема CityGML і LandXML, що дозволяє обмінюватися даними між ГІС та BIM. ГІС-платформи, як-от Esri, вже підтримують імпорт моделей з Autodesk Revit чи Civil 3D без втрат деталей для відображення їх у геопросторовому контексті [70]. Це дозволяє включати 3D-моделі до єдиної інформаційної бази, доступної як інженерам, так і управлінцям. Водночас налагоджується обмін із ERP-системами: ГІС передає довжини, площі та обсяги робіт для розрахунків витрат, а отримує з ERP дані про виконання робіт і витрати, прив'язуючи їх до конкретних об'єктів на карті.

Така взаємодія – основа цифрової трансформації. За відгуками організацій, які впровадили подібні рішення, працівники отримують доступ до однакових актуальних даних незалежно від підрозділу [70]. У результаті ГІС-платформа перетворюється на операційний центр, де поєднується інженерний аналіз і стратегічне планування дорожньої інфраструктури.

1.5 Аналіз нормативно-правової бази

Аналіз нормативно-правового регулювання свідчить, що в Україні сформовано базове поле для впровадження ГІС у дорожньо-інфраструктурні проекти. Законодавча рамка є багаторівневою і включає закони, підзаконні акти, державні та галузеві стандарти, які значною мірою відповідають сучасним європейським підходам до цифрової трансформації.

Ключовим документом є Закон України «Про національну інфраструктуру геопросторових даних» (НІГД) № 554-IX, який заклав правові основи для створення, функціонування та розвитку НІГД, визначив принципи відкритості геоданих, інтероперабельності та створення національного геоportалу [71, 72]. Його доповнюють базовий, хоча й частково застарілий, Закон «Про топографо-геодезичну і картографічну діяльність» [73], а також закони у сфері цифрового розвитку, що стимулюють створення електронних послуг, які неможливі без використання геопросторових даних [74, 75, 76].

Механізми реалізації законів конкретизовано на рівні підзаконних актів, зокрема Постановою КМУ № 532 [72], що затвердила Порядок функціонування НІГД. Технічні аспекти уніфіковано через національні стандарти (ДСТУ) [77], гармонізовані з міжнародними серіями ISO 19100, та галузеві стандарти (СОУ), як-от СОУ 42.1-37641918-063:2016 [78] для ГІС автомобільних доріг «Укравтодору», що регламентує структуру та зміст дорожніх геоданих. Це створює основу для сумісності українських даних з європейськими (наприклад, директивою INSPIRE).

Нормативні засади знаходять практичне втілення у державних стратегіях та ініціативах. Це, зокрема, «Національна транспортна стратегія України до 2030 року», діяльність Міністерства цифрової трансформації, запуск Національного геоportалу НІГД та розвиток концепцій «Smart City» на місцевому рівні. Ці програми активно просувають створення конкретних геоінформаційних сервісів – від кадастрів до систем управління транспортом.

Водночас аналіз виявляє суттєву проблему: розрив між сучасним законодавством і застарілими нормативами, прийнятими до епохи масової цифровізації. Частина регуляторних актів не враховує новітні технології (BIM, БПЛА, хмарні ГІС), що стримує їх повноцінне впровадження. Крім того, існує потреба у гармонізації старих законів (зокрема, закону 1998 р. про картографічну діяльність) з положеннями нового закону про НІГД. Детальний огляд нормативно-правової бази у сфері використання ГІС та цифровізації наведено у додатку Г.

Таким чином, для подальшого вдосконалення нормативно-правового поля та створення сприятливого середовища для цифрової трансформації дорожньої галузі, доцільно зосередитись на таких кроках:

- актуалізація базового законодавства. Необхідно оновити Закон «Про топографо-геодезичну і картографічну діяльність», інтегрувавши в нього поняття НІГД, геопорталів та сучасних методів збору даних. Також варто розробити окремий закон або внести зміни до чинних актів для закріплення термінології та засад функціонування інтелектуальних транспортних систем (ITS).

- подальша гармонізація з нормами ЄС. В рамках євроінтеграції слід продовжити імплементацію регламентів ЄС у сфері геопросторових даних (INSPIRE) та транспортних систем (ITS), що може вимагати надання статусу обов'язкових для низки технічних регламентів та стандартів. Зокрема, варто на рівні постанови уряду затвердити перелік базових наборів геоданих (аналог Annex I, II, III INSPIRE) та технічні специфікації до них – що вже частково зроблено постановою №532 [72], але потребує регулярного оновлення. Для транспорту – розробити національну програму впровадження ITS, передбачивши обов'язковість сумісності систем (за стандартами DATEX II та ін.).

- розробка галузевих нормативів для нових технологій. Потребують унормування методики використання BIM-технологій, даних з БПЛА та лазерного сканування в дорожньому будівництві, а також стандарти обміну даними між різними галузевими реєстрами.

- вдосконалення регулювання кібербезпеки та оновлення даних. Зі зростанням ролі цифрових систем необхідно посилити вимоги до кіберзахисту критичної інфраструктури та чітко регламентувати процедури й періодичність оновлення базових наборів геоданих.

- розвиток кадрового потенціалу та міжнародна співпраця. Доцільно доповнити нормативне поле вимогами до кваліфікації та сертифікації ГІС-фахівців, а також на законодавчому рівні забезпечити участь України в міжнародних ініціативах з обміну геопросторовими даними. Наприклад, розглянути приєднання до European Location Framework чи інших програм ЄС, що можуть надати правову

основу для транскордонного обміну ГІС-даними (актуально для транспорту – обмін даними про вантажі, рух тощо з сусідами ЄС).

У чинному нормативному полі України досі відсутнє єдине тлумачення таких ключових понять, як «організація дорожнього руху», «управління дорожнім рухом» та «регулювання дорожнього руху». У різних стандартах і документах вони мають різні визначення або взагалі не визначені, що створює плутанину та ускладнює реалізацію проєктів у цій сфері. Як зазначено у [79], така термінологічна неузгодженість заважає створенню спільного бачення серед усіх учасників проєкту, що, у свою чергу, затримує впровадження необхідних змін у транспортній інфраструктурі. Уніфікація термінів є необхідною умовою для ефективного планування та реалізації проєктів, особливо в контексті відбудови країни. Підсумовуючи, законодавче регулювання ГІС в Україні поступово переходить від стадії «наздоганяння» до стадії проактивного розвитку. Щоб ця сфера розкрила свій потенціал повністю, державі потрібно забезпечити регулярне оновлення нормативної бази під швидкий технологічний прогрес. Прийняття гнучких технічних стандартів, тісна взаємодія між органами (щоб нормативи не суперечили один одному) та орієнтація на найкращі світові практики – запорука того, що ГІС стануть повсякденним інструментом ефективного управління державою і транспортною інфраструктурою.

Висновок до першого розділу

У першому розділі дисертаційного дослідження проведено комплексний аналіз науково-теоретичного та практичного підґрунтя для цифровізації управління дорожньо-інфраструктурними проєктами. Систематизація наукових джерел дозволила виявити ключові тенденції в еволюції методологій проєктного менеджменту, зокрема перехід від класичних моделей до гнучких та гібридних підходів. Такий аналіз дав змогу обґрунтувати теоретико-методологічні засади дослідження.

Дослідження сучасного стану технологій показало, що основу цифрової трансформації дорожньої галузі складає інтеграція ГІС, BIM та IoT, що створює

передумови для розробки цифрових двійників інфраструктури. Огляд міжнародної практики та вітчизняних ініціатив дозволив детально проаналізувати сучасні функціональні можливості ГІС на всіх етапах життєвого циклу проєктів.

Разом з тим, було ідентифіковано низку системних бар'єрів, що стримують цифровізацію в Україні: фінансові, технічні, організаційно-кадрові та нормативно-правові. Аналіз законодавства показав, що, попри значний прогрес, зокрема в рамках створення Національної інфраструктури геопросторових даних, залишається потреба в оновленні застарілих актів та подальшій гармонізації стандартів.

Отримані в розділі результати сформували необхідну доказову та теоретичну базу для переходу до розробки прикладних моделей та методів цифрового управління, які розглядаються у наступному розділі дослідження.

РОЗДІЛ 2. Моделі та методи цифровізації управління дорожньо-інфраструктурними проєктами

2.1 Концептуальна модель менеджменту цифровізації дорожньо-інфраструктурних проєктів із використанням ГІС

Цифрові технології кардинально змінюють підходи управління проєктами в дорожній сфері. Використання передових інструментів, зокрема ГІС, BIM, IoT, Big Data, ШІ і мобільних застосунків, забезпечує об'єднання різнопланових даних про інфраструктуру в єдиному цифровому просторі. Такий підхід гарантує своєчасність інформації, сприяє адаптивності планування та створює міцне підґрунтя для достовірного прогнозування. В українських реаліях, де відновлення дорожньої мережі після пошкоджень вимагає швидких і прозорих рішень, ця методологія набуває особливого значення. Далі в роботі розглянуто структуру концептуальної моделі цифрового управління, специфіку інтеграції геопросторових даних, принципи автоматизації процесів, забезпечення відкритості інформаційних потоків, а також аналітичну базу для обґрунтування управлінських рішень.

Структура концептуальної моделі цифрового менеджменту та основні компоненти моделі.

Концептуальна модель цифрового управління дорожніми проєктами спирається на принцип цифрового двійника – віртуального образу дорожньої інфраструктури, що віддзеркалює реальні об'єкти завдяки даним. Майкл Грів, який започаткував ідею Digital Twin, визначив три основні складові: фізичний об'єкт (наприклад дорожній знак, дорога, міст, тунель тощо), цифровий аналог у віртуальному просторі (інформаційна модель цього об'єкта) і потік даних, що з'єднує обидва рівні, постійно оновлюючи інформацію. Якщо говорити про дорожню сферу, то кожен елемент – від асфальтового покриття до світлофорів – отримує свій цифровий аналог. Актуальність моделі підтримується завдяки зв'язку між реальними сенсорами й платформою – усе це працює в реальному часі. Поєднання BIM, ГІС, зовнішніх баз даних та інтелектуальних платформ фактично наближає інфраструктуру до повноцінного цифрового двійника [68].

Джерела даних.

Формування цифрової моделі для управління дорожньо-інфраструктурними проєктами передбачає інтеграцію великого обсягу різнорідних даних, які надходять з багатьох джерел. На рисунку 2.1 узагальнено структуру цих джерел, що охоплюють як технічні вимірювання, так і управлінську інформацію.



Рисунок 2.1 - Структура джерел даних для формування цифрової моделі управління інфраструктурою (джерело: сформовано автором)

До основних категорій джерел даних належать як традиційні (документація, результати технічних обстежень), так і цифрові, що надходять у реальному часі з польових пристроїв, супутників або мобільних сервісів. Для зручності подальшої інтеграції та аналізу ці джерела класифікуються за типом походження, способом збирання й характером інформації, яку вони містять. У цьому контексті можна виокремити такі ключові групи:

- геоінформаційні дані (ГІС): векторні та растрові шари, топографічні основи, електронні карти й геодезичні знімки. Вони забезпечують просторову основу

цифрової моделі та дозволяють інтегрувати інші типи даних у єдиний координатний простір.

- дані дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) та БПЛА: супутникові знімки, аерофотозйомка, радарні й інфрачервоні дані, що використовуються для моніторингу стану об'єктів, виявлення пошкоджень, аналізу змін на місцевості.

- IoT-сенсори: пристрої для вимірювання навантаження, тиску, вібрацій, температури, вологості тощо. Дані з метеостанцій, сенсорів зносу та GPS-трекерів дозволяють здійснювати моніторинг у реальному часі.

- BIM-моделі: 3D-моделі інфраструктурних об'єктів зі специфікаціями, структурними схемами та базами даних, що застосовуються на етапі проектування та будівництва.

- результати інспекцій/обстежень: фото- та відеофіксація, візуальні дефекти, результати камеральної обробки, оцінка технічного стану.

- краудсорсингові джерела: повідомлення громадян, звернення через мобільні додатки, GPS-координати скарг, інтеграція з навігаційними сервісами.

- документація: стратегічні, нормативні та фінансові документи, тендерна інформація, графіки й реєстри, які забезпечують управлінський контекст цифрової моделі.

Кожне з цих джерел відіграє свою роль у створенні повноцінної цифрової платформи. Дані інтегруються в єдину систему для аналітики, прогнозування та підтримки рішень на всіх етапах життєвого циклу об'єкта.

Більш детальний опис методів збору даних, способів їх фіксації, передавання й обробки наведено в підрозділі 2.3.

Аналітичні блоки та інформаційна платформа.

Усі зібрані дані передаються до єдиної цифрової платформи управління проектом, яка зазвичай працює на хмарній основі й слугує центральним осередком системи. Її головна мета полягає в об'єднанні геопросторових і текстових даних, їх збереженні, обробленні та представленні користувачам у зрозумілій формі. Для реалізації цих завдань платформа оснащена кількома функціональними блоками.:

Блок планування та управління ресурсами.

Завдяки даним із ГІС та BIM платформа забезпечує можливість моделювання різноманітних сценаріїв будівництва або ремонту. Спираючись на історичні відомості та прогнозні моделі, система здатна **оцінити потребу в ресурсах** – матеріалах, техніці, робочій силі – для кожного сценарію. Наприклад, цифровий двійник дороги дозволяє відтворити сценарії типу “what-if”: як зміна типу матеріалу чи перенесення термінів робіт позначиться на бюджеті й графіку виконання [80]. Такі інструменти сприяють обґрунтованому вибору рішень для ефективного розподілу ресурсів, що допомагає звести витрати до мінімуму. Дослідження засвідчують, що використання цифрових двійників покращує планування життєвого циклу об’єктів: від підбору матеріалів до перевірки проєктних рішень, зменшуючи надлишкові витрати й оптимізуючи використання ресурсів [80]. Зокрема, прогнозно-аналітичні модулі дають змогу визначити найкращі строки постачання матеріалів, розрахувати завантаження бригад і запобігти дефіциту чи простоям техніки.

З метою підвищення економічної ефективності планування, доцільним є використання моделей оптимізації витрат, зокрема на утримання дорожньої інфраструктури. Задача оптимізації формалізується як задача лінійного програмування, метою якої є мінімізація сукупних витрат на ремонт і профілактику при дотриманні технічних вимог до стану покриття.

Загальний вигляд цільової функції:

- Мінімізувати:

$$Z = \sum_{i=1}^n (c_i x_i + d_i y_i) \quad (2.1)$$

- За умов:

$$\sum_{i=1}^n (a_{ij} x_i + b_{ij} y_i) \geq r_j \quad (j = 1, 2, \dots, m) \quad (2.2)$$

Де:

- x_i – обсяг інвестицій у ремонт ділянки i ,
- y_i – витрати на профілактику,
- $c_i d_i$ – одиничні вартісні коефіцієнти відповідно для ремонту і профілактики,
- $a_{ij} b_{ij}$ – ефективність заходів за критерієм j ,

- r_j – мінімальні нормативні вимоги до показника якості j .

Блок контролю виконання. Цей модуль забезпечує контроль за ходом реалізації проєкту та зіставлення поточного стану з плановими показниками. За допомогою інтерактивних дашбордів і карт відображається інформація про завершені чи відремонтовані ділянки, відсоток виконаних робіт і місця, де спостерігаються відхилення. Дані, отримані з ГІС – зокрема із застосуванням дронів і сенсорів, – формують для менеджерів чітке уявлення про стан будівництва прямо на мапі, дозволяючи порівнювати прогрес із графіком і проєктною документацією. Наприклад, якщо накласти реальну геометрію земляних робіт, зафіксовану зйомкою, на BIM-модель, можна одразу визначити, чи відповідають параметри проєкту. У разі виявлення розбіжностей – скажімо, коли фактичне розташування об'єктів виявляється з відхиленням від проєктного, – система автоматично надсилає сповіщення інженерам на об'єкті.

Блок аналітики та прогнозування. Цей компонент становить основу системи підтримки управлінських рішень. Великі обсяги даних (Big Data), що охоплюють стан доріг, рівень навантаження, погодні умови, результати перевірок та інші параметри, обробляються для прогнозування ризиків і оцінки продуктивності. Для цього застосовуються методи машинного навчання й статистичного моделювання, які допомагають визначити потенційні проблемні ділянки.

У рамках аналітичного модуля цифрового двійника особливу увагу приділяється прогнозуванню інтенсивності транспортного потоку, що є критичним для оцінки навантаження на інфраструктуру та планування ремонтних заходів.

З цією метою доцільно застосовувати стохастичні моделі, зокрема пуассонівський процес, що дозволяє моделювати ймовірність появи транспортних одиниць у певному часовому інтервалі. Такий підхід враховує випадкову природу дорожнього трафіку і забезпечує математичне підґрунтя для подальшого аналізу ризиків і зносу.

У загальному вигляді ймовірність фіксації k одиниць транспорту за час t при середній інтенсивності λ визначається як:

$$P(k, \lambda) = \frac{\lambda^k e^{-\lambda}}{k!} \quad (2.3)$$

Для врахування впливу просторових і часових змін (наприклад, пікових годин або сезонних коливань) застосовується неоднорідний пуассонівський процес, де інтенсивність λ моделюється як функція часу та координат:

$$\lambda = \lambda(t, x, y) \quad (2.4)$$

Це дозволяє формувати прогностичні карти навантаження дорожньої мережі, виявляти вузькі місця та підтримувати ухвалення обґрунтованих рішень щодо черговості ремонтів, розподілу ресурсів та пріоритетності інвестування.

Наприклад, аналізуючи просторово-часові зміни інтенсивності руху спільно з даними про стан покриття, система здатна передбачити деградацію окремих ділянок і завчасно спланувати ремонтні роботи [80]. Такий підхід сприяє зменшенню аварійності та оптимізації витрат на експлуатацію. Цифровий двійник, що безперервно оновлюється даними з IoT-сенсорів, не лише відображає поточний стан об'єкта, а й моделює можливі сценарії розвитку – наприклад, ймовірність появи тріщин залежно від навантаження та температурних умов [81].

У процесі планування ремонтних заходів важливим є прогноз технічного стану дорожнього покриття, що забезпечується за допомогою математичних моделей деградації. Однією з базових моделей є експоненційна залежність, яка описує зниження показника якості з часом:

$$S(t) = S_0 \times e^{-k} \quad (2.5)$$

де:

- $S(t)$ – індекс технічного стану в момент часу t ,
- S_0 – початкове значення індексу (наприклад, PCI),
- k – коефіцієнт деградації, який враховує інтенсивність руху, кліматичні умови та конструктивні характеристики дороги.

Така модель дозволяє розрахувати орієнтовний час досягнення критичних значень стану, після яких необхідне втручання. Це забезпечує перехід від реактивного до превентивного управління, що знижує експлуатаційні витрати та ризики аварійного стану.

Для підвищення точності оцінювання можуть застосовуватись регресійні моделі машинного навчання, навчені на історичних даних про знос покриття, а також даних із сенсорів IoT. Зокрема, використовуються багатофакторні моделі, які враховують погодні умови, навантаження транспорту та геопросторові особливості.

Такий проактивний підхід до технічного обслуговування (predictive maintenance) сприяє подовженню терміну служби інфраструктури та забезпечує підвищення безпеки дорожнього руху [80]. Крім технічних показників, аналітичний модуль дозволяє оцінювати фінансові аспекти, зокрема ступінь освоєння бюджету, ефективність підрядників і економічний ефект від оптимізації процесів. Автоматизовані платформи візуалізують ці результати у зручному форматі для прийняття управлінських рішень.

Також слід зазначити, що важливим інструментом для підвищення ефективності транспортного управління є просторове моделювання оптимальних маршрутів руху, що дозволяє мінімізувати витрати часу, пального або операційних ресурсів.

Оптимізаційна задача формалізується як класична задача найкоротшого шляху в графі:

$$\min \sum_{(u,v) \in E} w(u,v) \times x_{u,v} \quad (2.6)$$

Де:

- E – множина зв'язків між об'єктами транспортної мережі,
- $w(u,v)$ – вагова функція, що визначає витрати (наприклад, час у хвиликах або вартість палива)
- $x_{u,v}$ – змінна, що визначає, чи входить ребро в оптимальний маршрут

Для розв'язання використовуються алгоритми Дейкстри або A^* , які можуть працювати з динамічно змінними вагами, що оновлюються на основі актуальної інформації про трафік (затори, ремонтні роботи, погодні умови).

Впровадження таких моделей у цифрові платформи дозволяє в реальному часі адаптувати транспортні потоки, знижуючи рівень завантаженості вулично-дорожньої мережі, скорочуючи затримки та покращуючи логістику міських служб.

У сукупності з IoT-датчиками та ГІС-сервісами це сприяє автоматизованому ухваленню рішень у сфері диспетчеризації та управління мобільністю.

Важливим аналітичним компонентом цифрової моделі є також прогнозування ризиків дорожньо-транспортних пригод. На основі історичних даних та факторів ризику, таких як стан покриття, інтенсивність руху, погодні умови чи освітлення, здійснюється класифікація ділянок за ймовірністю виникнення ДТП. Для цього застосовується логістична регресія, яка дозволяє оцінити ймовірність настання події:

$$P(y = 1) = \frac{1}{1 + e^{-(\beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n)}} \quad (2.7)$$

де:

- $y = 1$ – настання ДТП,
- X_i – значення факторів ризику (стан дороги, інтенсивність руху, погодні умови тощо),
- β_i – вагові коефіцієнти, визначені емпірично.

Для врахування просторової концентрації небезпечних ділянок застосовується ядерне просторове згладжування або методи кластеризації інцидентів, що дозволяє створювати теплові карти ризику. Це сприяє виявленню пріоритетних зон для втручання, таких як покращення освітлення, запровадження обмежень швидкості або встановлення засобів примусового зниження швидкості.

Застосування такої моделі в рамках інтегрованої цифрової платформи, яка включає моделі цифрових двійників підвищує обґрунтованість рішень у сфері безпеки руху та дозволяє ефективно координувати профілактичні заходи.

Блок координації та комунікації. Цифрова платформа відкриває доступ до інформації для всіх зацікавлених сторін залежно від їхніх повноважень. Керівникам надаються узагальнені панелі з ключовими показниками ефективності (KPI), інженерам – деталізовані карти й моделі, а фінансистам – кошторисна документація та звітність. Однією з ключових переваг є прозорість і можливість спільної роботи: система забезпечує одночасний доступ різних підрозділів і організацій до єдиного набору актуальних даних. Як підкреслюють європейські фахівці, єдина цифрова модель дороги чи міста формує спільне розуміння ситуації для всіх департаментів,

що спрощує координацію дій і зменшує ймовірність непорозумінь [82]. До того ж, наявність загальнодоступних компонентів – таких як відкрита карта чи портал даних – сприяє зміцненню довіри з боку громадськості та донорів, гарантуючи відкритість інформації про перебіг проєкту.

Інтеграція геопросторових даних для управління проєктами

Принципи інтеграції. Центральним елементом концептуальної моделі виступає об'єднання даних із різноманітних джерел у єдиному геопросторовому контексті. Принцип “єдиного вікна” передбачає, що вся інформація, пов'язана з дорожнім проєктом – від геологічних особливостей ділянки до розкладу фінансування, – доступна через одну платформу й прив'язана до картографічної основи (Рисунок 2.2).

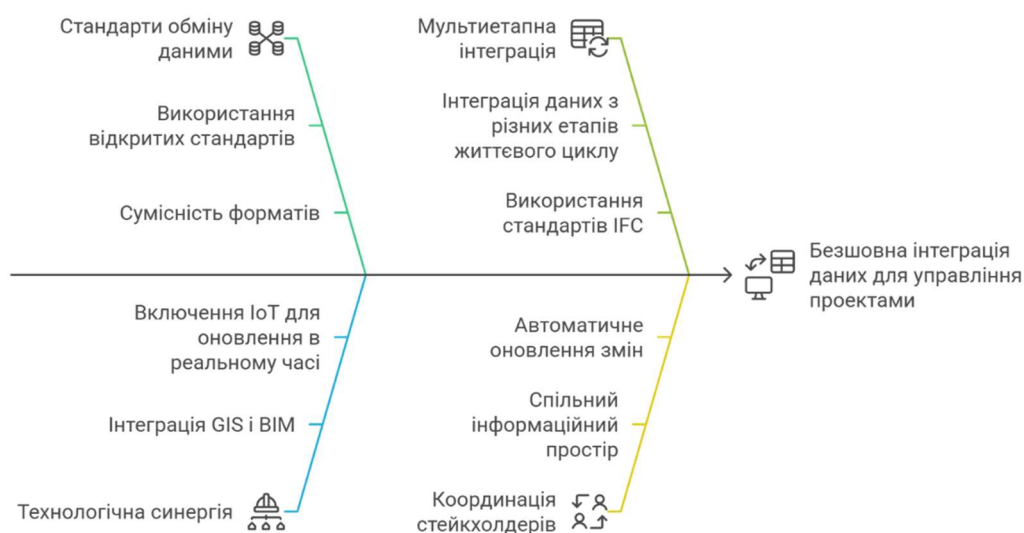


Рисунок 2.2 – Інтеграція геопросторових даних для управління проєктами
(джерело: сформовано автором)

Такого результату вдається досягти завдяки стандартизованому обміну даними та сумісності форматів. Досвід шведського проєкту SmartFlow засвідчує, що застосування відкритих стандартів – зокрема семантичного вебу W3C, схем IFC для BIM і GeoDCAT для геоданих – створює передумови для плавного поєднання інформації з ізольованих джерел і систем. У підсумку топографічні відомості, BIM-моделі, табличні реєстри (наприклад, інвентаризація мостів) і навіть дані від потокових сенсорів набувають семантичного зв'язку. На практиці це означає, що кожен об'єкт – скажімо, конкретний міст – у цифровій моделі супроводжується

повним набором даних: технічним паспортом із реєстру, тривимірною моделлю з BIM, географічним розташуванням, історією ремонтних робіт і поточними показниками датчиків. Завдяки цьому відповідальні особи бачать цілісну картину, а не розрізнені уривки, що значно покращує якість рішень у процесі управління.

Поєднання ГІС з системами керування проєктами (наприклад, синхронізація графіків MS Project із картами) додає просторовий вимір до планування і звітності. В результаті, учасники проєкту можуть бачити *де* саме відбуваються роботи відповідно до графіка, що виявляє можливі конфлікти або затримки, непомітні на традиційних діаграмах [83]. Візуалізація календарного плану на карті робить його більш інтуїтивно зрозумілим для всіх стейкхолдерів і прискорює цикл прийняття рішень. Досвід показує, що автоматизоване поєднання даних графіка з ГІС підвищує узгодженість між командами і допомагає завчасно виявляти та усувати ризики [83].

З метою формалізації просторових об'єктів для подальшого аналізу та оптимізації управління використовується їх векторне подання у координатному просторі:

$$\text{Об'єкт} \rightarrow \{(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)\} \quad (2.8)$$

де (x_i, y_i) – координати вузлів у системі WGS84 або UTM. Таке представлення дає змогу проводити просторові операції, зокрема побудову маршрутів, перехресний аналіз із шарами обмежень (екологічних, юридичних), визначення зон обслуговування та інше.

Для виявлення закономірностей у розміщенні інфраструктурних об'єктів та ситуаційних ознак застосовуються алгоритми кластеризації, зокрема:

- *K-means* – для виявлення груп із подібними характеристиками,
- *DBSCAN* – для визначення "гарячих точок", що не потребують попереднього задання кількості кластерів.

Такі методи дозволяють ідентифікувати зони ризику, оцінювати просторову щільність подій (наприклад, аварій), а також визначати найбільш пріоритетні локації для втручання – ремонтів, інспекцій або реконструкції. У ГІС-платформах

результати кластеризації можуть бути візуалізовані як аналітичні шари, що доповнюють семантичну основу цифрової моделі дорожньої інфраструктури.

ГІС + BIM + IoT як основа Digital Twin. Поєднання ГІС і BIM у синергетичному підході є основою для створення цифрового двійника дорожньої інфраструктури. BIM забезпечує деталізовану віртуальну модель об'єкта, тоді як ГІС додає географічний контекст і відображає його взаємозв'язки з навколишнім середовищем. Інтеграція технологій IoT, у свою чергу, підтримує оновлення даних у реальному часі. Дослідники підкреслюють, що саме комбінація openBIM із ГІС відкриває можливості для глибокої візуалізації інфраструктури та залучення зацікавлених сторін. Наприклад, у розробленій концепції для управління інфраструктурою особливу увагу приділено багаторівневому об'єднанню даних: інформація з різних етапів життєвого циклу – планування, будівництва, експлуатації – зводиться в єдину модель. Такий підхід формує наскрізну інформаційну зв'язність – так звану *digital thread*, яка забезпечує цілісність і безперервність даних на всіх етапах життєвого циклу інфраструктурного об'єкта. Завдяки цьому інформація передається від проєктування до експлуатації без втрат і дублювання, що сприяє автоматизації процесів і підвищує достовірність управлінських рішень.

Використання розширених стандартів IFC сприяє зв'язності даних, усуваючи розриви між фазами проєкту. Завдяки цьому інформація плавно передається від проєктувальника до експлуатаційного підрозділу без втрати якості. У підсумку виникає так звана “цифрова нитка” (*digital thread*), яка охоплює весь життєвий цикл дороги, гарантуючи цілісність і доступність даних на кожному з етапів.

Переваги інтеграції. Основна цінність інтегрованої моделі полягає в можливості всебічного аналізу та просторового осмислення проєкту. Керівники мають змогу одночасно враховувати особливості місцевості – рельєф, гідрологічні умови – разом із технічними характеристиками, такими як навантаження чи властивості матеріалів.

З точки зору управління проєктом, інтеграція передбачає, що всі учасники діють у рамках єдиного інформаційного поля – умовно кажучи, “на одній карті”.

Інженери, планувальники, екологи й фінансисти отримують доступ до спільного простору даних. Такий підхід полегшує координацію: наприклад, у разі коригування проєкту, як-от зміни траси дороги, відповідні оновлення автоматично відображаються в усіх пов'язаних елементах – кошторисах, робочих графіках, планах закупівель – завдяки взаємозв'язкам даних. Це усуває необхідність ручного узгодження різних версій документів, що раніше нерідко призводило до помилок.

Автоматизація управлінських рішень і ефективність процесів.

Автоматизація процесів. Цифрова платформа управління проєктами відкриває можливості для значної автоматизації рутинних завдань, таких як збирання даних, підготовка звітів і контроль стану об'єктів. Процес переходу до автоматизованого управління даними включає кілька етапів: від збору та аналізу даних до впровадження цифрових двійників і скорочення витрат. Це узагальнено на рисунку (Рисунок 2.3).

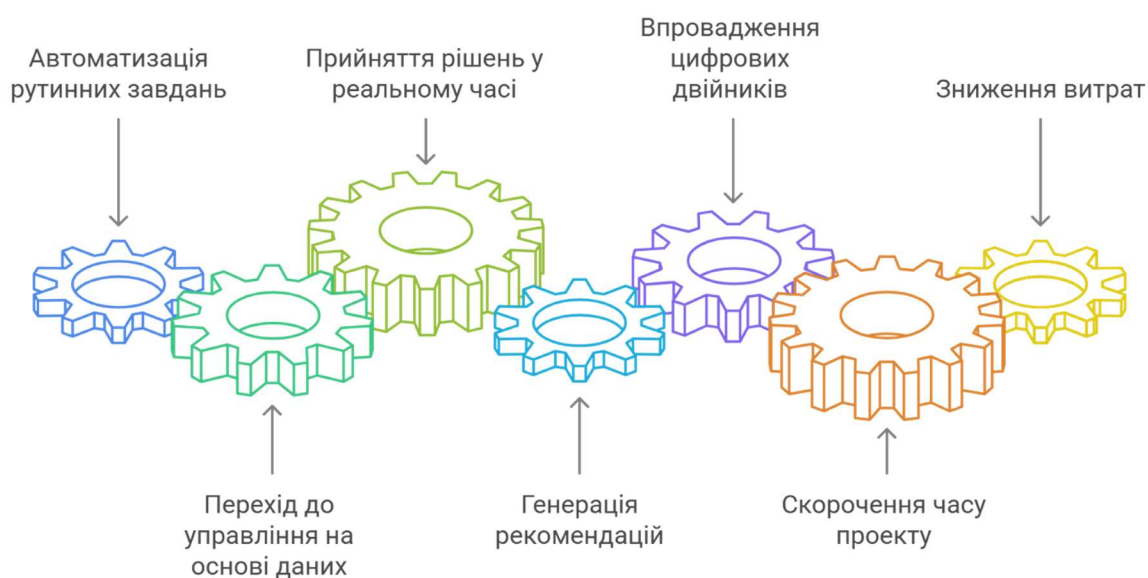


Рисунок 2.3 – Автоматизація та прийняття рішень на основі даних
(Джерело: сформовано автором)

Упровадження цифрового управління інфраструктурними проєктами зазвичай відбувається поетапно, проходячи через кілька стадій зрілості.

На початковому рівні цифровізація охоплює лише автоматизацію рутинних завдань – електронне формування звітів, базовий документообіг, просте візуальне відображення даних. Наступний рівень передбачає інтеграцію даних із сенсорів,

БПЛА та ГІС, що дозволяє здійснювати моніторинг і контроль стану інфраструктури в режимі реального часу.

На третьому етапі з'являється можливість аналітичного моделювання: прогнозування зношення, оцінка ризиків, оптимізація маршрутів і ресурсів. Найвищим рівнем зрілості вважається створення інтегрованої системи підтримки прийняття рішень (СППР), яка автоматично пропонує сценарії дій, ранжує їх за ефективністю та формує рекомендації в реальному часі. Повна реалізація такого циклу перетворює цифрову модель із пасивного джерела даних на активний інструмент управління, що дає змогу не лише реагувати на відхилення, а й передбачати їх, мінімізуючи втрати та покращуючи результативність усіх етапів життєвого циклу проєкту.

Завдяки підключенню датчиків та інтеграції систем значна частка інформації надходить і обробляється без людського втручання. Наприклад, якщо раніше інженерам доводилося самотійно обстежувати дороги для оцінки їхнього стану, то тепер сенсори й мобільні застосунки здатні миттєво передавати дані про виявлені дефекти. Така автоматизація зменшує залежність від людського фактору й прискорює опрацювання інформації. Фахівці зазначають, що впровадження систем планування ресурсів (ERP) разом із комплексним моніторингом скорочує час, витрачений на повсякденні операції – від збирання даних до складання звітності й перевірки виконання, – що, своєю чергою, сприяє економії проєктних коштів.

Прийняття рішень на основі даних. Автоматизація призводить до переходу від інтуїтивного підходу до управління, заснованого на даних (data-driven management), де ключову роль відіграють об'єктивна інформація та аналітика. Завдяки надходженню даних про перебіг робіт у реальному часі менеджери отримують можливість ухвалювати рішення швидко й на основі фактів. Наприклад, якщо аналітична система фіксує відставання підрядника від графіка, перерозподіл бригад чи техніки відбувається негайно, спираючись на конкретні показники, а не після виявлення затримки постфактум. Ба більше, цифрові платформи здатні не лише фіксувати стан, а й пропонувати оптимальні варіанти дій: вбудовані алгоритми генерують рекомендації – наприклад, скоригувати маршрут доставки

матеріалів у разі перекриття дороги чи обрати іншу техніку для прискорення земляних робіт, враховуючи аналіз продуктивності.

У контексті автоматизованого управління, орієнтованого на дані, важливу роль відіграють моделі багатокритеріальної оптимізації, що дозволяють оцінити ефективність різних сценаріїв управлінських дій. На відміну від класичних моделей, які фокусуються на одному критерії (наприклад, витратах), цей підхід враховує кілька цілей одночасно – економічних, технічних, соціальних.

Формально така задача описується як:

$$\max F(X) = [f_1(X), f_2(X), \dots, f_k(X)] \text{ за умов } g_j(X) \leq 0, j = 1, 2, \dots, m \quad (2.9)$$

де:

- $f_i(X)$ – функції, що відображають критерії ефективності (наприклад, економія коштів, мінімізація часу, підвищення безпеки),
- X – вектор керованих змінних (ресурси, строки, технології),
- $g_j(X)$ – обмеження (нормативи, бюджети, доступність техніки).

Застосування таких моделей дозволяє виявляти парето-ефективні рішення, коли покращення одного показника не можливе без погіршення іншого. Ці рішення може бути візуалізовано через діаграми Парето, що надає менеджерам можливість усвідомлено обирати стратегію відповідно до поточних пріоритетів: наприклад, скорочення термінів реалізації, зниження ризиків чи мінімізація витрат.

Впровадження подібних моделей у цифрову платформу управління забезпечує рівень аналітичної зрілості, за якого системи не лише реагують на зміни, а й прогнозують наслідки управлінських дій, оптимізуючи рішення в умовах обмеженості ресурсів.

Цифрова платформа також виконує функції системи підтримки прийняття рішень (СППР), що забезпечує менеджерів альтернативними варіантами дій у разі виявлення відхилень. На основі вхідних параметрів та аналітичних моделей СППР формує сценарії реагування, ранжує їх за критеріями ефективності (наприклад, вартість, тривалість, вплив на графік) та надає обґрунтовані рекомендації для ухвалення оптимального рішення.

Відомі приклади, коли моделювання за допомогою цифрового двійника дозволяло заздалегідь удосконалити проєктні рішення, щоб уникнути проблем під час реалізації. Так, у Китаї під час спорудження автомагістралі Юаньчен платформа BIM+GIS допомогла ще на підготовчому етапі виявити потенційні “вузькі місця” – складні тунелі та розв’язки – і розробити стратегії їхнього подолання, що зрештою полегшило будівельний процес. Цей проєкт став прикладом комплексного використання цифрових технологій: хмарна інтеграція BIM і ГІС забезпечила єдиний доступ до моделі для всіх учасників, а VR-технології сприяли навчанню з техніки безпеки [84]. Як результат, вдалося досягти суттєвих покращень – скоротити час на геодезичні роботи, звести до мінімуму помилки в координаті між командами, зменшити матеріальні відходи, а також посилити контроль за якістю й безпекою.

Скорочення часу та витрат. Автоматизація і оптимізація процесів безпосередньо впливають на економіку проєктів. Завдяки цифровим інструментам вдається скоротити тривалість циклів – як будівельного (швидше виконати роботи завдяки чіткішій координаті), так і управлінського (швидше узгоджувати рішення, отримувати дозволи через цифрові документи). За рахунок цього проєкт и здаються раніше, що особливо цінно у контексті масштабного відновлення. Крім того, проактивний моніторинг допомагає уникнути дорогих аварій чи переробок. Система раннього попередження (early warning) може сигналізувати про відхилення (просідання ґрунту, перевищення вібрацій) і дати змогу втрутитись до того, як проблема стане критичною. Як наслідок – менше переробок, менше простоїв і штрафів. В цілому, міжнародний досвід показує, що цифровий підхід знижує сумарні витрати життєвого циклу інфраструктури через оптимізоване обслуговування та підвищення продуктивності праці [80]. Цифрові двійники, зокрема, дозволяють зменшити незаплановані простої шляхом переходу від реагування на поломки до їхнього попередження (predict-and-prevent) [80].

Прозорість інформаційних потоків у цифрових платформах.

Відкриті дані та підзвітність. суттєво підвищує прозорість інфраструктурних проєктів, надаючи зацікавленим сторонам доступ до даних через

веб-портали та аналітичні панелі. Сучасні платформи, як-от українська система DREAM, публікують інформацію про проекти в реальному часі на кожному етапі. Зокрема, DREAM відкрито надає дані про плани, тендери, фінансування та хід робіт, що дозволяє громадськості й донорам контролювати використання коштів і дотримання строків. Це зміцнює довіру та запобігає корупції.

Єдиний інформаційний простір. Прозорість забезпечується і через внутрішній обмін інформацією, де цифрова модель виступає єдиним джерелом правди (single source of truth). Усі оновлення, як-от зміни кошторисів чи строків, миттєво фіксуються та стають видимими для всіх учасників. Системний журнал дій унеможливорює приховані маніпуляції та зміни заднім числом. У перспективі застосування технології блокчейн може додатково захистити дані від підробок, підвищуючи довіру до платформ.

Залучення громадськості і стейкхолдерів.

Цифрові двійники та інтерактивні платформи відкривають нові можливості для громадського моніторингу та залучення. Наприклад, у м. Аахен (Німеччина) створено цифровий двійник транспортної системи [82], де громадськість може не лише спостерігати за розвитком інфраструктури, а й бачити змодельовані наслідки рішень, як-от зміни маршрутів чи перекриття вулиць. Така наочність та прозорість підвищують довіру до планів влади і зменшують соціальну напругу. У дорожніх проєктах це реалізується через публічні онлайн-карти ремонтів або мобільні додатки для зворотного зв'язку.

Стандарти прозорості та відкритих даних стають вимогою міжнародних фінансових організацій (Світовий банк, ЄС) при фінансуванні інфраструктури. В Україні відповіддю на ці вимоги стала платформа DREAM, що забезпечує повну прозорість процесів відбудови. Вона функціонує як єдиний цифровий маршрут, що охоплює весь життєвий цикл проєкту: від визначення потреб та планування до тендерів у Prozorro та введення в експлуатацію. Кожен етап фіксується у цифровому форматі, залишаючи верифікований слід для контролю.

Аналітична підтримка менеджменту: прогнозування ризиків, оцінка ефективності, планування ресурсів.

Прогнозування та управління ризиками є однією з головних переваг цифрових моделей. Завдяки поєднанню історичних даних із технологіями штучного інтелекту система здатна завчасно виявляти потенційні проблеми. У дорожній інфраструктурі це особливо важливо: вчасне розпізнавання тенденцій до руйнування покриття чи зносу мостів дозволяє планувати ремонт до виникнення аварій.

Цифровий двійник, що постійно оновлюється сенсорними даними, забезпечує безперервний моніторинг і прогнозування. Наприклад, у разі просідання дорожнього полотна система може визначити час до утворення вибоїни, враховуючи трафік і погоду [81]. Менеджери отримують завчасні попередження й можуть планувати ремонт у найоптимальніший момент.

В Австралії зазначають, що цифрові двійники змінюють підхід до управління: від реактивного ремонту – до проактивного, з акцентом на прогнозне обслуговування [80]. Такий підхід подовжує термін служби дорожньої інфраструктури та підвищує безпеку.

Аналітичні системи допомагають управляти не лише технічними, а й організаційними ризиками – пов’язаними з термінами та бюджетами. Моделювання трикутника “час–вартість–якість” дозволяє оцінити, як зміна одного параметра вплине на інші. У разі затримок цифровий двійник може запропонувати сценарії: залучення додаткових бригад із розрахунком витрат або перерозподіл задач для уникнення простоїв.

Завдяки цифровим платформам стає можливим моделювання “what-if” (що, якщо) [80] – імітація варіантів розвитку подій з оцінкою наслідків. Це підвищує впевненість у прийнятті рішень у складних ситуаціях: керівники спираються на візуалізовані прогнози, а не на припущення.

Такий підхід значно підвищує впевненість менеджерів у прийнятті рішень у ситуаціях із високим рівнем невизначеності, адже вони можуть бачити

прогнозовані наслідки на інформаційній панелі, а не покладатися на інтуїцію чи припущення.

Цифрові інструменти підвищують ефективність ще на етапі підготовки. Геопросторовий аналіз допомагає оптимізувати маршрути техніки й постачання матеріалів, зменшуючи холості пробіги й витрати пального. ГІС враховує реальну мережу доріг і трафік, покращуючи логістику. BIM дозволяє точно розрахувати потребу в матеріалах, уникаючи дефіциту чи надлишків. Алгоритми ШІ створюють оптимальні графіки роботи бригад і техніки з урахуванням обмежень, скорочуючи тривалість проєкту й витрати.

Аналітичні модулі накопичують дані про реалізацію проєктів, формуючи базу знань для вдосконалення. Аналіз затримок, перевитрат чи матеріальних збоїв дозволяє виявляти закономірності й коригувати рішення. Наприклад, якщо певний тип асфальтобетону не витримує навантаження, його можна замінити у майбутніх проєктах. Так само оцінка впливу погоди на продуктивність допомагає точніше планувати ризики.

Таким чином, цифровий менеджмент не лише підтримує поточне управління, а й формує стратегічну аналітику для підвищення якості майбутніх проєктів

Узагальнюючи концептуальну модель цифрового управління, можна виділити замкнутий життєвий цикл, що охоплює всі ключові етапи – від збору даних до впровадження рішень і зворотного аналізу. Цей цикл забезпечує адаптивність, обґрунтованість та ефективність менеджменту дорожньої інфраструктури (Рисунок 2.4).

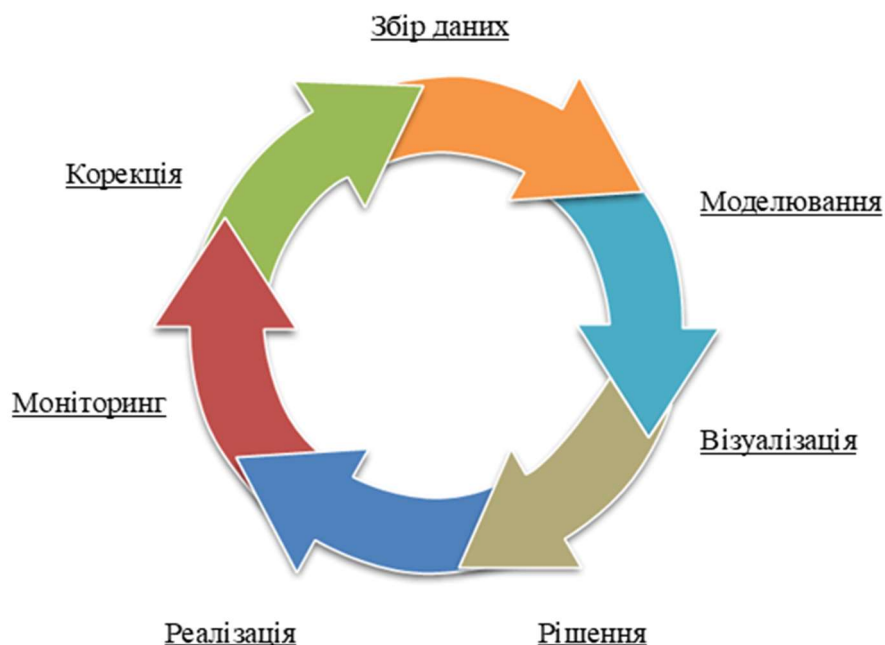


Рисунок 2.4 - Життєвий цикл цифрового управління дорожньо-інфраструктурними проєктами (Джерело: сформовано автором)

Міжнародний досвід упровадження цифрового менеджменту в транспортній інфраструктурі демонструє передові підходи. У Швеції з 2020 року діє Digital Twin Cities Centre (DTCC), що розробляє цифрові двійники для вдосконалення міського планування, будівництва й управління [85]. У другій фазі проєкт зосередився на сталому розвитку. Уряд інвестує в інтегровані 3D-моделі, які поєднують дані з різних сфер – транспорту, екології, будівництва. У районі Кіста в Стокгольмі планується створення цифрового двійника з інтеграцією IoT-даних для підтримки прийняття рішень.

У сфері транспорту прикладом є проєкт SmartFlow, реалізований Trafikverket спільно з Норвезькою дорожньою адміністрацією. Він довів, що дані, зібрані під час будівництва (BIM, сканування), можуть використовуватись на етапі експлуатації. Завдяки семантичній сумісності вдалося пов'язати BIM-елементи з реєстрами активів, створивши єдину базу даних. [86]. Trafikverket розвиває цей підхід, вимагаючи від підрядників надання даних у форматі IFC.

Ще одним прикладом із Швеції є впровадження платформи Twinfinity [87], на базі якого Trafikverket розробляє модельно-орієнтовану систему експлуатації, інтегруючи BIM з ГІС і даними про інфраструктуру. Це дозволяє переглядати 3D-

моделі доріг разом із географічним розташуванням і пов'язаними елементами, що покращує планування ремонтів та координацію робіт.

Інші глобальні приклади. У Європейському Союзі активно просувається концепція Local Digital Twins – мережі локальних цифрових двійників для міст і регіонів, які забезпечують сумісність між собою. Ця ініціатива підтримується Європейською комісією в рамках програми “Цифрове десятиліття 2030” [88]. Наприклад, у місті Аахен (Німеччина) створено цифровий двійник транспортної системи для оптимізації мобільності [82]. Подібні ініціативи реалізуються в Сінгапурі та США.

Світовий банк у 2023 році оприлюднив рекомендації щодо цифрових двійників у міській інфраструктурі, підкреслюючи їхню роль у підвищенні стійкості до кліматичних змін і катастроф [89]. Вони дають змогу моделювати впливи зовнішніх факторів і адаптувати інфраструктуру до викликів майбутнього.

Результати впровадження цифрового менеджменту в країнах, які стали піонерами в цій сфері, уже демонструють відчутні позитивні зміни:

- **Прискорення будівництва та зниження вартості** – китайський проект швидкісної траси показав, що використання BIM+GIS платформи дозволило скоротити час будівництва тунелів за рахунок кращої координації, а оптимізація маршрутів перевезення матеріалів зекономила витрати палива [90].

- **Покращена безпека** – у Швеції аналіз транспортної мережі на основі цифрового двійника допоміг виявити місця концентрації ДТП і розробити цільові заходи. Крім того, використання VR-моделювання будівельних процесів, як у випадку з VR-брифінгами з техніки безпеки на Юаньченській трасі, сприяє зменшенню травматизму на будівельних майданчиках [84]).

- **Прозорість і довіра** – публічні платформи, такі як DREAM в Україні, залучають громадськість до процесу контролю: кожен може відкрити інтерактивну карту й ознайомитися з кількістю проєктів відновлення у своїй громаді та їхнім поточним статусом. Це усуває інформаційні прогалини, сприяє протидії корупції та підвищує готовність міжнародних донорів фінансувати проєкти, адже вони мають доступ до прозорої системи моніторингу й оцінки.

Впровадження цифрового менеджменту інфраструктури веде до поліпшення управління інфраструктурою (Рисунок 2.5).

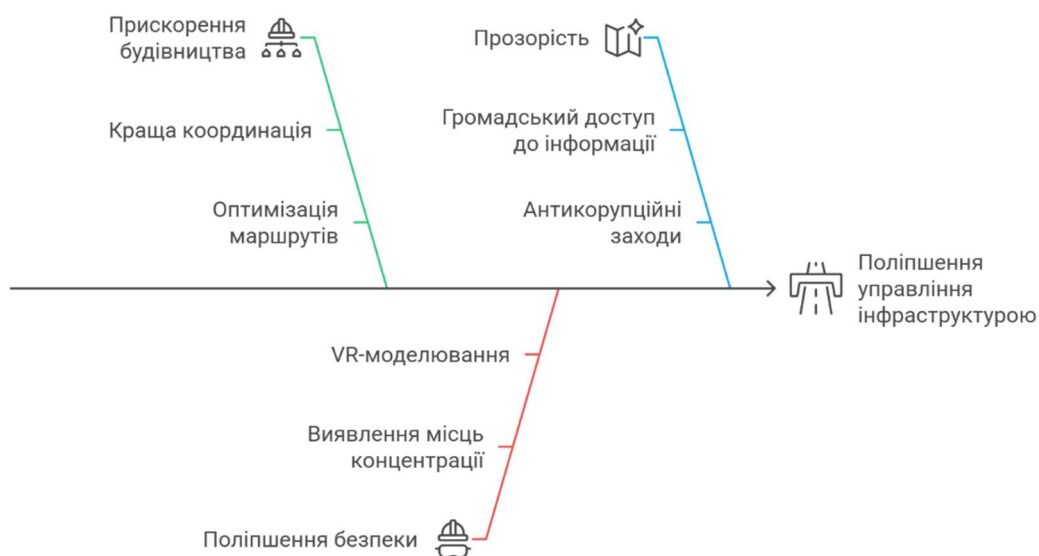


Рисунок 2.5 – Переваги цифрового менеджменту інфраструктури

Адаптація міжнародного досвіду цифрового менеджменту до українських реалій вимагає врахування особливих умов: масштабних руйнувань, обмежених ресурсів і потреби у швидкому відновленні в умовах війни. Хоча український контекст відрізняється високою невизначеністю, ключові напрями цифрової трансформації залишаються актуальними:

1. **Інтеграція даних і поступовий відхід від паперових процесів** уже просуваються в Україні: електронні системи, такі як Prozorro та єдина цифрова платформа відбудови, замінюють застарілі методи управління. Наступним етапом має стати підключення до цієї екосистеми ГІС даних і сенсорних пристроїв, що забезпечить автоматизований контроль стану дорожньої інфраструктури в реальному часі.

2. **Відкритість і залучення громадян** є важливим елементом цифрової трансформації. Платформи на зразок DREAM вже надають доступ до публічних даних, але їхня ефективність зросте з впровадженням інструментів зворотного зв'язку – зокрема, мобільних застосунків для подання скарг або оцінювання якості ремонтів. Такий підхід успішно використовується в багатьох країнах [91].

3. **Прогнозне планування ремонтів** стане ключовим завданням після відновлення основної дорожньої мережі, коли акцент зміститься на її ефективне утримання. Тут доречним є досвід цифрових двійників: створення моделі національної мережі доріг, що враховує інтенсивність руху, кліматичні зони й технічний стан об'єктів, дозволить проактивно планувати ремонтні роботи та запобігати повторному масовому руйнуванню. Наприклад, інтеграція системи моніторингу покриття (з використанням сенсорів чи динамічних ваг WIM) із ГІС дасть змогу виявляти ділянки з прискореною деградацією та спрямовувати фінансування на їх першочергове відновлення.

4. **Навчання кадрів і трансформація процесів** є невід'ємною частиною цифрового менеджменту, що вимагає нових компетенцій від працівників дорожньої галузі. Необхідність підготовки фахівців із аналізу даних, ГІС-технологій і координації BIM-проектів очевидна. Впровадження технологій має супроводжуватися відповідними програмами навчання. Паралельно слід оновити нормативну базу, щоб результати цифрового моделювання отримали офіційне визнання – наприклад, щоб електронний журнал робіт вважався повноцінним документом. Позитивні зрушення вже наявні: нормативи BIM для доріг перебувають у розробці, а європейський досвід, зокрема CIM (Civil Integrated Management), може прискорити цей процес.

Перспективи цифровізації дорожньої інфраструктури в Україні відкривають значні можливості. Завдяки адаптації міжнародного досвіду та власним розробкам, зокрема платформі DREAM, можливо створити сучасну систему цифрового управління транспортною мережею. Вона стане ключовим інструментом як для відбудови, так і для подальшого розвитку. Очікувані переваги включають прозоре використання коштів, підвищення якості будівництва, зменшення корупції та збільшення терміну служби доріг через ефективне обслуговування.

Концептуальна модель цифрового менеджменту дорожньо-інфраструктурних проєктів ґрунтується на об'єднанні геопросторових та інших даних у єдиному інформаційному середовищі, що охоплює всі етапи життєвого циклу

інфраструктури. Це дозволяє автоматизувати процеси – від планування ресурсів до моніторингу та прогнозування – і підвищити ефективність управління. Міжнародний досвід, зокрема Швеції, Німеччини та Китаю демонструє економію ресурсів, кращу координацію, підзвітність і довговічність об'єктів.

Впровадження таких моделей через платформи типу DREAM і нові інституції дає Україні шанс не лише відновити зруйновану дорожню мережу, а й закласти підґрунтя для сталого розвитку транспортної системи. Хоча це потребує інвестицій у технології та підготовку кадрів, очікувані результати можуть докорінно змінити підходи до управління. Отже, цифровий менеджмент із використанням ГІС є не просто сучасною тенденцією, а необхідною умовою для ефективного та прозорого розвитку інфраструктури в умовах сьогодення.

Метод управління дорожньо-інфраструктурними проєктами на основі інтегрованих цифрових моделей.

Зростання складності дорожньо-будівельних проєктів, багаторівневість взаємодії між їх учасниками та підвищена залежність управлінських рішень від точності, повноти й актуальності даних зумовлюють необхідність у впровадженні нових підходів до управління дорожньо-інфраструктурною діяльністю. У цьому контексті в дисертації запропоновано та удосконалено метод управління, що базується на використанні інтегрованої цифрової моделі, що є комплексною, багат шаровою інформаційна система, яка динамічно відображає дорожньо-інфраструктурні об'єкти (або всю мережу) і процеси, пов'язані з ними.

Удосконалення полягає у впровадженні проактивного, аналітично орієнтованого (data-driven) підходу, заснованого на створенні та використанні динамічного цифрового двійника інфраструктурного об'єкта. Цей цифровий двійник виступає єдиним джерелом достовірної, актуальної інформації для всіх учасників проєкту, забезпечуючи підтримку прийняття управлінських рішень на всіх етапах життєвого циклу – від планування до експлуатації та аналізу ефективності. При такому управлінському підході, менеджери приймають рішення, спираючись не на розрізнені паперові звіти, таблиці Excel чи окремі карти, а на

єдину, цілісну, динамічну цифрову копію інфраструктури, яка поєднує "де", "що", "як" і "коли".

На відміну від традиційних підходів, які зосереджуються переважно на статичних моделях або фрагментарному зборі даних, запропонований метод реалізує інтегровану архітектуру, що включає зворотний зв'язок з фізичним об'єктом на основі потокових даних з IoT-сенсорів, ГІС, ВІМ та мобільних джерел. Це дозволяє не лише відображати поточний стан інфраструктури, а й прогнозувати зміни, адаптуючи управління до реального контексту. Теоретичне підґрунтя методу сформоване на базі системного аналізу, теорії управління проєктами та концепцій цифрової трансформації. Метод ґрунтується на чотирьох принципах, які розглянуто у підрозділі 1.3:

- Принцип інтеграції забезпечує консолідацію різнорідних даних (геопросторових, інженерних, фінансових, моніторингових) у межах єдиної цифрової моделі. Це дозволяє сформуванню цілісного уявлення про стан проєкту та запобігти фрагментарності у прийнятті рішень.

- Принцип доступності гарантує своєчасний доступ до релевантної інформації для кожного учасника проєкту відповідно до його повноважень, що усуває комунікаційні бар'єри між адміністративним і виробничим рівнями.

- Принцип автоматизації орієнтований на мінімізацію ручної обробки даних за рахунок застосування технологій IoT, дистанційного зондування Землі (ДЗЗ), мобільного збору даних і аналітичних алгоритмів. Це підвищує точність операцій і зменшує залежність від людського фактору.

- Принцип зворотного зв'язку формує механізм постійного оновлення цифрової моделі на основі даних із фізичного об'єкта, що забезпечує адаптивність системи управління до змін у зовнішньому середовищі.

Метод має дворівневу архітектуру, що включає:

- Інформаційний компонент, який охоплює джерела даних: геоінформаційні бази (ГІС), інженерні ВІМ-моделі, дані IoT-сенсорів, результати дистанційного зондування, краудсорсингові дані користувачів інфраструктури та нормативно-технічну документацію;

- Технологічний компонент, представлений цифровою платформою, що поєднує базу даних проєкту, механізми візуалізації та прогнозування, інструменти керування цифровим двійником і модулі для обробки аналітичної інформації.

Реалізація методу охоплює чотири етапи, які відповідають фазам життєвого циклу інфраструктурного об'єкта:

- Етап ініціації та планування – передбачає формування початкової, статичної моделі інфраструктурного об'єкта шляхом об'єднання вихідних інженерно-технічних та геопросторових даних. Модель використовується для стратегічного планування, порівняльного аналізу проєктних рішень і визначення оптимальної траси.

- Етап реалізації – полягає в оперативному наповненні моделі даними з будівельного майданчика (GPS-трекери, звіти мобільних інспекторських систем, ортофотоплани з БПЛА). Модель трансформується в інструмент поточного моніторингу та оперативного управління виконанням робіт.

- Етап експлуатації – передбачає функціонування цифрового двійника як джерела інформації про стан об'єкта. Він інтегрується з сенсорними системами, що дозволяє здійснювати моніторинг в реальному часі, планувати технічне обслуговування і приймати рішення щодо попереджувальних заходів.

- Етап аналізу та вдосконалення – включає збирання історичних даних, формування бази знань, виявлення закономірностей у функціонуванні проєктів і використання цих знань для вдосконалення управлінських рішень у майбутньому.

Запропонований метод дозволяє реалізувати системний підхід до управління, який базується на точних просторових і часових даних, автоматизованих процесах обробки інформації, відкритій комунікації та аналітичній підтримці рішень. Його застосування сприяє зниженню управлінських ризиків, підвищенню ефективності використання ресурсів, прозорості та результативності реалізації інфраструктурних проєктів.

2.2 Етапи цифровізації та роль геопросторових даних у підтримці управлінських рішень

Схема цифровізації передбачає послідовність етапів: підготовка, збір даних, створення платформи, автоматизація. У контексті цифрової трансформації управління проєктами дорожньої інфраструктури виокремлюють чотири основні етапи, кожен з яких спирається на ГІС, як ключовий інструмент для підвищення ефективності прийняття рішень та раціонального використання ресурсів. У подальшому викладі детально розглянуто ці етапи – від початкової підготовки до впровадження моніторингу в реальному часі – із застосуванням практичних прикладів, що відображають досвід України та міжнародну практику, з акцентом на їхню прикладну значущість у рамках геопросторових технологій.

2.2.1. Підготовка до цифрової трансформації

На етапі підготовки організація здійснює аналіз сучасного стану цифрових інструментів і визначає цільові орієнтири трансформації, зокрема скорочення витрат і зростання ефективності процесів. Ключовим завданням є проведення аудиту наявних даних і систем: оцінка того, які геопросторові дані вже накопичено, в якому стані перебуває ІТ-інфраструктура, а також чи достатньо кваліфікованих кадрів із цифровими компетенціями. На основі отриманих результатів розробляється стратегія впровадження цифровізації. Наприклад, в Україні обмеженість фінансування для утримання дорожньої мережі стала одним із стимулів до започаткування програми інформатизації дорожнього господарства [19]. У межах цього процесу було визначено першочергові заходи: розроблення нормативних стандартів для дорожніх даних (вимоги до форматів, точності, періодичності оновлення) та формування єдиного аналітичного ресурсу, доступного для всіх агентств, що займаються утриманням дорожньої інфраструктури [19]. Чітко сформульовані цілі – такі як оптимізація витрат на ремонтні роботи, підвищення рівня безпеки чи прискорення обслуговування інфраструктури – забезпечують цілеспрямованість цифрової трансформації та орієнтацію на досягнення конкретних результатів у рамках геопросторових даних.

На цьому етапі формуються організаційні засади: розробляється бюджет, планується підготовка персоналу та призначаються відповідальні особи. Ключовим кроком є затвердження “дорожньої карти” цифрової трансформації. Вона має чітко визначати, які функції виконуватиме ПІС на всіх етапах життєвого циклу проєкту (наприклад, моніторинг стану, управління активами) та які ключові показники ефективності (KPI) будуть застосовані для оцінки результатів.

Таким чином, етап підготовки завершується формуванням затвердженого плану цифровізації, у якому визначено об’єкти та методи цифрової трансформації, обсяги необхідних інвестицій і очікувані результати – наприклад, скорочення часу простою доріг чи економія ресурсів на проведенні інспекцій.

2.2.2. Збір та інтеграція геопросторових даних

Наступний етап передбачає масштабний збір даних про дорожню інфраструктуру та їх консолідацію в єдину систему. Геопросторові дані надходять із різноманітних джерел, зокрема з наявних карт і дорожніх кадастрів, результатів інвентаризації, даних обстежень (таких як лазерне сканування чи георадар), супутникових знімків, а також інформації, отриманої від дронів і датчиків IoT. Основним завданням на цьому етапі є трансформація цих розрізнених даних у цілісну геоінформаційну базу, яка забезпечить оперативне управління дорожніми об’єктами.

Практика цифровізації базується на передових технологіях збору даних. Наприклад, дорожнє агентство Rijkswaterstaat у Нідерландах щорічно сканує 8,6 тис. км доріг автоматизованими системами (ARAN), що працюють на швидкості руху. Ці системи збирають дані про рівність, тріщини, колійність та товщину шарів покриття (за допомогою георадара), синхронізуючи їх з високоточною GPS-прив’язкою. Це дозволяє формувати високоточні цифрові моделі доріг для динамічного відстеження деградації покриття та визначення пріоритетності ремонтів, об’єднуючи всі дані в єдиному геопросторовому сховищі [92].

Для України цей етап був ускладнений історичною фрагментацією даних. Впровадження систем управління дорожнім покриттям (PMIS) гальмувалося через недостатню документованість доріг, брак ПЗ для інтеграції обстежень та сучасного

обладнання. Тому було запропоновано провести масштабні цифрові зйомки магістралей [93]. У рамках пілотного проєкту Укравтодору було зібрано геопросторові дані (координати осей, параметри покриття), що дозволило створити першу цифрову модель дорожньої мережі країни [19]. Ця модель стала фундаментом для накладання додаткових інформаційних шарів (даних про трафік, стан інфраструктури, ДТП).

Інтеграція даних – це не просто накопичення, а встановлення логічних зв'язків між інформаційними потоками. Для цього необхідно, щоб усі шари геопросторових даних функціонували у єдиному форматі та взаємодіяли між собою. Ключову роль відіграють майстер-дані – унікальні ідентифікатори доріг, ділянок і об'єктів, що об'єднують тематичну інформацію (ремонти, трафік, аварії). У рамках згадуваної ГІС-дорожньої системи створено структуру взаємодії, яка передбачає використання спільного довідника доріг та координат усіма службами [19]. Це усуває дублювання і розбіжності між джерелами. Наприклад, інтеграція системи управління покриттям (PMS) із ГІС дозволяє пов'язати вимірювання з географічним положенням і централізовано їх зберігати. Найефективніші системи RMIS сьогодні базуються саме на платформі ГІС [93], що забезпечує геокодування, аналіз, обробку растрових даних і автоматичне формування схем мережі.

Дані, отримані з різних сфер – проєктування й будівництва, утримання, операційного управління та адміністративних процесів, – приводяться до єдиних вимог і структуруються для централізованого використання [94] (Рисунок 2.6)

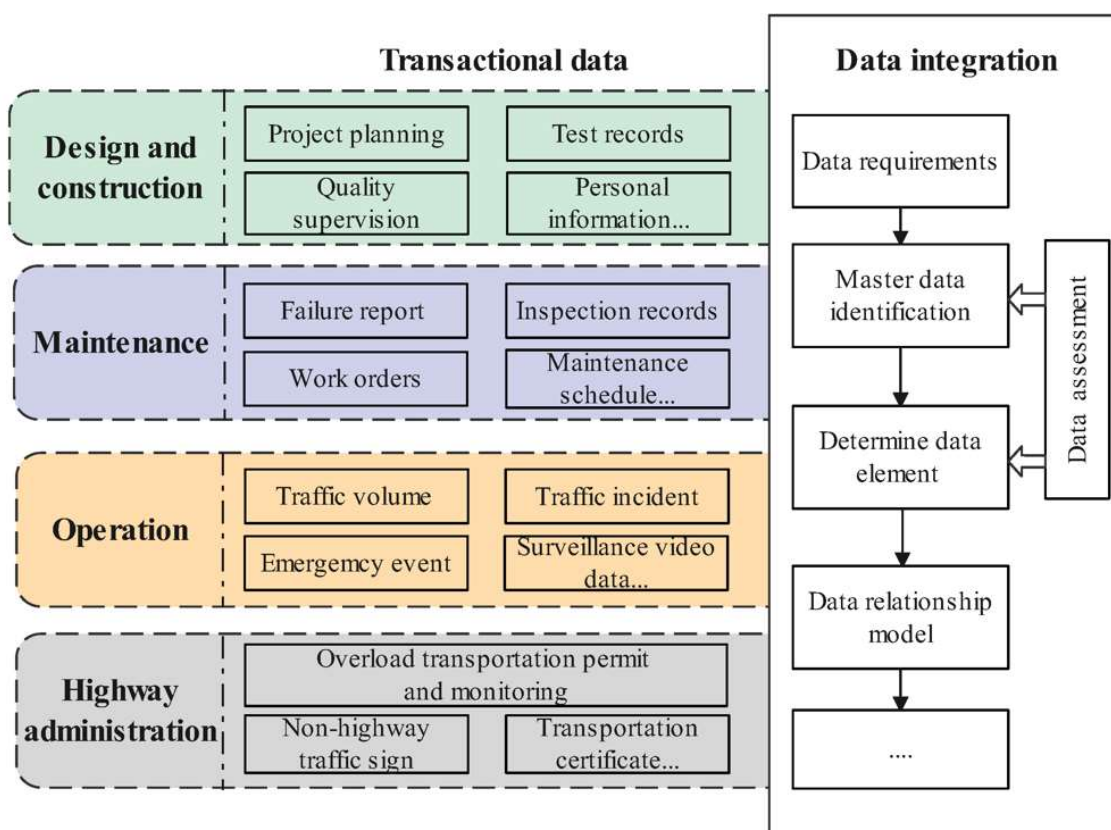


Рисунок 2.6 - Приклад інтеграції даних про дорожні активи в єдину систему
(джерело: [94])

На цьому етапі формується єдина геоінформаційна платформа для об'єднання даних про дорожню інфраструктуру – у вигляді корпоративної ГІС або хмарного рішення. Її ефективність залежить від регулярного оновлення, яке може здійснюватися циклічно (через обстеження) або потоково (за допомогою сенсорів). У деяких країнах такі сенсори, вмонтовані в дорожнє полотно або транспорт, передають дані про вібрації, температуру й навантаження, що інтегруються в систему.

Результатом є актуальна цифрова копія інфраструктури, яка стає базою для створення аналітичних інструментів і дашбордів на основі достовірних даних.

2.2.3. Створення цифрових платформ управління та аналітичних дашбордів

На третьому етапі здійснюється трансформація від простої карти з даними до комплексної платформи управління дорожньою інфраструктурою. Геопросторові дані, зібрані раніше, інтегруються з аналітичними інструментами, що дає змогу керівникам відстежувати стан доріг у реальному часі, моделювати можливі сценарії

розвитку подій і приймати рішення, обґрунтовані достовірною інформацією. У підсумку формуються аналітичні дашборди – інтерактивні панелі, які об’єднують картографічні зображення, графіки та ключові показники ефективності (KPI), забезпечуючи зручний і наочний доступ до даних.

Цифрова платформа управління дорожньою інфраструктурою виконує ключові функції: інвентаризацію активів, моніторинг доріг, планування ремонтів, облік коштів і формування звітності. Її основа – ГІС [93], яка забезпечує просторову прив’язку всіх даних. Наприклад, платформи на базі ArcGIS або QGIS дозволяють інтегрувати інфраструктурні бази з модулями управління проєктами та фінансами, даючи змогу відстежувати витрати безпосередньо на карті. Практика показує: такі системи допомагають ефективніше розподіляти ресурси й визначати пріоритети фінансування [95].

ГІС-платформа виконує не лише моніторингові, а й аналітично-прогностичні функції. У межах українського пілотного проєкту на основі геоданих (трафік, стан покриття, клімат) були розроблені алгоритми, що дозволили прогнозувати деградацію доріг і формувати середньострокові плани ремонтів [19]. Замість реагування на вже наявні пошкодження, система підтримує проактивне планування та превентивні заходи – що економить ресурси й підвищує ефективність.

Окремо платформа аналізує безпеку дорожнього руху, виявляючи “чорні точки” ДТП. У проєкті було виконано картографування небезпечних ділянок, оцінку їх ризику, аналіз причин аварій і пропозиції щодо запобіжних дій [19]. Ці дані виводяться на дашборд у вигляді тематичних шарів, графіків і показників, наприклад, щодо перевищення швидкості чи стану покриття.

Такий геопросторовий аналіз забезпечує обґрунтовану основу для прийняття рішень, зокрема щодо встановлення дорожніх знаків, введення обмежень швидкості або реконструкції перехресть у конкретних місцях. Зокрема у дослідженні зазначається, що у 2019 р. у межах пілотного проєкту впровадження ГІС у дорожню систему в результатах було отримано обґрунтування потреби фінансування ремонтів по конкретних ділянках [19].

Завдяки цьому підвищується ефективність заходів із забезпечення безпеки на дорогах.

Ще одним важливим компонентом платформи є моніторинг виконання робіт. Цифрова система дає змогу відстежувати хід реалізації запланованих ремонтних або будівельних заходів. Інженери, працюючи на об'єктах, можуть вносити дані через мобільні додатки, тоді як менеджери в офісі бачать оновлену інформацію на карті в реальному часі. Наприклад, у місті Амстердам було впроваджено хмарну ГІС-систему для управління дрібними дорожніми ремонтами: працівники за допомогою планшетів позначали завершення ямкового ремонту, а керівник на дашборді відстежував прогрес у реальному часі за кольоровими маркерами (не оглянуто, оглянуто, відремонтовано) [96]. Це значно прискорило обмін інформацією та усунуло плутанину, пов'язану з використанням Excel-файлів і паперових карт [96]. Приклад інформаційного дашборду наведено на рисунку 2.7.

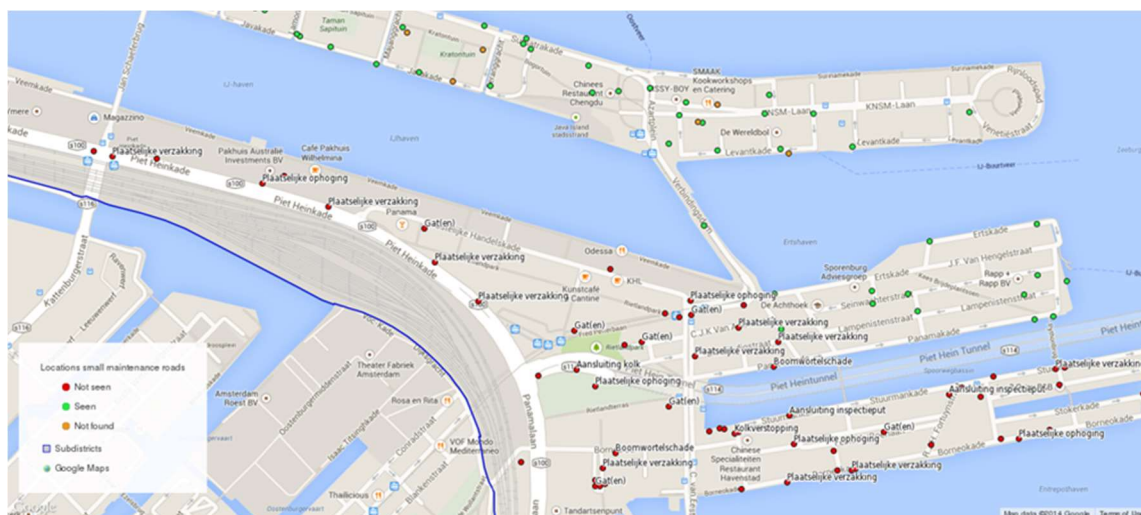


Рисунок 2.7 – Дашборд стану дрібних ремонтів у місті Амстердам: зеленим позначено усунені дефекти, червоним – нові (ще не опрацьовані), оранжевим – ті, що не підтвердилися на місці (джерело [96])

Така інтерактивна карта дозволяє менеджерам оперативно контролювати хід робіт та реагувати на проблемні локації [96].

2.2.4. Автоматизація моніторингу в реальному часі

Завершальний етап цифровізації передбачає впровадження систем автоматизованого моніторингу та управління в реальному часі. Якщо на попередніх

етапах дані збиралися періодично – через інспекції чи проекти – і слугували для планування, то тепер інфраструктура самостійно генерує інформацію безперервно і частково автоматично реагує на події. Геопросторові дані відіграють ключову роль, забезпечуючи актуальну картину стану доріг у кожен момент часу.

Одним із визначальних елементів системи є IoT-сенсори та пристрої, інтегровані в дорожню інфраструктуру. Сучасні магістралі оснащуються датчиками, які відстежують широкий спектр показників: від коливань конструкцій мостів і ваги транспортних засобів (за допомогою систем Weigh-in-Motion) до рівня вологості покриття та температури повітря. У Нідерландах, наприклад, на об'єктах, що перебувають під управлінням Rijkswaterstaat, працюють тисячі сенсорів, які безперервно контролюють відхилення від норми в функціонуванні мостів, шлюзів, тунелів та інших споруд [97]. Усі ці дані надходять до єдиної аналітичної платформи. Як зауважив керівник відділу IT-платформ RWS, *“тепер прилади й дашборди дедалі більше орієнтуються на прогнозування: якщо раніше ми лише фіксували, що сталося, то зараз намагаємося передбачити майбутнє”* [97].

Інформація від сенсорів обробляється автоматично в реальному часі, що дозволяє системі своєчасно сигналізувати про потенційні проблеми ще до їхнього загострення. Саме так реалізується концепція проактивного обслуговування (predictive maintenance), яка базується на геопросторових даних і сприяє запобіганню серйозним інфраструктурним збоям.

Наприклад, якщо датчики в конструкції мосту фіксують просідання опори, ГІС-платформа автоматично позначає об'єкт як “тривожний” і сповіщає інженерів. У Японії подібні системи, які поєднують моделювання й ГІС, попереджають про зсуви та лавини: інтеграція даних про рельєф, опади й вологість ґрунту дозволяє оперативно визначати небезпечні зони на карті [98 с. 11]. Ці системи також надсилають водіям повідомлення про небезпеку – наприклад, під час хуртовин або ожеледиці. Такий підхід у реальному часі забезпечує не лише моніторинг, а й негайне реагування

Одним із найважливіших завдань дорожнього господарства є моніторинг та контроль за зносом покриття в реальному часі. На сьогодні масового використання

сенсорів, які б щохвилини відстежували стан асфальту на кожному кілометрі, у світі ще не впроваджено. Замість цього застосовують підхід, що поєднує регулярні вимірювання з прогнозними моделями. Проте в окремих містах уже тестують нові рішення: датчики, вбудовані безпосередньо в дорожнє полотно, або збір даних через акселерометри смартфонів чи підвіску звичайних автомобілів за принципом краудсорсингу. Ці відомості, прив'язані до географічних координат, передаються до диспетчерських центрів для обробки.

В Україні впроваджуються системи моніторингу в реальному часі, зокрема мережа WIM-комплексів (Weigh-in-Motion), які зважують вантажівки на ходу й оперативно передають дані про перевантаження для накладення штрафів [99]. Кожен пункт вимірювання асоційований із конкретною ділянкою дороги, що дає змогу відстежувати спроби об'їзду рамок за допомогою аналізу даних із сусідніх локацій. Також Укравтодор у співпраці з міжнародними консультантами розробляє вимоги до систем автоматичного контролю швидкості й електронного стягнення плати за проїзд [19]. Такі рішення підвищують безпеку, покращують фінансову дисципліну та формують геопросторову аналітику щодо проблемних ділянок.

Ще один важливий напрям – оптимізація маршрутів і керування трафіком на основі даних у реальному часі. Цифрова інфраструктура все активніше інтегрується з транспортними системами: інформація про затори, дорожні роботи та погодні умови надходить до центрів, де ГІС-алгоритми формують оптимальні маршрути або перенаправляють потоки [100]. Дані з сенсорів, камер і GPS-пристроїв показують завантаженість доріг, допомагаючи виявити “вузькі місця” – зони постійних заторів або аварійно небезпечні перехрестя. ГІС також аналізує історичні шаблони руху, щоб моделювати майбутнє навантаження, зокрема при зростанні населення чи перекритті певних вулиць. В Австрії впроваджуються цифрові платформи для керування всіма видами транспорту: вони збирають дані та в режимі онлайн можуть, наприклад, змінювати режими світлофорів або передавати навігаційним сервісам інформацію про об'їзди у випадку ДТП [101 ст. 92].

Геопросторові дані забезпечують точну прив'язку автоматизованих рішень до місцевості: система визначає, де саме сталася подія та які прилеглі дороги можуть

зазнати впливу. В Україні автоматизоване управління транспортними потоками поки що впроваджується фрагментарно – наприклад, у містах діють системи інтелектуальних світлофорів. Водночас дорожні служби вже активно використовують інформацію від сервісів, таких як Google Maps чи Waze. Наприклад, при плануванні перекриттів аналізується, як це вплине на маршрути в навігаційних додатках. Перспектива розвитку – у комплексній інтеграції: події, зафіксовані в ГІС, автоматично відображатимуться в навігаторах користувачів.

Підсумовуючи, автоматизація перетворює систему управління дорогами на динамічну й реактивну: об'єкти передають дані про свій стан, а система – включно з алгоритмами ШІ – оперативно реагує. У Нідерландах, наприклад, платформа SAS Viya, яку використовує Rijkswaterstaat, об'єднує потокові дані та пришвидшує ухвалення рішень, зокрема завдяки гнучкому формуванню дашбордів і моніторингу якості інформації в реальному часі [97]. За словами представників організації, дані стали базовим інструментом щоденної роботи – від аналізу транспортних потоків до контролю стану мостів [97].

Цифровізація на цьому етапі фактично завершує цикл створення *Digital Twin* дорожньої інфраструктури: є постійно оновлювана модель, яка відображає реальність і дозволяє прогнозувати майбутнє. Наприклад, інтеграція реальних даних про навантаження на мостах з їх цифровими моделями дає можливість прогнозувати залишковий ресурс конструкцій і планувати ремонти до появи тріщин [19].

Зв'язок міжнародного досвіду з українським контекстом. Провідні країни (Нідерланди, Японія, США) демонструють, що інвестиції в цифрові платформи і датчики окупаються зниженням аварійності, оптимізацією витрат та покращенням якості доріг. Україна, попри виклики (війна, обмежені ресурси), робить важливі кроки в цьому напрямку – створено геопортал Укравтодору, впроваджуються вагові комплекси, запускається екосистема DREAM. Наступним кроком має стати об'єднання цих ініціатив у єдину **геоінформаційну платформу дорожньої інфраструктури**, яка охопить всі етапи: від планування та проєктування (де вже застосовуються BIM і ГІС), через будівництво (БПЛА та сенсори контролю якості)

до експлуатації (ГІС + IoT моніторинг). В результаті цифровізація дорожніх проектів дозволить Україні досягти рівня “розумної” дорожньої мережі, де рішення приймаються на основі даних, а кошти інвестовані в інфраструктуру використовуються максимально ефективно.

Цифрова трансформація дорожнього господарства проходить поетапно – від підготовки до роботи в реальному часі, - і хоча ця послідовність є універсальною, її зміст залежить від контексту. У висновку, геопросторові дані слугують основою, що об’єднує всі етапи: вони дозволяють визначити, де саме й що відбувається, пояснити причини та підтримати рішення щодо подальших дій. Впровадження ГІС на кожному етапі наближає нас до створення дорожньої інфраструктури нового покоління безпечнішої, міцнішої та орієнтованої на майбутні потреби.

2.3 Методи збору, аналізу та візуалізації даних для оптимізації управління

2.3.1 Методи збору даних.

У межах цифрового управління дорожньою інфраструктурою збір даних є першою і критично важливою ланкою. Саме якість і повнота вхідної інформації визначають ефективність подальшої аналітики й управлінських рішень. Залежно від джерела, обсягу і технічних характеристик, дані можуть збиратися автоматизовано – через сенсори, супутники чи транспортні трекери – або надходити від користувачів за допомогою мобільних сервісів. Далі розглядаються основні сучасні методи збору даних, які інтегруються в цифрові платформи для моніторингу та управління дорожньою мережею.

Мобільні додатки та краудсорсинг. Сучасні дорожні агенції дедалі активніше використовують мобільні технології для залучення громадськості до збору інформації про стан доріг. Спеціалізовані застосунки, такі як FixMyStreet (Велика Британія), Street Bump (Бостон) або CitySourced, дозволяють користувачам повідомляти про пошкодження покриття, затори чи інші проблеми, додаючи фото та координати зі смартфонів [91]. Дані автоматично геоприв’язуються та надсилаються до систем управління інфраструктурою, що значно прискорює реагування служб.

Такі інструменти компенсують обмеження офіційних інспекцій і створюють нові потоки даних для аналізу. У межах ініціативи Waze for Cities муніципалітети отримують краудсорсингову інформацію про затори, аварії та перешкоди, яка доповнює офіційну статистику та інтегрується в ГІС-платформи [102 с. 22]. Подібні рішення реалізовано в Центральній Азії та Кенії за підтримки Світового банку: мобільні сервіси дозволили збирати дані про ДТП, які раніше не реєструвалися [103 , 102]. У результаті формується повноцінна інформаційна база для оперативного моніторингу, прогнозування та ухвалення управлінських рішень.

Супутниковий моніторинг і аерофотознімання. Дистанційне зондування Землі забезпечує широкомасштабне спостереження за станом дорожньої інфраструктури, особливо в умовах обмеженого доступу або небезпеки. Оптичні супутникові знімки високої роздільності дозволяють виявляти новобудови, пошкодження покриття, мости та інші елементи. Зокрема, після початку повномасштабної війни в Україні у 2022 році активно застосовували радарні супутники Sentinel-1: SAR-дані допомагали фіксувати значні зміни на поверхні, що свідчили про руйнування доріг або будівель [103]. Такі знімки інтегруються в ГІС як аналітичні шари – наприклад, для порівняння стану об'єктів до і після події, планування розмінування або відновлення інфраструктури. Подібний підхід застосовують і незалежні ініціативи, як-от Bellingcat, які картографують пошкодження цивільних об'єктів на інтерактивних платформах [105].

Доповненням до супутникових знімків виступає аерофотозйомка з безпілотних літальних апаратів (БПЛА). Поєднання супутникових і дронівих даних дозволяє забезпечити як огляд загальної ситуації, так і точковий моніторинг стану дорожньої мережі та будівельних робіт. Дані інтегруються в ГІС-платформи, створюючи багаторівневу систему аналізу. Наприклад, відкриті супутникові сервіси (OneAtlas, ESA) дозволяють оперативно відстежувати зміни, а БПЛА – формувати високоточні тривимірні моделі об'єктів, що дає змогу виявляти навіть незначні відхилення від проєктної документації.

Датчики та IoT. Вбудовані в дорожню інфраструктуру сенсори забезпечують автоматизований збір даних про транспортний рух, стан покриття та навколишнє

середовище. Наприклад, індуктивні петлі під асфальтом фіксують інтенсивність руху, метеодатчики виявляють вологість і обледеніння, а відеокамери з алгоритмами машинного зору автоматично розпізнають ДТП і перешкоди [106]. Окремі датчики фіксують знос покриття або навантаження на мости, що дає змогу вчасно реагувати на критичні зміни.

Усі пристрої працюють у системі IoT, передаючи дані через бездротові мережі (зокрема 5G) до централізованих платформ. Додатково використовуються телематичні дані з підключених авто – швидкість, гальмування, пробуксовки – що допомагає виявляти небезпечні ділянки й формувати “теплові карти” ризиків [102 ст. 18]. Отримана інформація автоматично інтегрується в цифрові інфраструктурні моделі, формуючи актуальну картину транспортної ситуації для подальшого аналізу та ухвалення управлінських рішень.

Автоматизація та новітні підходи. Окрім стаціонарних датчиків, для збору даних все ширше застосовуються рухомі платформи та ШІ-технології. Наприклад, дорожні інспектори оснащуються мобільними GIS-додатками на планшетах/смартфонах, щоб в полі одразу фіксувати дефекти (фото + геолокація) і завантажувати їх до бази. Такі дані можна миттєво відобразити на карті і призначити завдання ремонтним бригадам. Перспективним є і використання **відеозйомки**: панорамні камери (на автомобілях Google Street View, Mapillary тощо) дають можливість пізніше автоматично розпізнати дорожню розмітку, знаки, пішохідні переходи та стан покриття за допомогою комп’ютерного зору [102 ст. 29]. Отримані знімки із прив’язкою до координат стають джерелом для GIS-аналізу – так, у одному з проєктів за знімками Mapillary успішно верифікували наявність пішохідних переходів, зазначених на OpenStreetMap [102 ст. 18]. Таким чином, **цифровізація збору інформації** про дороги йде за декількома напрямками: (a) залучення громадян (через мобільні застосунки) та пасивний краудсорсинг (навігаторні сервіси); (b) дистанційне зондування (супутники, дрони); (c) датчики IoT та підключені авто; (d) машинний зір та штучний інтелект для обробки зображень/відео. Комбінація цих методів дає всеосяжні, оперативні дані для подальшого аналізу стану дорожньої інфраструктури.

2.3.2 Методи аналізу.

Після збирання даних ключовим кроком є їхній аналітичний опрацювання – саме тут інформація трансформується на рішення. Методи аналізу, які застосовуються у сфері дорожнього управління, охоплюють як класичні ГІС-інструменти, так і новітні підходи з використанням великих даних та машинного навчання. Вони дозволяють виявляти закономірності зносу дорожнього покриття, моделювати майбутнє навантаження, оцінювати безпеку руху та визначати пріоритети втручання. Залежно від завдань, аналітика може бути спрямована на прогнозування технічного стану доріг, оптимізацію трафіку чи аналіз аварійності. У комплексі ці підходи забезпечують перехід від інтуїтивного до обґрунтованого управління дорожньою інфраструктурою

Просторовий аналіз і прогнозування стану доріг. Зібрані геопросторові дані потребують обробки, щоб стати основою для управлінських рішень. ГІС-аналітика дозволяє поєднувати шари інформації – інтенсивність руху, стан покриття, кліматичні умови, дату останнього ремонту – для виявлення закономірностей зносу. Це дає змогу прогнозувати, які ділянки невдовзі потребуватимуть втручання. Наприклад, дослідники застосували просторову Big Data-аналітику до історичних записів про ремонти, щоб визначити пріоритетність оновлення сільських шосе [107]. Аналіз включав місця розташування, дати й інтенсивність руху, на основі чого був складений рейтинг критичності ділянок.

Ще один напрям – зниження аварійності через аналіз середовища. Ініціатива Vision Zero, поширена в містах Європи та США, ставить за мету нульову смертність на дорогах, і ГІС відіграє тут ключову роль [108]. Прогностичні моделі поєднують дані про дорожню мережу, погоду, аварії та стиль водіння, щоб оцінити ймовірність ДТП у конкретних умовах. Наприклад, система Hopper від Open Data Nation, інтегрована з ArcGIS, за допомогою машинного навчання передбачає місця ймовірних аварій і передає ці дані водіям та службам [108]. Так, було виявлено, що певні перехрестя мають підвищений ризик аварій у дощову погоду – це орієнтир для влади щодо покращення інфраструктури.

Big Data для оцінки транспортних потоків і пріоритизації ремонтів.

Завдяки цифровим даним з GPS, телеметрії та стільникових мереж аналітики отримують масштабну інформацію про реальне використання доріг. Це дозволяє виявляти перевантажені маршрути, затори та ключові ділянки з економічною важливістю. У США та ЄС дорожні служби співпрацюють із приватними компаніями (TomTom, Here, INRIX), отримуючи агреговані дані про швидкість і затримки руху 24/7. Такі дані дають змогу оцінювати ефективність проєктів – наприклад, покращення після ремонту траси фіксується за скороченням простоїв.

Аналіз великих даних також оптимізує витрати на ремонт. Один із підходів – поєднання відкритих картографічних ресурсів з GPS-даними для виявлення «вузьких місць». Наприклад, Світовий банк застосував цей метод у Шрі-Ланці, об'єднавши OpenStreetMap із GPS-швидкостями Mapbox для виявлення сегментів, де фактична швидкість суттєво нижча за нормативну [109]. Такі ділянки вказують на потенційні проблеми: погане покриття, недоліки організації руху тощо. Це дає змогу формувати рейтинг пріоритетності ремонту: першочергово оновлюються дороги з високим трафіком і низькою якістю, адже саме вони завдають найбільших втрат економіці. Подібну методику використовують і в Кореї – сервіс автоматично визначає критичні для втручання ділянки на основі аналізу попередніх робіт і транспортного навантаження [107].

Аналіз аварійності для ухвалення рішень. Статистика ДТП традиційно слугувала індикатором проблемних зон, однак завдяки ГІС вона трансформується у візуальний аналітичний інструмент. Просторовий аналіз включає побудову теплових карт, кластеризацію місць аварій, розрахунок індексів небезпеки для вулично-дорожньої мережі та виявлення так званих «чорних точок». Наприклад, у Боготі (Колумбія) фахівці застосували hotspot-аналіз до краудсорсингових даних із Waze і створили карту осередків аварійності [110]. На ній червоним кольором позначено зони з високою концентрацією серйозних ДТП, а синім – ділянки з аномально низьким рівнем аварійності (cold spots) зі статистичною достовірністю 95–99% (Рисунок 2.8).

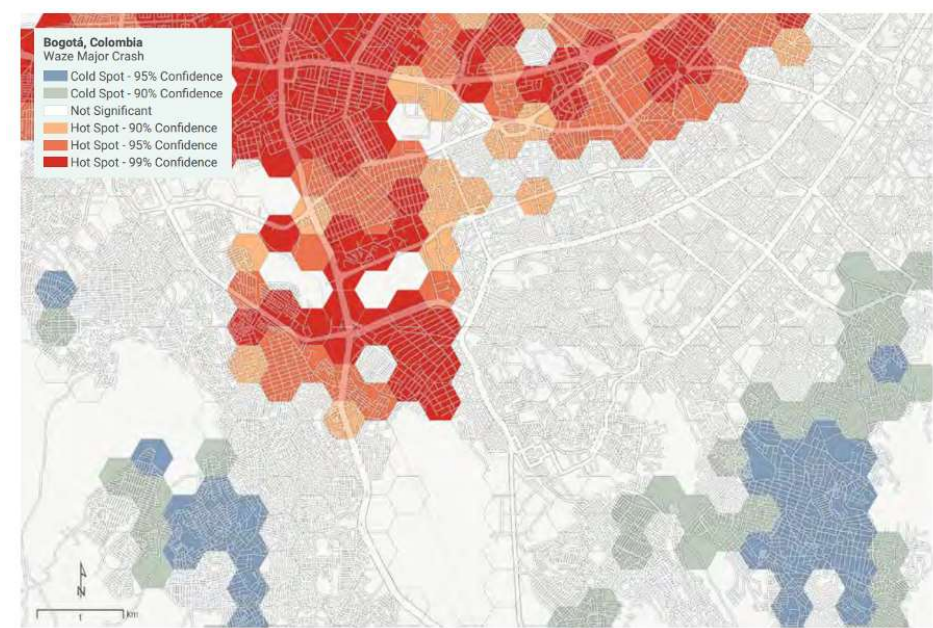


Рисунок 2.8 – Фрагмент карти осередків аварійності (джерело [102 ст. 19]).

Аналіз показав, що найбільші скупчення ДТП зосереджені вздовж кількох магістралей у центрі та на півночі міста. Ці дані стали підставою для коригування режимів світлофорів та посилення контролю швидкості на критичних ділянках. Таким чином, аналіз аварійності у ГІС дає змогу перейти від реактивного підходу до проактивного: замість реагування на факт ДТП, служби можуть прогнозувати зони ризику й вживати заходів на випередження – наприклад, встановлення освітлення, відбійників чи острівців безпеки [108].

Досвід дослідження [111], проведеного в Києві, демонструє, що визначення місць концентрації ДТП – це лише початковий етап. Виділені зони потребують додаткового аналізу, який враховує специфіку кожного інциденту. Журнали ДТП дозволяють ідентифікувати неточності в геокодуванні (відсутність координат, помилки в описі), а також диференціювати причини – від інфраструктурних до погодних і поведінкових. Через це автоматизовані висновки мають обмеження: одні й ті самі ділянки можуть містити події з різними факторами. Тому просторовий аналіз доцільно розглядати як інструмент первинного виявлення критичних зон, що вимагають подальшого контекстного дослідження перед ухваленням управлінських рішень.

Інтегрована аналітика для управлінських рішень. У дорожньому господарстві методи аналізу даних рідко застосовуються окремо – натомість вони об'єднуються в комплексні інструменти для підтримки управлінських рішень. Наприклад, сучасна платформа управління дорожніми активами може включати кілька модулів:

- прогнозування зносу покриття (на основі моделей старіння та фактичного навантаження),
- аналіз безпеки руху (дані про аварійність і швидкісні режими),
- оптимізація трафіку (моделювання заторів і оцінка впливу перекриттів доріг).

Результати такого аналізу дозволяють керівникам обґрунтувати інвестиції: визначити, які дороги потребують ремонту в першу чергу, де доцільно будувати розв'язки, а де достатньо оновити розмітку. За останні 5–10 років у науковій літературі з'явилося чимало досліджень, присвячених data-driven підходам до управління дорогами. Кейси з усього світу – від прогнозування ДТП у великих містах до оптимізації ремонту сільських доріг – ілюструють можливості великих даних і ГІС-аналітики. Головна мета цих методів на практиці полягає в підвищенні ефективності управління, тобто в більш обґрунтованому розподілі ресурсів і зниженні аварійності.

2.3.3 Методи візуалізації.

Візуалізація – це заключний етап опрацювання даних, який перетворює аналітичні висновки на доступні для сприйняття образи. У сфері дорожньої інфраструктури вона не лише допомагає представити складні просторові та статистичні дані у зручному вигляді, а й слугує інструментом оперативного реагування, комунікації з громадськістю та стратегічного планування. Від інтуїтивних онлайн-карт до багатофункціональних дашбордів – сучасні платформи візуалізації дають змогу інтерактивно взаємодіяти з даними, переглядати критичні об'єкти, аналізувати тенденції й виявляти проблемні зони у кілька кліків. У цьому розділі розглядаються основні підходи до візуалізації – від публічних карт до

аналітичних панелей, що підтримують управлінські рішення в режимі реального часу.

Інтерактивні карти – завершальний етап обробки геоданих (“збір → аналіз → візуалізація”), адже саме наочність дає змогу швидко зрозуміти проблему та ухвалити рішення. Найзручніший інструмент – веб-карти з можливістю перемикання шарів, масштабування та перегляду об’єктів за кліком. Такі карти використовують як менеджери для планування, так і громадськість – для моніторингу. Наприклад, до початку війни Укравтодор запровадив онлайн-карту ремонтів на державних трасах, яка відображала активні та заплановані роботи. Це підвищувало прозорість і дозволяло громадянам бачити, куди йдуть бюджетні кошти. За даними 2018 року, карта демонструвала особливу активність ремонтів у західних і центральних регіонах України. [112]. Ще один приклад – інтерактивна краудсорс-карта Bellingcat, де за допомогою фото- і відеодоказів зафіксовано сотні випадків руйнування цивільної інфраструктури під час війни [105]. Користувачі можуть фільтрувати події за часом і типом (удари по будівлях, мостах тощо), що робить карту цінним інструментом для журналістів, дослідників і громадськості. Загалом, карти – універсальний спосіб подання геоданих: кольорові позначки, значки й підказки дозволяють донести навіть складні висновки (наприклад, зони ризику чи маршрути об’їзду) у зрозумілому форматі, доступному навіть нефахівцям.

Дашборди та геоаналітичні портали. Для управлінців важливе значення має не лише карта, а й пов’язана з нею статистика, тому широкого поширення набули дашборди (інформаційні панелі), які об’єднують карти, графіки, таблиці та ключові показники. Дашборд забезпечує цілісне уявлення про ситуацію на одному екрані. У контексті дорожньої інфраструктури це можуть бути дані про стан доріг, бюджети та безпеку руху. Наприклад, національне агентство з управління дорогами може використовувати дашборд із такими елементами: відсоток доріг у доброму чи поганому стані, кількість аварій за останній місяць, обсяг виконаних ремонтів, а також інтерактивна карта проблемних ділянок. На практиці такі системи вже застосовуються. На рисунку (Рисунок 2.9) представлено приклад дашборду, який

використовувався для оцінки руйнувань інфраструктури в Макарівській громаді Київської області [113].

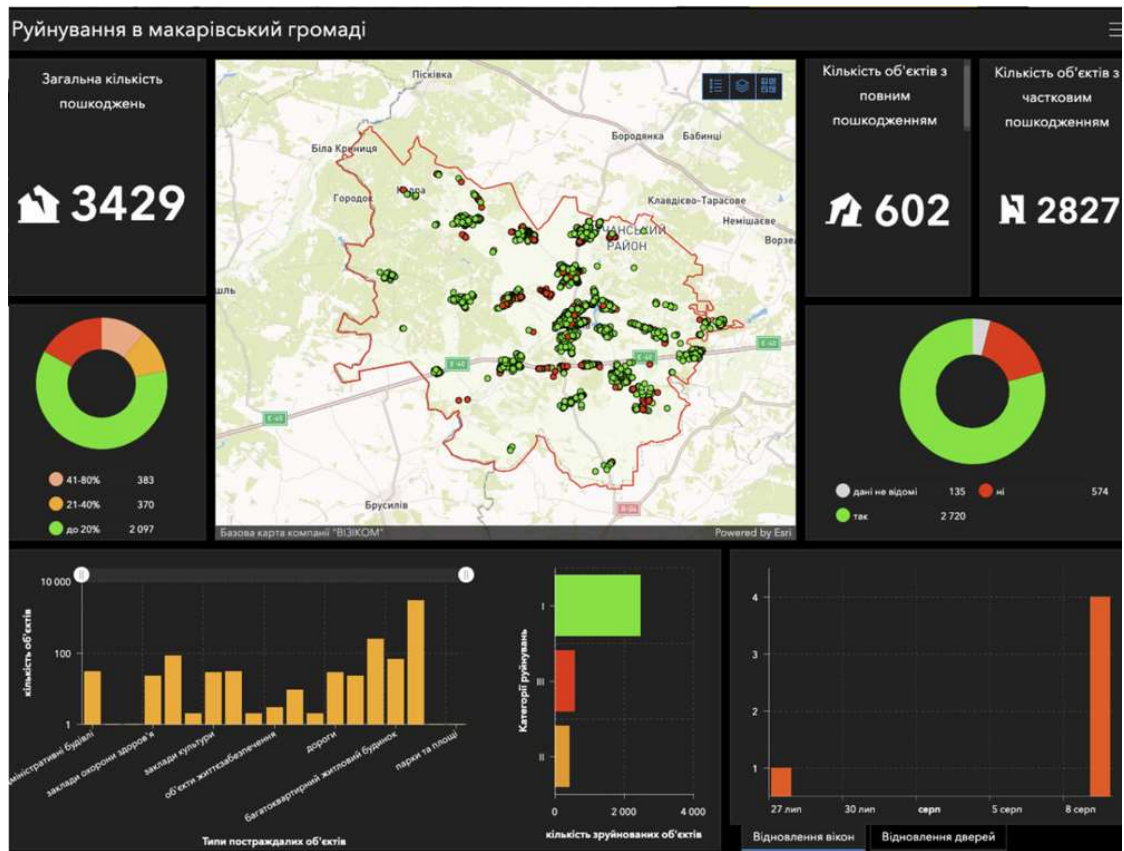


Рисунок 2.9 - Руйнування в Макарівській громаді – фрагмент геоінформаційного дашборду: на карті зеленими і червоними мітками показано об'єкти з різним ступенем пошкодження, ліворуч – загальна кількість пошкоджених об'єктів, діаграма розподілу за відсотком (джерело [113])

Подібні інтерактивні панелі розробляються на базі платформ ГІС, таких як Esri Dashboard, Google Data Studio з картографічними компонентами або власні веб-портали. У дорожньому господарстві дашборди використовуються для моніторингу в реальному часі: диспетчери отримують на екрані інформацію від усіх датчиків (швидкість руху, погодні умови), бригади бачать заявки на ремонт, а керівництво – агреговані ключові показники ефективності (KPI) по галузі.

2.3.4 Зв'язок «збір–аналіз–візуалізація»

Ефективне управління дорожньою інфраструктурою ґрунтується на циклічному процесі роботи з даними. Спочатку збір даних – через датчики, додатки та супутники – забезпечує систему актуальною інформацією. Далі аналіз даних у

ГІС дозволяє виявити тенденції, пріоритети та проблемні точки. Нарешті, результати відображаються через візуалізацію – карти та дашборди, – що слугує основою для ухвалення рішень. Цей цикл працює безперервно: наприклад, громадяни надіслали 100 заявок про ями, система проаналізувала їх і визначила 10 вулиць із найбільшою концентрацією проблем, а на дашборді керівник бачить ці «гарячі точки» й направляє туди ремонтні бригади. Після завершення ремонту оновлені дані знову збираються, і цикл повторюється. На схемах управління дорожніми активами цей процес часто зображають як кільце або послідовність стрілок: від збору даних (Data Collection) до аналізу даних (Data Analysis), візуалізації даних (Data Visualization), а потім до ухвалення рішень і дій. Таким чином, візуалізація виступає не просто завершальним етапом, а зв'язковою ланкою між аналізом і практичними управлінськими заходами, одночасно започатковуючи новий цикл удосконалення інфраструктури.

Висновки до другого розділу

У межах другого розділу було розроблено авторські моделі та методи для цифровізації управління дорожньо-інфраструктурними проєктами. На основі проведеного в попередньому розділі аналізу сформовано концептуальну модель цифрового управління, що базується на принципі цифрового двійника та інтегрує різноманітні джерела даних. На базі цієї моделі удосконалено метод управління дорожньо-інфраструктурними проєктами, сутність якого полягає у застосуванні інтегрованої цифрової моделі як єдиного джерела даних та аналітичної основи для прийняття рішень на всіх етапах життєвого циклу об'єкта.

Аналітичним ядром запропонованої моделі виступає розроблений комплекс математичних моделей для кількісного обґрунтування управлінських рішень. Цей комплекс включає: оптимізаційні моделі для планування ресурсів та мінімізації витрат; прогностичні моделі для оцінки інтенсивності транспортних потоків та темпів деградації дорожнього покриття; а також імовірнісні моделі для оцінки ризиків виникнення дорожньо-транспортних пригод.

Також у розділі деталізовано практичні аспекти реалізації запропонованих рішень. Сформульовано принципи інтеграції геопросторових даних на основі синергії технологій ГІС, ВІМ та ІоТ, що забезпечує безперервність та цілісність даних. Описано поетапну схему впровадження цифрових інструментів та конкретизовано сучасні методи збору, аналізу й візуалізації даних для оптимізації процесів управління.

У сукупності, розроблені в розділі підходи об'єднуються в єдину модель управління повним життєвим циклом дорожньо-інфраструктурних проєктів, яка отримала подальшого розвитку. Її ключовими принципами є:

- наскрізна інтеграція технологій на всіх етапах: від передпроєктного аналізу та планування з використанням ГІС та ВІМ до моніторингу будівництва та експлуатації за допомогою ІоТ та даних ДЗЗ;
- проактивне управління на основі даних, що реалізується через застосування розробленого комплексу аналітичних та прогностичних моделей для обґрунтування рішень та попередження ризиків;
- забезпечення безперервності та цілісності проєктних даних (digital thread), що дозволяє усунути інформаційні розриви між етапами життєвого циклу та підвищити ефективність управління.

Такий підхід формує цілісне методологічне рішення для переходу до data-driven управління дорожньою інфраструктурою, оцінка ефективності якого розглядається у наступному розділі.

РОЗДІЛ 3. Моделювання та оцінка ефективності цифровізації управління дорожньо-інфраструктурними проєктами

3.1 Метод комплексної оцінки ефективності управлінських рішень у дорожньо-інфраструктурних проєктах

3.1.1. Призначення та управлінська сутність методу

Впровадження цифрових рішень у дорожньо-інфраструктурні проєкти є складним, багатогранним процесом, ефективність якого не може бути повною мірою оцінена за допомогою традиційних підходів, таких як простий аналіз витрат і вигод. Класичні методики часто фокусуються на прямих фінансових показниках, ігноруючи при цьому ключові непрямі та довгострокові переваги цифровізації: підвищення якості та оперативності управлінських рішень, зниження ризиків, посилення прозорості та інституційний розвиток організації. Це створює управлінську проблему: без комплексного інструментарію для оцінки реальної віддачі від інвестицій у технології, рішення про їх впровадження можуть прийматися інтуїтивно, а їхній справжній вплив залишається невимірним.

Ця проблема є актуальною для дорожніх відомств по всьому світу, що спонукає їх до пошуку комплексних цифрових рішень. Яскравим прикладом є досвід Індії, де впровадження хмарної платформи **Data Lake** дало можливість повністю оцифрувати управління проєктами: система прогнозує можливі затримки та фінансові ризики і завчасно генерує попередження, що значно прискорило ухвалення рішень. У результаті цього переходу на цифрові процеси Національне агентство автодоріг Індії усунуло більшість бюрократичних затримок, а рішення почали прийматися оперативніше, без втрат часу на обмін паперовими документами [114].

Саме для системного вирішення подібних завдань в роботі удосконалено метод комплексної оцінки ефективності управлінських рішень, що приймаються в рамках менеджменту дорожньо-інфраструктурних проєктів. Призначення методу – надати керівникам проєктів та стейкхолдерам об'єктивний, системний та багатокритеріальний інструмент для вимірювання сукупного ефекту від

застосування цифрових технологій. Метод дозволяє вийти за межі простої фінансової звітності та оцінити, наскільки цифровізація сприяє досягненню стратегічних цілей проєкту та організації в цілому.

Управлінська сутність запропонованого методу полягає у переході від фрагментарної, реактивної оцінки (коли аналізуються окремі показники постфактум) до проактивного, системного аналізу. Ця трансформація базується на трьох ключових змінах парадигми:

1. Від однокритеріальної до багатокритеріальної оцінки: Замість фокусування лише на економічних показниках, метод пропонує одночасний аналіз ефективності за кількома напрямками: економічним, технічним, операційним, безпековим та організаційним.

2. Від статичного знімку до динамічного моніторингу: Метод орієнтований не на разову оцінку, а на безперервний моніторинг ефективності протягом усього життєвого циклу проєкту, що дозволяє вчасно коригувати управлінські дії.

3. Від суб'єктивних припущень до data-driven підходу: В основі методу лежить аналіз об'єктивних даних, що збираються цифровими системами, та застосування науково обґрунтованих моделей, що мінімізує суб'єктивізм та підвищує достовірність оцінки.

Таким чином, запропонований метод є не просто набором метрик, а цілісною методологічною рамкою (фреймворком), яка дозволяє менеджерам обґрунтовувати доцільність цифрових ініціатив, порівнювати ефективність альтернативних рішень, контролювати досягнення поставлених цілей та накопичувати знання для оптимізації майбутніх проєктів.

3.1.2. Компоненти методу

Запропонований метод комплексної оцінки є конвергенцією чотирьох взаємодоповнюючих аналітичних блоків. Їхня послідовна та взаємопов'язана дія забезпечує перехід від поверхневих показників до глибокого розуміння ефективності управлінських рішень.

Кількісна оцінка за ключовими показниками ефективності (KPI).

Цей компонент є фундаментом методу, що забезпечує об'єктивну, вимірювану основу для аналізу. Він передбачає визначення та моніторинг операційних та економічних показників, що прямо відображають результативність проєкту. До таких KPI належать: скорочення фактичної вартості та термінів реалізації проєкту порівняно з плановими, підвищення продуктивності праці, зменшення кількості проєктних помилок та переробок, а також економія ресурсів на етапі експлуатації інфраструктури. Для об'єктивної оцінки динаміки цих показників застосовуються статистичні методи, зокрема порівняльний аналіз «до/після» впровадження цифрових рішень, що дозволяє кількісно оцінити досягнутий прогрес. Цей блок відповідає на питання: «Що конкретно змінилося в цифрах?».

Аналітичне моделювання та прогнозування.

Якщо KPI фіксують минулі та поточні результати, то цей компонент є ядром методу, що дозволяє зазирнути в майбутнє та оцінити потенційні наслідки рішень. Він базується на застосуванні розробленої в роботі сукупності математичних моделей, які слугують аналітичним інструментарієм для глибокого аналізу. Цей інструментарій включає:

- Моделі оптимізації ресурсів для визначення найбільш економічно доцільних сценаріїв інвестування та розподілу бюджету. На практиці це реалізується через автоматизований аналіз для об'єктивної пріоритезації ремонтних робіт. Наприклад, ГІС-моделі поєднують інформацію про тип і розмір дефектів, інтенсивність трафіку та орієнтовну вартість ремонту, що дозволяє системі автоматично ранжувати дороги за пріоритетом та визначати, які сегменти є критичними і першочергово потребують фінансування. Такий підхід забезпечує більш ефективне та прозоре спрямування ресурсів.

- Прогностичні моделі технічного стану для переходу до превентивного планування ремонтів та обслуговування, що продовжує життєвий цикл інфраструктури.

- Стохастичні моделі транспортних потоків для адекватної оцінки майбутнього навантаження на дорожню мережу.

- Моделі оцінки ризиків (зокрема, ДТП) для обґрунтування превентивних заходів із підвищення безпеки. Застосування цих моделей перетворює процес управління з реактивного на прогностичний, відповідаючи на питання: «Що станеться, якщо ми прийнемо це рішення?».

Якісний стратегічний аналіз.

Цей блок доповнює кількісні дані, оцінюючи довгострокові та непрямі ефекти від цифровізації, які важко виміряти в числах. Він спрямований на аналіз проєкту в ширшому організаційному та ринковому контексті. Аналіз реалізується через:

- SWOT-аналіз, що дозволяє системно ідентифікувати внутрішні сильні та слабкі сторони цифрового рішення (наприклад, підвищення прозорості проти високих початкових витрат), а також зовнішні можливості та загрози (наприклад, доступ до міжнародних грантів проти ризику кібератак).

- Сценарний аналіз, який використовується для моделювання різних варіантів розвитку подій («what-if») та оцінки стійкості проєктних рішень до майбутніх викликів, таких як зміна законодавства чи економічна криза. Цей компонент відповідає на питання: «Наскільки наше рішення є стійким та стратегічно виправданим?».

Інтегральна оцінка цифрової зрілості.

Це завершальний компонент методу, що надає цілісну, інтегральну оцінку готовності організації до цифрової трансформації та ефективності її зусиль. Для цього застосовується розроблений в роботі індекс цифрової зрілості (DMI). Він є унікальним, оскільки агрегує в єдиний показник оцінку за чотирма ключовими напрямками: рівнем впровадження технологій (TAL), якістю та доступністю даних (DQA), кваліфікацією персоналу (SCL) та досягнутим економічним ефектом (EI). DMI дозволяє проводити об'єктивну діагностику, виявляти «вузькі місця» (наприклад, технології є, а компетенцій у персоналу немає), порівнювати рівень цифрового розвитку між різними підрозділами чи проєктами та формувати обґрунтовану стратегію подальших кроків. Цей блок відповідає на питання: «На якому рівні цифрового розвитку ми знаходимось і куди рухатися далі?».

3.1.3. Етапи застосування методу в управлінні проєктом

Запропонований метод комплексної оцінки не є одноразовою дією, а являє собою циклічний процес, інтегрований у ключові фази життєвого циклу дорожньо-інфраструктурного проєкту. Його застосування дозволяє забезпечити послідовну, data-driven підтримку на кожному етапі – від обґрунтування доцільності до аналізу отриманих результатів.

Етап ініціації та обґрунтування проєкту.

На цьому етапі метод використовується для відповіді на ключове питання: «Чи доцільно впроваджувати конкретне цифрове рішення і якою має бути стратегія його реалізації?». Для цього проводиться початкова діагностика поточного стану («as-is») за допомогою індексу цифрової зрілості (DMI), що дозволяє виявити наявні технологічні та організаційні прогалини. Паралельно, за допомогою SWOT-аналізу, оцінюється стратегічний потенціал цифрової ініціативи. Сценарне моделювання застосовується для порівняння кількох альтернативних шляхів цифрової трансформації. Результатом цього етапу є обґрунтований бізнес-кейс або техніко-економічне обґрунтування проєкту, що містить чітко визначені цілі, очікувані вигоди та обрану стратегію.

Етап планування проєкту.

Після завершення етапу ініціації та обґрунтування проєкту метод комплексної оцінки застосовується для формування детального плану його реалізації. На основі стратегічних цілей визначаються конкретні ключові показники ефективності (KPI), які слугуватимуть об'єктивним критерієм оцінювання прогресу. За допомогою прогнозного моделювання здійснюється розрахунок очікуваних термінів виконання, оптимізація розподілу ресурсів та формування обґрунтованого бюджету. Одночасно аналізуються потенційні ризики, а також розробляються превентивні заходи для їх мінімізації.

У межах цього етапу важливу роль відіграє геопросторовий аналіз із використанням ГІС. Інтеграція даних про стан дорожнього покриття, інтенсивність руху та аварійність дозволяє виявити критичні ділянки та обґрунтувати їх включення до плану першочергових втручань. Подібні практики вже

застосовуються в країнах ЄС: наприклад, у Швеції створення єдиної ГІС-бази дозволило забезпечити комплексне планування з урахуванням екологічних і соціальних факторів, а також покращити координацію між відомствами.

Крім того, сучасні ГІС-платформи надають доступ до додаткових аналітичних шарів – демографії, рельєфу, погодних умов – що забезпечує багатфакторне планування. Таким чином, на етапі планування формується динамічна модель проєкту, що враховує не лише техніко-економічні аспекти, а й просторові ризики та довгострокову ефективність.

Етап реалізації та моніторингу.

У процесі реалізації проєкту запропонований метод слугує інструментом контролю виконання та оперативного управління. Постійний моніторинг фактичних значень ключових показників ефективності (KPI) здійснюється за допомогою інтегрованих ГІС-дашбордів, які поєднують дані з різних джерел – сенсорів, дронів, польових інспекцій – у єдине візуальне представлення. Це забезпечує виявлення відхилень у реальному часі, порівняння з плановими показниками та оперативне ухвалення управлінських рішень.

Цифрові сервіси, зокрема мобільні додатки й хмарні ГІС-рішення, підтримують координацію команд: інформація про дефекти чи виконані роботи, зафіксована інспектором на планшеті чи смартфоні, автоматично відображається на спільній карті для всіх учасників, що прискорює запуск ремонтних процесів і усуває затримки, пов'язані з передачею звітів [115].

У разі фіксації відхилень аналітичні моделі можуть бути використані для оперативного виявлення причин та вибору відповідних дій, що забезпечує проактивний моніторинг інфраструктури. Крім того, періодичний розрахунок індексу цифрової зрілості (DMI) дозволяє оцінити динаміку розвитку організації – наприклад, підвищення компетенцій персоналу або покращення процесів управління.

Етап завершення та аналізу результатів.

Після завершення проєкту метод використовується для проведення фінальної комплексної оцінки його ефективності. Проводиться порівняльний аналіз планових

та фактично досягнутих KPI, розраховується кінцеве значення індексу DMI та оцінюється сукупний економічний ефект від впроваджених цифрових рішень. Результати цього етапу не лише підтверджують успішність проєкту та повернення інвестицій (ROI), але й формують безцінну базу знань. Виявлені закономірності, успішні практики та допущені помилки документуються і враховуються при плануванні майбутніх інфраструктурних проєктів, реалізуючи таким чином принцип організаційного навчання та постійного вдосконалення.

3.1.4 Ключовий результат та управлінська цінність методу

Ключовим результатом застосування розробленого методу є перехід від інтуїтивного, фрагментарного підходу до системного, науково обґрунтованого процесу оцінки ефективності в управлінні дорожньо-інфраструктурними проєктами. Метод трансформує розрізнені дані та показники на цілісну доказову базу, що є фундаментом для прийняття зважених та об'єктивних управлінських рішень.

Управлінська цінність методу для менеджера проєкту та організації в цілому проявляється в таких аспектах:

- Підвищення обґрунтованості інвестицій. Метод надає інструментарій для об'єктивного доведення доцільності інвестицій у цифрові технології перед керівництвом, інвесторами та громадськістю. Замість загальних обіцянок "підвищити ефективність", менеджер може оперувати конкретними прогностичними показниками та результатами сценарного аналізу.

- Оптимізація управлінських рішень. Завдяки багатокритеріальному аналізу, керівник проєкту отримує можливість порівнювати альтернативні стратегії не лише за вартістю, але й за впливом на безпеку, терміни реалізації та рівень ризиків. Це дозволяє обирати найбільш збалансоване та стійке рішення в умовах обмежених ресурсів.

- Проактивне управління ризиками. Аналітичне моделювання та прогнозування, що є ядром методу, дозволяє ідентифікувати потенційні проблеми на ранніх стадіях та розробляти превентивні заходи, що мінімізує ймовірність зриву термінів, перевитрати бюджету та виникнення аварійних ситуацій.

- Посилення прозорості та підзвітності. Використання чітких KPI та інтегральних індексів (DMI) робить процес управління та його результати прозорими для всіх стейкхолдерів. Це сприяє підвищенню довіри до організації та зменшенню корупційних ризиків.

- Стимулювання організаційного розвитку. Застосування методу сприяє формуванню в організації культури управління на основі даних (data-driven culture). Накопичення та аналіз результатів завершених проєктів створює базу знань, що слугує для постійного вдосконалення управлінських процесів та підвищення загальної цифрової зрілості.

Таким чином, запропонований метод комплексної оцінки є не лише інструментом контролю, а й стратегічним активом, що підвищує якість проєктного менеджменту, забезпечує раціональне використання ресурсів та сприяє досягненню довгострокових цілей сталого розвитку дорожньої інфраструктури.

3.2 Інструментарій кількісної оцінки на основі KPI та статистичних методів

Кількісна оцінка є фундаментальним елементом методу комплексної оцінки ефективності, оскільки вона дозволяє перевести результати впровадження цифрових рішень у вимірювані, об'єктивні показники. Цей інструментарій базується на застосуванні ключових показників ефективності (KPI) та статистичних методів аналізу, що дає змогу не лише фіксувати результати, а й доказово обґрунтовувати вплив цифровізації на діяльність організації.

3.2.1. Ключові показники ефективності (KPI) як інструмент вимірювання успіху

Один із базових підходів до оцінки ефективності – застосування ключових показників ефективності (KPI) для вимірювання успіху цифрових ініціатив.

До типових KPI у дорожньому менеджменті відносять: скорочення витрат (наприклад, економія коштів на будівництві чи обслуговуванні), прискорення процесів прийняття рішень (зменшення затримок, час реагування) та точність прогнозів (якість прогнозування трафіку, зносу покриття тощо). За допомогою KPI

менеджери можуть кількісно оцінити, наскільки впровадження ІТ-рішення покращило показники проєкту. Міжнародний досвід підтверджує високий потенціал такого підходу. Наприклад, дослідження португальської дорожньої галузі показало, що цифровізація може дати сумарний фінансовий ефект (за рахунок скорочення видатків і зростання доходів) на рівні **20–40% від поточних надходжень** галузі [116]. Це свідчить про суттєвий потенціал зниження витрат завдяки ІТ-інноваціям. Отже, належним чином визначені КРІ (як-то відсоток економії коштів чи швидкість виконання завдань) дозволяють оцінити *в цифрах*, наскільки цифрові рішення покращують управління дорогами.

Переваги і недоліки КРІ. КРІ мають низку переваг: вони роблять цілі вимірюваними, фокусують увагу на результатах, дозволяють відстежувати прогрес і вчасно коригувати стратегію. Водночас існують обмеження. По-перше, важливо правильно обрати показники: якщо вони не відображають суть ефективності, можна зосередитися на формальних цифрах, а не на реальному впливі. По-друге, КРІ завжди містять елемент суб'єктивності – вибір метрик залежить від контексту і може відрізнятися між організаціями, що ускладнює порівняння. Є й ризик “керування заради показників”, коли команди женуться за цифрами замість реальних змін. До того ж система моніторингу потребує ресурсів, а неточні чи хибно інтерпретовані дані можуть ввести в оману. Отже, КРІ – корисний інструмент, але вимагає обережного застосування й адекватного тлумачення.

Приклади застосування КРІ. На міжнародному рівні вже сформувалися стандартизовані підходи до КРІ в транспортній інфраструктурі. Наприклад, у ЄС розроблено набір показників ефективності для інтелектуальних транспортних систем (ITS), що охоплюють такі аспекти, як **мобільність (час у дорозі, індекс затримок), надійність (варіабельність часу поїздки) та стан системи** [117 ст 42]. Це допомагає об'єктивно оцінити, наскільки впровадження цифрових рішень (напр., систем керування трафіком) покращує ситуацію на дорогах у містах.

У США дорожні агенції використовують КРІ для контролю стану доріг і мостів: відсоток покриттів у доброму стані, індекс нерівностей, рівень аварійності. Це дозволяє оцінити ефективність нових технологій. В Україні практика КРІ теж

розвивається: Укравтодор та регіональні служби вже відстежують частку доріг, що відповідають нормам, середній МІБ (міжнародний індекс рівності покриття) тощо. Згідно з архівним дослідженням, 87% магістралей мають прийнятний рівень рівності покриття [118]. Завдання цифрових систем – допомагати зберігати цей рівень, вчасно фіксуючи погіршення. Окрім технічних, дедалі важливішими стають показники прозорості – наприклад, частка публічно доступних даних про хід робіт. КРІ дозволяють кількісно оцінити вплив цифровізації, але потребують грамотного налаштування для кожного кейсу.

3.2.2. Статистичні методи для об'єктивізації оцінки

Для глибшого та більш об'єктивного аналізу впливу цифрових рішень застосовуються статистичні методи.

Аналіз “до/після” дозволяє ізолювати вплив цифровізації шляхом порівняння ключових показників до та після впровадження. Наприклад, можна проаналізувати, як скоротилася тривалість підготовки проектно-кошторисної документації після запровадження електронного документообігу, або як змінилися витрати на утримання доріг після впровадження ГІС-моніторингу. Також фіксуються зменшення аварійності та пришвидшення тендерних процедур. Важливо базуватися на репрезентативних даних і враховувати зовнішні чинники. Міжнародні організації, зокрема Світовий банк, рекомендують проводити ex-post аналіз, порівнюючи економічну ефективність проєктів з і без цифрових систем.

Регресійний аналіз та моделювання. Для аналізу впливу цифровізації застосовують регресійне моделювання – воно дозволяє виявити кількісні зв'язки між технологіями та показниками ефективності, враховуючи інші чинники. Наприклад, модель із витратами на утримання дороги як залежною змінною та такими предикторами, як наявність ГІС-моніторингу, трафік і вік дороги, може показати, чи дійсно ГІС знижує витрати. Якщо коефіцієнт при змінній “ГІС” статистично значущий і від'ємний – ефект підтверджено. Аналогічно можна оцінити вплив IoT-сенсорів на простої або систем прогнозування трафіку – на рівень заторів. У Португалії, наприклад, дослідження показали: технології прогнозного обслуговування дозволяють зменшити експлуатаційні та капітальні

витрати на 30%. [116]. Отримані моделі демонструють, що завдяки сенсорам та аналітиці менеджери можуть утримувати інфраструктуру на стабільно високому рівні якості та планувати ремонти з мінімально можливими життєвими циклами витрат. Таким чином, регресійний підхід надає математично обґрунтовані докази ефективності цифрових рішень, дозволяючи кількісно оцінити, на скільки одиниць змінюється показник ефективності при впровадженні тієї чи іншої технології.

3.2.3. Специфіка застосування кількісної оцінки в Україні

Міжнародний vs український досвід. У розвинених країнах існує багаторічна база даних для статистичної оцінки цифрових рішень: у США регулярно публікують бенчмарки впливу BIM і ITS, а в Європі ініціативи типу CONDUITS пропонують стандартизовані методики розрахунку індексів ефективності (мобільність, безпека, екологія). В Україні подібні оцінки ускладнені браком історичних даних, але ситуація змінюється. Завдяки міжнародним проєктам, зокрема Світового банку, створено систему Національну систему управління дорожніми активами (RAMS) для збору даних про стан покриття, трафік і аварійність на основних трасах. Крім того, ДП ГЦЦК розробило платформу Digital Road, яка уніфікує паспорти доріг і формує централізовану базу технічних та геопросторових даних [119]. Ці ініціативи закладають основу для майбутніх кількісних оцінок: маючи “цифровий слід” кожного проєкту (дані до впровадження IT і після), українські дорожні організації зможуть застосувати описані вище методи (аналіз трендів, регресії тощо) і отримати об’єктивні метрики ефективності цифровізації. Надалі, зі збільшенням вибірки даних, український дорожній сектор зможе повноцінно користуватися статистичними методами для оцінки ефективності цифрових рішень, так само як це робиться на міжнародному рівні.

3.3. Застосування якісних та стратегічних методів аналізу

Якщо кількісні інструменти, розглянуті в попередньому підрозділі, відповідають на питання "що?" і "скільки?", то якісні та стратегічні методи аналізу дозволяють відповісти на питання "чому?" і "що, якщо?". Вони є невід’ємною частиною методу комплексної оцінки, оскільки доповнюють числові дані глибоким

розумінням контексту, довгострокових наслідків та непрямих ефектів від впровадження цифрових рішень.

3.3.1. SWOT-аналіз як інструмент стратегічної оцінки

Для комплексної оцінки цифрових ініціатив, окрім кількісних показників, необхідно використовувати методи якісного аналізу, зокрема методологію SWOT (Strengths – сильні сторони, Weaknesses – слабкі сторони, Opportunities – можливості, Threats – загрози). Цей підхід дозволяє стратегічно поглянути на впровадження цифрових інновацій, системно визначивши їхні внутрішні переваги та недоліки, а також зовнішні сприятливі фактори і ризики.

До **сильних сторін** цифрових рішень у дорожньому господарстві належать: підвищення оперативності та обґрунтованості рішень (керівники отримують дані в реальному часі і можуть швидко реагувати), оптимізація витрат (завдяки автоматизації і точному плануванню зменшуються перевитрати матеріалів і часу) та прозорість (усі дані про проєкт фіксуються, що знижує корупційні ризики). Наприклад, впровадження електронного документообігу усуває проблему загублених або затриманих паперів – інформація доступна негайно, що прискорює реалізацію проєктів.

Слабкими сторонами можуть бути значні початкові інвестиції і складність впровадження. Нові технології вимагають навчання персоналу, адаптації бізнес-процесів, а іноді – і культурних змін в організації. В Україні ці проблеми відчутні: впровадження цифрових систем йде нерівномірно, у різних регіонах існує різниця в готовності, не вистачає фінансування і кваліфікованих кадрів. Опір змінам з боку частини персоналу та підрядників також можна вважати слабкою стороною – не всі одразу готові працювати в нових ІТ-системах замість звичних схем.

Щодо **можливостей**, то цифровізація відкриває нові горизонти для дорожньої галузі. Збір великого обсягу даних дозволяє застосувати штучний інтелект для прогнозування – від прогнозу руйнувань покриття до моделювання транспортних потоків при різних сценаріях розвитку мережі. Геоінформаційні технології дають змогу врахувати екологічні та соціальні фактори при плануванні (напрямку включати в розрахунки вплив доріг на довкілля або доступність транспортної мережі для

населення). В глобальному масштабі держави зараз активно підтримують цифрові ініціативи: є можливості отримати грантове фінансування, технічну допомогу (від Світового Банку, ЄС тощо) на впровадження інновацій. Це шанс для України прискорити цифрову трансформацію дорожнього сектору, інтегрувавшись у міжнародні проєкти.

Загрози та ризики також присутні. Одна з ключових – це швидкий темп зміни технологій: існує ризик, що система, впроваджена сьогодні, за кілька років застаріє морально. В галузі ІТ дорожньої інфраструктури постійно з’являються нові рішення (дрони, LIDAR-сканери, цифрові двійники тощо), і важливо враховувати, як оновлювати наявні платформи, щоб не втратити актуальність. Інша загроза – кібербезпека: з переходом до цифрового управління дорожньою мережею дані стають критичним активом, і їх необхідно захищати. Також зміни на ринку праці (міграція ІТ-фахівців) або економічні кризи можуть утруднити реалізацію цифрових програм.

Таким чином, SWOT-аналіз допомагає побачити цілісну картину та сформувану збалансовану стратегію: наприклад, зрозуміти, що *сильні сторони* (оперативність, економія) можна максимально реалізувати, якщо використати *можливості* (міжнародна підтримка, нові технології AI), а *слабкі сторони* (брак кадрів, коштів) треба нейтралізувати, мінімізуючи *загрози* (розробляти стратегії протидії застаріванню технологій, вкладати в кіберзахист).

3.3.2. Сценарний аналіз для прогнозування майбутніх викликів

Сценарний аналіз є ще одним потужним аналітичним підходом, який тісно пов’язаний із застосуванням цифрових технологій через потребу в обчислювальних потужностях та великих обсягах даних. Його суть – прогнозування того, як різні управлінські рішення, прийняті сьогодні, позначаться на стані дорожньої мережі в майбутньому.

Наприклад, управлінці можуть розглянути та прорахувати декілька сценаріїв розвитку:

- Сценарій 1 (інерційний): Збереження поточного рівня фінансування ремонтів.

- Сценарій 2 (інвестиційний): Збільшення інвестицій на 30% з акцентом на мостових переходах.

- Сценарій 3 (регуляторний): Впровадження масового вагового контролю для зменшення руйнування покриття вантажними транспортними засобами.

Для кожного сценарію за допомогою математичних та ГІС-моделей прораховується, яким буде середній стан доріг через 5 або 10 років, які ділянки вимагатимуть ремонту, скільки коштів буде витрачено на утримання. Такі прогнози дозволяють вибрати стратегію, яка забезпечує найкращий баланс між витратами і якістю мережі в довгостроковій перспективі.

Сценарний аналіз також застосовують при оцінці ризиків: наприклад, моделюють вплив різних темпів впровадження електромобілів або автопілотованих машин на дорожню інфраструктуру (зміна вимог до розмітки, потреба в зарядних станціях тощо).

Загалом, сценарний підхід дозволяє керівникам дорожньої галузі проаналізувати кілька варіантів розвитку подій і підготуватися до них заздалегідь, вибираючи ті рішення, які приведуть до оптимального результату за критеріями вартості, надійності та безпеки.

3.4 Розробка та обґрунтування моделі індексу цифрової зрілості (DMI) для оцінки дорожньо-інфраструктурних проєктів

Після розгляду кількісних та якісних інструментів оцінки, які дозволяють аналізувати окремі аспекти ефективності проєктів, метод комплексної оцінки завершується застосуванням інтегрального інструменту, що надає цілісне уявлення про цифровий потенціал організації. Таким інструментом є розроблена в межах даного дослідження модель індексу цифрової зрілості (Digital Maturity Index, DMI).

На відміну від попередніх компонентів методу, що фокусуються на операційних результатах чи стратегічному контексті, DMI дозволяє провести комплексну діагностику рівня цифрової готовності самої організації. Він є універсальним інструментом, який дозволяє оцінити стан цифрової трансформації через аналіз чотирьох ключових компонентів:

- рівень впровадження технологій (Technology Adoption Level, TAL);
- якість і доступність даних (Data Quality and Availability, DQA);
- кваліфікацію персоналу (Staff Competency Level, SCL);
- економічний ефект (Economic Impact, EI).

Кожен компонент оцінюється за шкалою від 0 до 25 балів, а загальний показник DMI, що варіюється в діапазоні від 0 до 100 балів, розраховується як сума оцінок цих компонентів.

Запропонована модель вирізняється адаптацією до специфіки дорожньої інфраструктури, враховуючи не лише технологічні аспекти, але й економічні результати цифровізації. На відміну від міжнародних моделей оцінки цифрової зрілості, таких як моделі Deloitte [120] чи Digitopia [121], DMI орієнтований на особливості управління дорожніми мережами, що забезпечує його практичну застосовність для організацій різного масштабу. Модель дозволяє проводити порівняльний аналіз між суб'єктами галузі, виявляти слабкі місця в цифрових процесах і формувати стратегії їх удосконалення. Наприклад, високий показник TAL свідчить про значне охоплення цифровими технологіями, такими як ГІС або IoT, тоді як низький показник SCL вказує на потребу в підвищенні кваліфікації персоналу.

У контексті України модель DMI має особливе значення як інструмент оцінки цифрової спроможності органів управління дорожньою інфраструктурою, зокрема Укравтодору, особливо в умовах післявоєнної відбудови. Адаптивність моделі забезпечує її використання як для окремих проєктів, так і для організацій загалом, незалежно від регіональних чи масштабних особливостей. У цьому підрозділі буде детально розглянуто критерії оцінки та методику розрахунку кожного компонента моделі DMI, включаючи приклади їх практичного застосування.

3.4.1 Рівень впровадження технологій (Technology Adoption Level, TAL)

TAL характеризує ступінь використання цифрових технологій в управлінні дорожньою інфраструктурою. Показник оцінює як масштаб впровадження, так і різноманіття та інтеграцію використовуваних рішень. До прикладів таких технологій належать:

- ГІС включно з мобільними засобами збору даних (ГІС-колекторами);
- IoT для моніторингу в режимі реального часу;
- BIM;
- БПЛА;
- сенсорні системи для збору даних про дорожню інфраструктуру.

Розрахунок показника TAL включає два основні етапи:

1. Визначення базового балу ($S_{B.TAL}$), що базується на відсотку охоплення дорожньої мережі цифровими технологіями.
2. Нарахування додаткових балів за технологічну різноманітність та інтеграцію рішень

Відсоток охоплення визначається на основі формули:

$$P_c = \left(\frac{V_{\text{тех}}}{V_{\text{заг}}} \right) \times 100\% \quad (3.1)$$

Де:

- P_c – відсоток охоплення дорожньої мережі цифровими технологіями;
- $V_{\text{тех}}$ – протяжність дорожньої мережі з цифровими технологіями,
- $V_{\text{заг}}$ – загальна протяжність дорожньої мережі.

Шкала оцінки рівня впровадження технологій наведена у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 - Шкала оцінки рівня впровадження технологій

Діапазон балів	Відсоток охоплення мережі	Опис
0–5	<10%	Технології майже не використовуються
6–10	10–25%	Початкове впровадження (пілотні проекти)
11–15	26–50%	Помірне використання (окремі регіони чи типи доріг)
16–20	51–75%	Широке охоплення (більшість магістралей)
21–25	>75%	Повсюдне використання (включаючи місцеві дороги)

Джерело: сформовано автором.

Розрахунок базового балу ($S_{B.TAL}$) для фактичного відсотка охоплення (P_c), що потрапляє у відповідний діапазон значень з Таблиці 3.1, здійснюється за загальною формулою лінійної інтерполяції:".

$$S_{B.TAL} = S_{B0} + (P_c - P_{c0}) \times \frac{(S_{B1} - S_{B0})}{(P_{c1} - P_{c0})} \quad (3.2)$$

Де:

- $S_{B.TAL}$ – розрахунковий базовий бал за рівнем впровадження технологій;
- P_c – фактичний відсоток охоплення мережі цифровими технологіями (значення, для якого розраховується бал);
- P_{c0} – нижня межа діапазону "Відсоток охоплення мережі" з Таблиці 3.1, до якого потрапляє фактичний P_c ;
- P_{c1} – верхня межа діапазону "Відсоток охоплення мережі" з Таблиці 3.1, до якого потрапляє фактичний P_c ;
- S_{B0} – нижня межа "Діапазону балів" з Таблиці 3.1, що відповідає P_{c0} ;
- S_{B1} – верхня межа "Діапазону балів" з Таблиці 3.1, що відповідає P_{c1} .

Додаткові бали нараховуються за такими критеріями:

- за використання щонайменше двох різних типів цифрових технологій (B_{div}) – +1 бал;
- +1 бал – за інтеграцію технологій в єдину систему або платформу (B_{int}) – +1 бал.

Сума базового та додаткових балів не може перевищувати 25. Якщо підсумкове значення більше, воно округлюється до максимально допустимого.

Покроковий алгоритм розрахунку рівня впровадження технології:

1. Визначається загальна протяжність вулично-дорожньої мережі, якою управляє організація.
2. Проводиться оцінка охоплення технологіями протяжності доріг, де впроваджено хоча б одну цифрову технологію (наприклад, ГІС для картографування чи сенсори для моніторингу).
3. Обчислюється відсоток охоплення цифровими технологіями доріг від загальної протяжності, якою управляє організація.

4. Визначається базовий бал у відповідності до шкали оцінки.
5. Додаються додаткові бали за використання різноманітних технологій та за їх інтеграцію.
6. Розраховується фінальний бал TAL, але не більше 25 балів.

Для прикладу умовно розглянемо організацію, яка управляє дорожньою мережею загальною протяжністю ($V_{\text{заг}}$) 1500 км. Припустимо, що цифрові технології (ГІС для паспортизації, датчики IoT, БПЛА для обстеження) використовуються на ділянках загальною унікальною протяжністю ($V_{\text{тех}}$) 525 км. Використовуються 3 типи технологій, які частково інтегровані (дані з сенсорів IoT передаються у реальному часі до ГІС-системи, ортофото з БПЛА використовуються для моніторингу та проектування).

Відсоток охоплення (P_c):

$$P_c = \left(\frac{525}{1500} \right) \times 100\% = 35\% \quad (3.3)$$

Базовий бал ($S_{B.TAL}$):

Згідно з Таблицею 3.1, $= 35\%$ потрапляє в діапазон 26–50% охоплення, якому відповідає діапазон балів 11–15.

Використовуємо загальну формулу лінійної інтерполяції підставляючи наступні параметри – $P_c = 35\%$, $P_{c0} = 26$, $P_{c1} = 50$, $S_{B0} = 11$, $S_{B1} = 15$:

$$S_{B.TAL} = 11 + (35 - 26) \times \frac{(15 - 11)}{(50 - 26)} = 11 + 9 \times \frac{4}{24} = 12,5 \text{ балів.} \quad (3.4)$$

Додаткові бали (B_{div} та B_{int}):

- За використання щонайменше двох різних типів технологій (ГІС, IoT, БПЛА): **+1 бал.**
- За інтеграцію технологій (часткова інтеграція): **+1 бал.**

Фінальний бал TAL:

$$TAL = S_{B.TAL} + B_{div} + B_{int} = 12,5 + 1 + 1 = 14,5 \quad (3.5)$$

Бал TAL 14.5 (з 25 максимальних) для організації з 35% охопленням мережі цифровими технологіями, використанням трьох типів технологій та їх інтеграцією свідчить про помірний рівень технологічного впровадження. Хоча охоплена лише третина мережі, наявність різноманітних та інтегрованих інструментів на цій

частині вказує на якісний підхід до цифровізації на вже охоплених ділянках. Подальші зусилля можуть бути спрямовані на масштабування цих рішень на решту мережі.

Примітка: Високий рівень TAL свідчить про технологічну зрілість організації та здатність до впровадження інновацій. Низький бал вказує на потребу в інвестиціях у цифрову інфраструктуру та модернізацію процесів.

3.4.2 Якість і доступність даних (Data Quality and Availability, DQA)

Показник «Якість і доступність даних» (Data Quality and Availability, DQA) відображає ступінь актуальності, повноти та зручності доступу до цифрових даних, що використовуються для управління дорожньою інфраструктурою. Він дозволяє оцінити, наскільки ефективно організація збирає, зберігає та використовує дані, необхідні для прийняття обґрунтованих управлінських рішень

Розрахунок DQA базується на оцінці трьох основних складових:

- Частота оновлення даних: характеризує, як часто організація збирає актуальну інформацію порівняно з нормативними вимогами (наприклад, державними будівельними нормами чи внутрішніми стандартами);
- Повнота даних: визначає, яка частина дорожньої мережі, що перебуває в управлінні, має відповідні цифрові паспорти, або інші актуальні записи в базах даних;
- Доступність даних: оцінює легкість, з якою менеджери та інші уповноважені особи можуть отримати необхідні дані – чи це паперові звіти, локальні бази даних, чи сучасні онлайн-системи.

До підсумкового значення DQA також можуть додаватися додаткові бали за використання автоматизованих засобів збору інформації. Максимальне значення показника DQA становить 25 балів.

Нижче наведено детальний опис розрахунку кожної складової DQA.

A. Частота оновлення даних.

Цей параметр відображає, наскільки оперативно організація оновлює критично важливі дані про стан дорожніх об'єктів, наявні дефекти, інтенсивність транспортного руху тощо. Розрахунок здійснюється шляхом порівняння фактичної

частоти оновлення даних з нормативною (або рекомендованою) для різних категорій доріг. Кінцевою метою є визначення відсотка протяжності дорожньої мережі, для якої дані оновлюються з належною періодичністю.

Визначається відсоток мережі, для якої фактична частота оновлення дорівнює або перевищує нормативну.

Для розрахунку необхідні такі параметри:

- Загальна протяжність дорожньої мережі ($V_{\text{заг}}$), км, поділена на типи доріг (наприклад, місцевого, регіонального значення).

- Нормативна частота оновлення даних ($F_{\text{норм}}$) для кожного типу/категорії доріг (кількість оновлень на рік), що визначається чинними стандартами, регламентами або внутрішніми документами організації.

- Фактична частота оновлення даних ($F_{\text{факт}}$) для кожної ділянки мережі (кількість оновлень на рік), згрупована за протяжністю. Фактична частота розраховується так: якщо дані оновлюються раз на n років, $F_{\text{факт}} = 1/n$; якщо раз на m місяців, $F_{\text{факт}} = 1/m$.

Ділянки дорожньої мережі вважаються такими, що відповідають вимогам, якщо для них $F_{\text{факт}} \geq F_{\text{норм}}$. Сумарна протяжність таких ділянок позначається як $V_{\text{відп}}$.

Відсоток мережі, що відповідає нормативним вимогам щодо частоти оновлення даних ($P_{\text{ОновВідп}}$), розраховується за формулою:

$$P_{\text{ОновВідп}} = \left(\frac{V_{\text{відп}}}{V_{\text{заг}}} \right) \times 100\%. \quad (3.6)$$

Базовий бал за частоту оновлення даних ($S_{\text{Оновл}}$) призначається на основі отриманого відсотка $P_{\text{ОновВідп}}$ згідно зі шкалою, наведеною в таблиці (Таблиця 3.2).

Таблиця 3.2 - Шкала оцінки частоти оновлення даних за відсотком відповідності

Відсоток відповідності	Діапазон базового балу	Опис умов оцінки
Менше 20%	0–5	Переважає більшість мережі має застарілі дані
20–40%	6–10	Значна частина мережі не відповідає нормам
41–60%	11–15	Приблизно половина мережі відповідає вимогам

Продовження таблиці 3.2

61–80%	16–20	Більшість мережі відповідає нормам
Понад 80%	21–25	Високий рівень актуальності з мінімальними відхиленнями

Джерело: сформовано автором.

Для точного визначення балу ($S_{\text{оновл}}$) в межах діапазону таблиці 3.2 використовується лінійна інтерполяція за загальною формулою, наведеною раніше при описі розрахунку базового балу для *TAL*.

Наприклад, якщо для умовної організації $P_{\text{оновВідп}} = 70\%$ то згідно з таблицею 3.2 це діапазон 61-80% (16-20 балів). Розрахунковий бал $S_{\text{оновл}}$ становитиме:

$$S_{\text{оновл}} = 16 + \left(\frac{70-61}{80-61} \right) \times (20 - 16) = 17.89 \text{ балів} \quad (3.7)$$

Результатом є базовий бал за частоту оновлення даних ($S_{\text{оновл}}$), який знаходиться в діапазоні від 0 до 25 балів.

Б. Визначення повноти даних

Повнота даних характеризує частку дорожньої мережі, для якої в організації наявні актуальні цифрові дані, що дозволяють здійснювати ефективне управління та аналіз. Оцінка цього параметра враховує як наявність базової інформації про об'єкти інфраструктури, так і глибину деталізації цих даних. Результат виражається базовим балом ($S_{\text{повн}}$) у діапазоні від 0 до 25

Для розрахунку необхідні такі вихідні дані:

- Загальна протяжність дорожньої мережі ($V_{\text{заг}}$), км.
- Протяжність мережі, для якої наявні актуальні базові цифрові дані ($L_{\text{бд}}$), км.
- Протяжність мережі, для якої наявні актуальні деталізовані цифрові дані ($L_{\text{дд}}$), км.

Під базовими даними розуміється мінімальний набір інформації, необхідний для ідентифікації та основного управління дорожнім об'єктом, наприклад

- Рік останнього ремонту чи будівництва.
- Категорія дороги (наприклад, місцева, регіональна, національна).
- Основні геометричні параметри (довжина ділянки, ширина проїзної частини).

Під деталізованими даними розуміється розширена інформація, що забезпечує поглиблений аналіз стану інфраструктури та планування робіт, наприклад:

- Показники якості покриття (наприклад, міжнародний індекс рівності поверхні (IRI) або інші).
- Дані про типи та обсяги дефектів (тріщини, вибоїни, колійність).
- Інформація про аварійність на ділянках, інтенсивність руху.

Примітка: передбачається, що ділянки з деталізованими даними також мають базові дані, тобто $L_{\text{ДД}} \leq L_{\text{БД}}$.

Відсоток базової повноти ($P_{\text{БП}}$) розраховується за формулою:

$$P_{\text{БП}} = \left(\frac{L_{\text{БД}}}{V_{\text{зар}}} \right) \times 100\% \quad (3.9)$$

Відсоток деталізації даних ($P_{\text{ДП}}$) визначається як:

$$P_{\text{ДП}} = \left(\frac{L_{\text{ДД}}}{V_{\text{зар}}} \right) \times 100\% \quad (3.10)$$

Базовий бал за повноту даних ($S_{\text{Повн}}$) складається з двох частин:

- Бал за базову повноту ($S_{\text{БП}}$): оцінюється на основі $P_{\text{БП}}$ за шкалою від 0 до 15 балів (Таблиця 3.3);

- Бал за деталізацію даних ($S_{\text{ДП}}$): оцінюється на основі $P_{\text{ДП}}$ за шкалою від 0 до 10 балів (Таблиця 3.4);

Остаточний бал за повноту даних не перевищує 25 та обчислюється як:

$$S_{\text{Повн}} = S_{\text{БП}} + S_{\text{ДП}}. \quad (3.11)$$

Таблиця 3.3 - Шкала оцінки базової повноти даних

Відсоток повноти базових даних	Діапазон базового балу	Опис умов оцінки
0–25%	0–4	Незначна частка мережі охоплена базовими даними
26–50%	5–8	Чверть до половини мережі має базові дані
51–75%	9–12	Більша частина мережі охоплена базовими даними
76–100%	13–15	Переважає більшість мережі має базові дані

Джерело: сформовано автором.

Таблиця 3.4 - Шкала оцінки деталізації даних

Відсоток деталізації	Діапазон додаткового балу	Опис умов оцінки
0–25%	0–2	Незначна частка мережі має деталізовані дані
26–50%	3–5	Чверть до половини мережі має деталізовані дані
51–75%	6–8	Більша частина мережі має деталізовані дані
76–100%	9–10	Переважає більшість мережі має деталізовані дані

Джерело: сформовано автором.

Для точного визначення балів в межах кожного діапазону відповідних таблиць використовується лінійна інтерполяція за загальною формулою, наведеною раніше (при описі TAL).

Наприклад, для ілюстрації розрахунку повноти даних, нехай $V_{\text{заг}} = 1000$ км, базові дані наявні для $L_{\text{БД}} = 600$ км, а деталізовані – для $L_{\text{ДД}} = 300$ км.

1. Розраховуємо відсоток базової повноти даних:

$$P_{\text{БП}} = \left(\frac{600}{1000} \right) \times 100\% = 60\% \quad (3.12)$$

Що згідно з таблицею потрапляє у діапазон 51-75% (9-12 балів):

$$S_{\text{БП}} = 9 + \left(\frac{60-51}{75-51} \right) \times (12 - 9) = 9 + \left(\frac{9}{24} \right) \times 3 = 10.13 \text{ балів} \quad (3.13)$$

2. Розраховуємо відсоток деталізованих даних:

$$P_{\text{ДП}} = \left(\frac{300}{1000} \right) \times 100\% = 30\% \quad (3.14)$$

Що згідно з таблицею потрапляє у діапазон 26 – 50% (3 – 5 балів):

$$S_{\text{ДП}} = 3 + \left(\frac{30-26}{50-26} \right) \times (5 - 3) = 3 + \left(\frac{4}{24} \right) \times 2 = 3.33 \text{ балів} \quad (3.15)$$

3. Розраховуємо остаточний бал за повноту даних:

$$S_{\text{Повн}} = S_{\text{БП}} + S_{\text{ДП}} = 13.46 \text{ балів} \quad (3.16)$$

Отриманий результат свідчить про середній рівень повноти даних в умовній організації.

В. Аналіз доступності даних

Доступність даних визначає рівень технологічної інфраструктури, яка забезпечує системність та зручність доступу до актуальної інформації для уповноважених осіб. Оцінка цього параметра базується на аналізі типів систем зберігання та інтеграції даних, що використовуються в організації для різних частин дорожньої мережі. Результат виражається базовим балом ($S_{\text{Дост}}$) у діапазоні від 0 до 25.

Для розрахунку необхідні такі вихідні дані:

- Загальна протяжність дорожньої мережі ($V_{\text{заг}}$), км;
- Частки мережі (в км або %), для яких дані зберігаються та обробляються за допомогою різних типів технологічної інфраструктури, умовно розділених на п'ять рівнів:

- Рівень 1: Дані в паперовій формі або у вигляді розрізнених цифрових файлів без системної інтеграції.
- Рівень 2: Дані зберігаються в локальних базах даних без інтеграції між собою.
- Рівень 3: Дані знаходяться в частково інтегрованій системі (наприклад, доступні через внутрішню корпоративну мережу або систему документообігу з обмеженою інтеграцією).
- Рівень 4: Дані централізовані в єдиній онлайн-системі з можливістю доступу через інтернет.
- Рівень 5: Дані розміщені на хмарній інтегрованій платформі з повною інтеграцією та автоматизованим доступом (наприклад, через API).

Кожному рівню технологічної інфраструктури присвоюється фіксований бал згідно з таблицею 3.5.

Таблиця 3.5 - Шкала оцінки доступності даних

Рівень технологічної інфраструктури	Фіксований бал рівня (Бал рівня)	Опис умов оцінки
Паперова форма або розрізнені джерела	5	Дані не інтегровані, ручна обробка
Локальні бази даних без інтеграції	10	Цифрові дані без системної інтеграції
Частково інтегрована система	15	Часткова інтеграція (мережа чи документообіг)
Єдина онлайн-система (інтернет-доступ)	20	Централізована система з онлайн-доступом
Хмарна платформа з повною інтеграцією	25	Повна інтеграція й автоматизований доступ

Джерело: сформовано автором.

Розрахунок базового балу за доступність даних ($S_{\text{Дост}}$) виконується як середньозважене значення фіксованих балів для кожного рівня, виходячи з частки дорожньої мережі, що обслуговується відповідною інфраструктурою

$$S_{\text{Дост}} = \sum_{i=1}^5 \left(S_{\text{рівня}_i} \times \frac{P_{\text{рівня}_i}}{100} \right) \quad (3.17)$$

Де:

- $S_{\text{рівня}_i}$ – фіксований бал для i -го рівня технологічної інфраструктури (згідно з таблицею 3.5);

- $P_{\text{рівня}_i}$ – частка дорожньої мережі (у відсотках), дані для якої обробляються за допомогою інфраструктури i -го рівня. Сума всіх $P_{\text{рівня}_i}$ має дорівнювати 100%.

Наприклад, нехай для умовної організації дані розподілені так: 10% мережі – паперові дані ($P_{\text{рівня}_1} = 10\%$), 40% мережі – локальні бази даних ($P_{\text{рівня}_2} = 40\%$), 30% – частково інтегрована система ($P_{\text{рівня}_3} = 30\%$), 20% – єдина онлайн-система ($P_{\text{рівня}_4} = 20\%$), і 0% – хмарна платформа ($P_{\text{рівня}_5} = 0\%$).

Тоді розрахунок балу доступності виглядатиме наступним чином:

$$S_{\text{Дост}} = \left(5 \times \frac{10}{100} \right) + \left(10 \times \frac{40}{100} \right) + \left(15 \times \frac{30}{100} \right) + \left(20 \times \frac{20}{100} \right) + \left(25 \times \frac{0}{100} \right)$$

$$S_{\text{Дост}} = (5 \times 0.1) + (10 \times 0.4) + (15 \times 0.3) + (20 \times 0.2) + (25 \times 0)$$

$$S_{\text{Дост}} = 0.5 + 4 + 4.5 + 4 + 0 = 13 \text{ балів} \quad (3.18)$$

Отриманий бал 13 (з 25 можливих) свідчить про середній рівень доступності даних в організації, де переважають локальні та частково інтегровані системи.

Для точної оцінки доступності даних рекомендується:

- Провести інвентаризацію наявних даних та систем їх зберігання, визначивши частку мережі для кожного рівня технологічної інфраструктури.
- Об'єктивно оцінити рівень інтеграції між системами: відсутність обміну даними, частковий обмін чи повна інтероперабельність.
- Розрізняти онлайн-доступ (централізований портал) від повноцінних хмарних платформ (які передбачають автоматичне оновлення, API, масштабованість).

Додатковий бал нараховується за використання автоматизованих засобів збору даних, таких як БПЛА, сенсори чи супутникові знімки. Наявність хоча б одного такого інструменту, застосованого до частини мережі, додає 2 бали до базового значення. Максимальний внесок цього фактору обмежений 2 балами незалежно від кількості автоматизованих засобів.

Г. Формування підсумкового значення DQA

Підсумковий бал за компонентом "Якість і доступність даних" (DQA) розраховується як середнє арифметичне балів, отриманих за трьома основними складовими, що були детально розглянуті вище:

- Бал за частоту оновлення даних ($S_{\text{Оновл}}$);
- Бал за повноту даних ($S_{\text{Повн}}$);
- Бал за доступність даних ($S_{\text{Дост}}$).

Формула для розрахунку підсумкового балу DQA:

$$DQA = \frac{S_{\text{Оновл}} + S_{\text{Повн}} + S_{\text{Дост}}}{3} \quad (3.19)$$

Оскільки кожна з трьох складових оцінюється в діапазоні від 0 до 25 балів, підсумковий бал DQA, розрахований як їх середнє арифметичне, також буде знаходитися в діапазоні від 0 до 25 балів. Таким чином, додаткове обмеження максимальним порогом не потрібне.

Для прикладу, для умовної організації були отримані такі оцінки за складовими DQA (з попередніх прикладів розрахунків для кожної складової):

- Бал за частоту оновлення даних ($S_{\text{оновл}}$) = 17,89 балів;
- Бал за повноту даних ($S_{\text{повн}}$) = 13,46 балів;
- Бал за доступність даних ($S_{\text{дост}}$) = 13 балів.

Розрахунок підсумкового DQA:

$$DQA = \frac{17,89 + 13,46 + 13}{3} = \frac{44,35}{3} \approx 14,78 \text{ балів} \quad (3.20)$$

Отриманий бал DQA 14.78 (з 25) для "Автошлях-Інновація" свідчить про загалом дещо вищий за середній рівень якості та доступності даних. Організація демонструє хорошу актуальність даних, але є резерви для покращення їх повноти та забезпечення доступу через більш сучасні технологічні платформи.

3.4.3 Кваліфікація персоналу (Staff Competency Level, SCL)

Компонент "Кваліфікація персоналу" (Staff Competency Level, SCL) оцінює рівень підготовки працівників, залучених до управління дорожньою інфраструктурою, до роботи з сучасними цифровими системами (такими як ГІС, BIM, інструменти аналітики даних тощо). Також визначається, чи відповідає наявна кількість кваліфікованих спеціалістів поточним потребам підприємства або організації. Підсумковий результат SCL виражається балом від 0 до 25.

Для розрахунку SCL необхідні такі вихідні дані:

- Загальна кількість персоналу, залученого до управління інфраструктурою ($N_{\text{заг}}$) (працівники, чиї функції включають планування, аналіз, моніторинг чи безпосередню роботу з інструментами цифровізації інфраструктури, наприклад, інженери, менеджери проєктів, аналітики).

- Кількість працівників із підтвердженими цифровими навичками та компетенціями у використанні відповідних цифрових систем ($N_{\text{цифр}}$) (наявність сертифікатів, задокументований досвід роботи з ГІС, BIM, аналітикою даних тощо).

- Кількість працівників на спеціалізованих посадах, що вимагають профільних цифрових компетенцій ($N_{\text{спец}}$) (наприклад, ГІС-аналітики, ІТ-координатори проєктів цифровізації, BIM-менеджери).

- Інформація про регулярність та системність програм навчання та підвищення кваліфікації персоналу у сфері цифрових технологій.

- Обсяг інфраструктури, що перебуває в управлінні організації ($V_{\text{інфр}}$) (наприклад, загальна протяжність дорожньої мережі в км, кількість інфраструктурних об'єктів або інший релевантний показник масштабу діяльності).

Оцінка кваліфікації персоналу (SCL) здійснюється за чотирма основними аспектами:

1. Частка працівників із цифровими навичками: відображає загальний рівень цифрової компетентності серед персоналу, залученого до управління.
2. Наявність спеціалізованих ролей: оцінює присутність і достатність профільних фахівців для ключових цифрових функцій.
3. Програми навчання: визначає системність підготовки персоналу до роботи з цифровими технологіями.
4. Відповідність кількості фахівців обсягу інфраструктури: порівнює фактичну кількість спеціалістів із розрахунковою потребою.

Розрахунок SCL проводиться поетапно.

Етап 1: Визначення загальної кількості персоналу, залученого до управління інфраструктурою ($N_{\text{заг}}$)

На цьому етапі визначається сукупність працівників, чий посадові обов'язки безпосередньо пов'язані з управлінням дорожньо-інфраструктурними об'єктами та процесами, і які потенційно мають використовувати цифрові інструменти у своїй роботі (наприклад, інженери з експлуатації, проєктувальники, фахівці з моніторингу, менеджери проєктів, аналітики тощо).

Етап 2: Обчислення частки працівників із цифровими навичками та відповідного балу ($B_{\text{част}}$).

Оцінюється загальна готовність визначеного персоналу до виконання завдань в умовах цифровізації. Спочатку розраховується відсоток персоналу з підтвердженими цифровими навичками ($P_{\text{нав}}$):

$$P_{\text{нав}} = \left(\frac{N_{\text{цифр}}}{N_{\text{заг}}} \right) \times 100\% \quad (3.21)$$

Де:

- $N_{\text{цифр}}$ – кількість працівників із цифровими компетенціями,
- $N_{\text{заг}}$ – загальна кількість персоналу, залученого до управління інфраструктурою.

Бал за частку працівників із цифровими навичками ($B_{\text{част}}$) визначається на основі отриманого відсотка ($P_{\text{нав}}$) згідно зі шкалою, наведеною в таблиці 3.6.

Таблиця 3.6 - Шкала оцінки частки працівників із цифровими навичками

Відсоток із навичками ($P_{\text{нав}}$)	Бал за частку ($B_{\text{част}}$)	Опис умов оцінки
0–20%	0–2	Цифрові компетенції представлені мінімально
21–40%	3–4	Обмежена частка персоналу з цифровими навичками
41–60%	5–6	Середній рівень цифрової підготовки персоналу
61–80%	7–8	Значна частка персоналу з цифровими компетенціями
81–100%	9–10	Високий рівень цифрової підготовки персоналу

Джерело: сформовано автором.

Для точного визначення балу в межах кожного діапазону Таблиці 3.6 використовується лінійна інтерполяція за загальною формулою:

$$B_{\text{част}} = S_{B0} + (P_{\text{нав}} - P_{C0}) \times \frac{(S_{B1} - S_{B0})}{(P_{C1} - P_{C0})} \quad (3.22)$$

Де:

- $B_{\text{част}}$ – розрахунковий бал за частку працівників із цифровими навичками;
 - $P_{\text{нав}}$ – фактичний відсоток працівників із цифровими навичками;
 - P_{C0} – нижня межа діапазону "Відсоток із навичками" з Таблиці 3.6, до якого потрапляє $P_{\text{нав}}$;
 - P_{C1} – верхня межа діапазону "Відсоток із навичками" з Таблиці 3.6, до якого потрапляє $P_{\text{нав}}$;
 - S_{B0} – нижня межа "Діапазону балу ($B_{\text{част}}$)" з Таблиці 3.6, що відповідає P_{C0} ;
 - S_{B1} – верхня межа "Діапазону балу ($B_{\text{част}}$)" з Таблиці 3.6, що відповідає P_{C1} .
- Максимальне значення $B_{\text{част}}$ обмежується 10 балами.

Етап 3: Оцінка наявності спеціалізованих ролей та відповідного балу ($B_{\text{спец}}$).

Визначається наявність та достатність працівників на спеціалізованих посадах ($N_{\text{спец}}$), відповідальних за ключові цифрові функції (наприклад, ГІС-аналіз, ВІМ-координація, управління даними). Бал за наявність спеціалістів ($B_{\text{спец}}$) розраховується на основі рівня покриття цифрових функцій такими спеціалістами (Таблиця 3.7).

$$B_{\text{спец}} = 2 \times \text{Рівень покриття (максимум 10)} \quad (3.23)$$

Таблиця 3.7 - Шкала оцінки наявності спеціалізованих ролей

Наявність спеціалістів	Рівень покриття	Бал за спеціалістів ($B_{\text{спец}}$)	Опис умов оцінки
Відсутні	0	0	Профільні цифрові ролі не представлені
Обмежена кількість у центральному офісі	1	2	Спеціалісти зосереджені в центральній структурі
Присутні в ключових підрозділах	2	4	Спеціалісти розподілені в основних підрозділах
Часткове покриття функцій	3	6	Більшість ключових функцій забезпечена
Значне покриття функцій	4	8	Основні цифрові задачі укомплектовані
Повне покриття функцій	5	10	Усі необхідні цифрові ролі представлені

Джерело: сформовано автором.

Етап 4: Оцінка програм навчання

На цьому етапі оцінюється системність та якість програм навчання і підвищення кваліфікації персоналу у сфері цифрових технологій, що використовуються в управлінні дорожньою інфраструктурою. Бал за навчання ($B_{\text{навч}}$) визначається на основі рівня організації та системності таких програм згідно з Таблицею 3.8 (максимум 3 бали).

Таблиця 3.8 - Шкала оцінки програм навчання

Організація та системність програм навчання з цифрових технологій	Бал ($B_{\text{навч}}$)
Навчання з цифрових технологій відсутнє або має виключно епізодичний, неформальний характер.	0
Проводяться окремі, несистематичні навчальні заходи (наприклад, участь у зовнішніх семінарах, нерегулярні внутрішні інструктажі).	1
Впроваджено регулярні програми підвищення кваліфікації (наприклад, щорічні/піврічні формальні курси для ключових спеціалістів) ТА/АБО існує базова система внутрішнього навчання основам роботи з цифровими інструментами.	2
Існує комплексна, постійно діюча система розвитку цифрових компетенцій персоналу, що включає регулярні планові навчання (внутрішні та/або зовнішні), доступ до актуальних навчальних матеріалів/курсів, можливо, елементи наставництва чи індивідуальні плани розвитку для працівників, що активно використовують цифрові технології.	3

Джерело: сформовано автором.

Етап 5: Визначення відповідності кількості фахівців обсягу цифрових робіт

На даному етапі оцінюється повнота кадрового забезпечення організації для виконання ключових завдань, пов'язаних із цифровим управлінням дорожньо-інфраструктурними об'єктами. Визначається відповідність фактичної кількості наявних спеціалізованих фахівців ($N_{\text{спец}}$) розрахунковій потребі в них ($N_{\text{необх}}$), виходячи з річного обсягу та трудомісткості відповідних цифрових операцій.

Розрахункова необхідна кількість фахівців ($N_{\text{необх}}$) визначається за формулою:

$$N_{\text{необх}} = \frac{(V_{\text{ОЦР}} \times K_{\text{час.од}})}{T_{\text{рік.спец}}} \quad (3.24)$$

Де:

- $N_{\text{необх}}$ – розрахункова необхідна кількість спеціалізованих фахівців для виконання ключових цифрових операцій;

- $V_{\text{ОЦР}}$ – сукупний річний обсяг ключових операцій з цифровими даними, що виконуються в організації (наприклад, кількість об'єктів інфраструктури, що підлягають внесенню/оновленню в ГІС, протяжність доріг, для яких проводиться

цифровий моніторинг, кількість одиниць ТЗРДР, що потребують обліку та актуалізації, тощо). Перелік ключових операцій та їх обсяги визначаються організацією на основі аналізу її основних цифрових процесів;

- $K_{\text{час.од}}$ – середній коефіцієнт трудомісткості виконання однієї умовної одиниці обсягу цифрових робіт $V_{\text{оцр}}$ (в людино-годинах на одиницю). Даний коефіцієнт встановлюється на основі затверджених норм часу, хронометражу виконання типових операцій або експертних оцінок для різних видів цифрових робіт.

- $T_{\text{рік.спец}}$ – середньорічний ефективний фонд робочого часу одного спеціаліста (в годинах), що розраховується з урахуванням нормативної тривалості робочого тижня та кількості робочих днів на рік (наприклад, $160 \text{ годин/місяць} \times 11.5 \text{ місяців} \approx 1840 \text{ годин/рік}$).

При наявності в організації кількох різних напрямків цифрових робіт, що вимагають залучення спеціалістів різного профілю або значних обсягів, сукупна потреба $N_{\text{необх}}$ може визначатися як сума потреб за кожним ключовим напрямком, з урахуванням можливості суміщення функцій наявними працівниками.

Наприклад, припустимо, що організація щорічно обробляє дані щодо 50 000 одиниць ТЗРДР ($V_{\text{оцр_ТЗРДР}}$). Середня трудомісткість обробки однієї одиниці ТЗРДР ($K_{\text{час.од_ТЗРДР}}$) становить 0.04 людино-години. Річний фонд робочого часу одного спеціаліста ($T_{\text{рік.спец}}$) – 1840 годин. Тоді розрахункова потреба у фахівцях для виконання лише цього виду робіт становитиме:

$$N_{\text{необх_ТЗРДР}} = \frac{(50000 \text{ од.} \times 0,04 \text{ год/од.})}{1840 \text{ год/спец.}} = \frac{2000}{1840} \approx 1.09 \quad (3.25)$$

Аналогічні розрахунки проводяться для інших ключових цифрових операцій, після чого визначається сукупна потреба $N_{\text{необх}}$.

Бал за відповідність наявної кількості спеціалізованих фахівців ($N_{\text{спец}}$) розрахунковій потребі ($N_{\text{необх}}$) ($B_{\text{відп}}$) призначається за наступною шкалою:

- 0 балів, якщо $N_{\text{спец}} < 0.5 \times N_{\text{необх}}$ (тобто, фактична кількість спеціалістів становить менше 50% від розрахункової потреби);

- 1 бал, якщо $0.5 \times N_{\text{необх}} \leq N_{\text{спец}} < N_{\text{необх}}$ (тобто, фактична кількість спеціалістів становить від 50% до 99% від розрахункової потреби);
- 2 бали, якщо $N_{\text{спец}} > N_{\text{необх}}$ (тобто, розрахункова потреба у спеціалістах повністю закрита або є певний резерв).

Етап 6: Розрахунок підсумкового балу за компонентом "Кваліфікація персоналу" (SCL)

Підсумковий бал за компонентом "Кваліфікація персоналу" (SCL) розраховується як сума балів, отриманих за чотирма попередніми аспектами: частка працівників із цифровими навичками ($B_{\text{част}}$), наявність спеціалізованих ролей ($B_{\text{спец}}$), програми навчання ($B_{\text{навч}}$) та відповідність кількості фахівців обсягу робіт ($B_{\text{відп}}$).

Формула для розрахунку підсумкового балу SCL:

$$SCL = B_{\text{част}} + B_{\text{спец}} + B_{\text{навч}} + B_{\text{відп}} \quad (3.26)$$

Отриманий бал SCL знаходиться в діапазоні від 0 до 25 та комплексно відображає рівень цифрової підготовки персоналу організації, а також кількісну та якісну достатність фахівців для ефективного управління дорожньо-інфраструктурними об'єктами та проєктами в умовах цифровізації.

Високий бал (21–25) свідчить про достатню кількість і підготовку фахівців для цифрового управління, а низький бал (<10) вказує на потребу в додаткових кадрах чи навчанні.

3.4.4 Економічний ефект (Economic Impact, EI)

Компонент "Економічний ефект" (Economic Impact, EI) призначений для оцінки ступеня досягнення позитивних економічних змін та рівня оптимізації процесів внаслідок впровадження цифрових систем в управлінні дорожньою інфраструктурою. Основний акцент робиться на вимірюванні ефективності використання ресурсів, зокрема через аналіз зменшення операційних та проєктних витрат, а також підвищення продуктивності виконання завдань. Оцінка EI ґрунтується на порівнянні ключових економічних показників діяльності організації до та після впровадження відповідних цифрових рішень для ідентифікованого набору операційних дій і виражається балом (B_{EI}) в діапазоні від 0 до 25 балів.

А. Вихідні дані для розрахунку ЕІ.

Для розрахунку економічного ефекту необхідно визначити сукупний вплив цифровізації на ключові операційні дії. Це вимагає наступних вихідних даних, зібраних за порівняльні періоди (наприклад, за рік) до та після впровадження цифрових технологій для ідентифікованого набору N операційних дій, що зазнали цифровізації:

- $V_{\text{до}}$ – сукупні річні витрати, пов'язані з виконанням обраного набору N операційних дій до впровадження цифрових технологій, у грошових одиницях.
 - Для розрахунку $V_{\text{до}}$ необхідно ідентифікувати конкретні операційні дії, на які спрямована цифровізація (наприклад, процес інвентаризації ТЗРДР, підготовка звітності, обробка запитів, польові обстеження тощо). Потім для кожної з цих N дій оцінюються річні витрати до цифровізації, які потім сумуються.
 - Приклади статей витрат для кожної операційної дії можуть включати: прямі витрати на персонал (зарплата за час, витрачений на операцію), матеріальні витрати, витрати на послуги сторонніх організацій, частина накладних витрат, що відноситься до даної операції.
- $V_{\text{після}}$ – аналогічні сукупні річні витрати на виконання того ж набору N операційних дій після впровадження цифрових систем, у грошових одиницях.
 - Оцінюється, як змінилися витрати на ті самі операційні дії завдяки автоматизації, оптимізації, зменшенню трудомісткості тощо.
- $P_{\text{до}}$ – показник(и) продуктивності для обраного набору N операційних дій до впровадження.
 - Це може бути загальний обсяг виконаних завдань в рамках цих операцій (наприклад, кількість оброблених одиниць інформації про ТЗРДР) за певний період, або усереднений показник продуктивності на одного працівника чи на одиницю часу для цих дій. У випадку, коли цифровізація охоплює декілька різнорідних операційних дій з різними одиницями виміру продуктивності, для кожної такої дії (j) визначаються індивідуальні показники $P_{\text{до}_j}$.

- $P_{\text{після}}$ – аналогічний(і) показник(и) продуктивності для того ж набору N операційних дій після впровадження цифрових систем

Ключовим на цьому етапі є чітке визначення обсягу (scope) аналізу: які саме операційні дії розглядаються, та як для них коректно виміряти сукупні витрати та продуктивність до та після цифровізації. Організація має обрати ті операційні дії, де вплив цифровізації є найбільш очікуваним та вимірюваним. Дані збираються з бухгалтерської звітності, систем обліку робочого часу, операційних журналів, нормативів трудомісткості тощо. Для коректності порівняння важливо забезпечити зіставність періодів та врахувати інші зовнішні фактори, що могли вплинути на показники, окрім безпосередньо цифровізації.

Б. Складові економічного ефекту та етапи розрахунку

Економічний ефект (EI) в рамках даної методики оцінюється за двома ключовими напрямками:

- Зменшення витрат ($E_{\text{витр}}$): відображає економію, досягнуту завдяки оптимізації процесів, зменшенню помилок, скороченню потреби в матеріальних та людських ресурсах при виконанні ідентифікованого набору операційних дій.

- Зростання продуктивності ($E_{\text{прод}}$): показує підвищення ефективності виконання завдань та операцій в рамках ідентифікованого набору операційних дій (більше результату за ті ж або менші ресурси/час).

Розрахунок відбувається поетапно:

Етап 1: Розрахунок відсотка зменшення витрат ($E_{\text{витр}}$).

Відсоток економії витрат ($E_{\text{витр}}$) для обраного набору операційних дій визначається за формулою:

$$E_{\text{витр}} = \frac{(B_{\text{до}} - B_{\text{після}})}{B_{\text{до}}} \times 100\% \quad (3.27)$$

Якщо $B_{\text{після}} \geq B_{\text{до}}$ (тобто, сукупні витрати на обрані операційні дії не зменшились або зросли), то $E_{\text{витр}} = 0$.

Етап 2: Розрахунок відсотка зростання продуктивності ($E_{\text{прод}}$)

Відсоток підвищення продуктивності ($E_{\text{прод}}$) для обраного набору операційних дій визначається.

Якщо аналізується одна операційна дія або декілька однорідних дій, де показники продуктивності $P_{до}$ та $P_{після}$ можна агрегувати (наприклад, підсумувати обсяги виконаних робіт у зіставних одиницях), формула розрахунку має вигляд:

$$E_{\text{прод}} = \frac{(P_{\text{після}} - P_{\text{до}})}{P_{\text{до}}} \times 100\% \quad (3.28)$$

Якщо $P_{\text{після}} \leq P_{\text{до}}$ (тобто, сукупна/усереднена продуктивність для обраних операційних дій не зросла або зменшилась), то $E_{\text{прод}} = 0$.

У випадку, коли оцінюється вплив на декілька (k) різнорідних операційних дій з різними натуральними одиницями виміру продуктивності, для кожної дії j спочатку розраховується індивідуальний відсоток зростання продуктивності:

$$E_{\text{прод}_j} = \frac{(P_{\text{після}_j} - P_{\text{до}_j})}{P_{\text{до}_j}} \times 100\% \quad (3.29)$$

Якщо $P_{\text{після}_j} \leq P_{\text{до}_j}$, то $E_{\text{прод}_j} = 0$.

Після цього розраховується загальний середньозважений відсоток зростання продуктивності ($E_{\text{прод}}$) для сукупності обраних операцій:

$$E_{\text{прод}} = \sum_{j=1}^k (w_j \times E_{\text{прод}_j}) \quad (3.30)$$

Де:

- w_j – ваговий коефіцієнт j -ї операційної дії, що відображає її частку в загальній трудомісткості (або іншому релевантному показнику значущості) всіх k операцій до цифровізації (при цьому $\sum_{j=1}^k w_j = 1$).

Етап 3: Визначення середнього відсоткового економічного ефекту ($E_{\text{ср}}$)

Середній відсотковий економічний ефект ($E_{\text{ср}}$) розраховується як середнє арифметичне ненульових значень показників $E_{\text{витр}}$ та $E_{\text{прод}}$:

- Якщо $E_{\text{витр}} > 0$ та $E_{\text{прод}} > 0$, то $E_{\text{ср}} = \frac{(E_{\text{витр}} + E_{\text{прод}})}{2}$.
- Якщо лише один з показників більший за нуль (наприклад, $E_{\text{витр}} > 0$, а $E_{\text{прод}} = 0$), то $E_{\text{ср}} = E_{\text{витр}}$ (або $E_{\text{прод}}$, якщо він єдиний ненульовий).
- Якщо $E_{\text{витр}} = 0$ та $E_{\text{прод}} = 0$, то $E_{\text{ср}} = 0$.

Етап 4: Призначення базового балу за економічний ефект (B_{EI})

Бал за економічний ефект (B_{EI}) призначається на основі розрахованого середнього відсоткового економічного ефекту (E_{cp}) згідно зі шкалою, наведеною в Таблиці 3.9.

Таблиця 3.9 - Шкала оцінки економічного ефекту

Середній відсоток ефекту (E_{cp}), %	Діапазон базового балу (B_{EI})	Опис умов оцінки
0	0	Економічного ефекту немає
1-10	1-5	Незначний ефект
11-20	6-10	Помірний ефект
21-30	11-15	Середній ефект
31-50	16-20	Значний ефект
51-70	21-23	Високий ефект
>70	24-25	Максимальний ефект

Для точного визначення балу (B_{EI}) в межах кожного діапазону Таблиці 3.9 використовується лінійна інтерполяція за загальною формулою:

$$B_{EI} = S_{B0} + (E_{cp} - P_{C0}) \times \frac{(S_{B1} - S_{B0})}{(P_{C1} - P_{C0})} \quad (3.31)$$

Де:

- B_{EI} – розрахунковий базовий бал за економічний ефект;
- E_{cp} – фактичний середній відсоток економічного ефекту;
- P_{C0} – нижня межа діапазону "Середній відсоток ефекту" з Таблиці 3.9;
- P_{C1} – верхня межа діапазону "Середній відсоток ефекту" з Таблиці 3.9;
- S_{B0} – нижня межа "Діапазону базового балу (B_{EI})" з Таблиці 3.9, що відповідає (P_{C0});
- S_{B1} – верхня межа "Діапазону базового балу (B_{EI})" з Таблиці 3.9, що відповідає (P_{C1}).

Підсумковий бал за економічний ефект (B_{EI}) знаходиться в діапазоні від 0 до 25 балів і відображає досягнутий рівень економічних вигод та оптимізації від впровадження цифрових технологій для ідентифікованого набору операційних дій. Інтерпретація отриманого балу (наприклад, бал менше 10 свідчить про низьку

економічну віддачу від цифровізації на поточному етапі, тоді як бал 21–25 вказує на значну економічну вигоду) допомагає оцінити ефективність інвестицій у цифрову трансформацію.

Висновок. Розроблена модель індексу цифрової зрілості (DMI) дозволяє комплексно визначити рівень цифрової трансформації організацій, що займаються управлінням дорожньою інфраструктурою. Вона охоплює ключові аспекти цифровізації – від впровадження технологій і якості даних до кваліфікації персоналу та економічного ефекту.

Перевагою запропонованої моделі є її універсальність, прозора структура розрахунку та можливість адаптації до специфіки підприємств різного масштабу. Кожен компонент розраховується за чіткими критеріями, що забезпечує об'єктивність та відтворюваність результатів.

Використання такого індексу може стати основою для порівняльного аналізу, формування стратегічних планів цифровізації та обґрунтування інвестицій у цифрову інфраструктуру. Модель також може бути розширена для інших галузей, де цифрова трансформація є критичною складовою ефективного управління.

Висновки до третього розділу

У межах третього розділу вирішено завдання щодо моделювання та об'єктивної оцінки ефективності цифровізації в управлінні дорожньо-інфраструктурними проєктами. Встановлено, що традиційні підходи, які базуються переважно на прямих фінансових показниках, є недостатніми для вимірювання комплексного ефекту від впровадження цифрових технологій. У зв'язку з цим було запропоновано удосконалений метод комплексної оцінки ефективності управлінських рішень, сутність якого полягає у переході до системного, багатокритеріального аналізу, що охоплює економічний, технічний, операційний та організаційний аспекти.

Ключовим елементом запропонованого методу є розроблена та обґрунтована модель індексу цифрової зрілості (DMI). Цей інструмент дозволяє проводити комплексну діагностику рівня цифрової готовності організацій дорожньої галузі

через інтегральну оцінку чотирьох компонентів: рівня впровадження технологій (TAL), якості та доступності даних (DQA), кваліфікації персоналу (SCL) та досягнутого економічного ефекту (EI). Розробка даного індексу стала вирішенням одного з ключових завдань дисертації.

Практична цінність розробленого в розділі інструментарію полягає у наданні менеджерам об'єктивних інструментів для обґрунтування інвестицій, оптимізації управлінських рішень, проактивного управління ризиками та порівняльного аналізу (бенчмаркінгу) рівня цифрового розвитку. Таким чином, створено науково-методологічне підґрунтя для впровадження стандартів ефективності в дорожній галузі, що є особливо актуальним в умовах повоєнної відбудови.

РОЗДІЛ 4. Практичне впровадження та оцінка цифровізації дорожньо-інфраструктурних проєктів

4.1 Аналіз практичного впровадження геоінформаційних технологій в управлінні дорожньою інфраструктурою України

Національні ініціативи та державні системи:

Одним із ключових проєктів у цій сфері є розробка системи **Digital Road** Державним підприємством «Галузевий центр цифровізації та кібербезпеки» (ГЦЦК). Ця система дозволяє проводити паспортизацію українських доріг за єдиною електронною формою, акумулюючи та систематизуючи інформацію про технічний стан автомобільних доріг та їх геопросторові дані. Впровадження такої системи сприяє стандартизації підходів до моделювання доріг та підвищенню прозорості управління дорожньою галуззю [119].

Крім того, Міністерство інфраструктури України активно працює над створенням цифрового дубліката дорожньої інфраструктури країни. Це дозволить не лише стандартизувати підхід до моделювання доріг, а й забезпечити ефективне управління транспортною мережею [122].

На місцевому рівні також спостерігається впровадження цифрових рішень. Наприклад, у Черкаській області реалізується проєкт «Digital Cherkasy», який об'єднує зусилля донорів, бізнесу та місцевої влади для цифрової трансформації регіону. Серед досягнень проєкту – розробка стратегії цифрової трансформації області, впровадження телемедицини та створення віртуальних турів популярними туристичними місцями [123].

Однак, попри позитивні зрушення, процес цифровізації дорожньої інфраструктури в Україні стикається з низкою викликів. Серед них – нерівномірність впровадження цифрових рішень у різних регіонах, обмежене фінансування та потреба в підготовці кваліфікованих кадрів. Вирішення цих проблем є ключовим для успішної цифрової трансформації транспортної галузі країни.

У сфері транспорту одним з показових проєктів є веб-ГІС «Інтерактивна мапа Укравтодору», запущена Державним агентством автомобільних доріг у 2020 році. Це комплексне рішення, що надає актуальну і достовірну інформацію про ключові логістичні артерії – автомобільні дороги державного значення [124]. Карта Укравтодору має кілька модулів: «Звернення» (для скарг громадян щодо стану дороги), «Ремонти» (відображає плани, хід та завершення ремонтних робіт) і «Утримання доріг» (дані про прибирання, очищення, інші роботи з експлуатаційного утримання) [124].

Громадяни можуть в режимі онлайн повідомляти про проблеми на дорозі (ями, сміття, відсутність розмітки тощо), ці звернення надходять до диспетчерів і передаються підрядним організаціям; користувач може відстежувати статус виконання звернення [124]. На карті також відображаються в реальному часі дані GPS-трекінгу дорожньої техніки (наприклад, снігоприбиральних машин) – це дозволяє контролювати роботу підрядників [124]. За словами Голови Укравтодору (Олександра Кубракова) на момент презентації сервісу, вже в тестовому режимі було отримано 400 звернень з фотографіями, на які дорожні служби відреагували [124].

Впровадження цієї ГІС стало можливим завдяки появі галузевого стандарту СОУ 2016 р. на ГІС доріг і загалом курсу на цифровізацію «Укравтодору». У дослідженнях відзначалося, що впровадження такої ГІС покращить управління дорогами в умовах обмеженого фінансування, дозволить систематизувати дані про дороги та забезпечити доступ водіїв до актуальної інформації [23]. Результат – підвищення прозорості та залучення громадян до моніторингу: тепер кожен може на мапі побачити, де і які дороги відремонтовано, а де плануються роботи [124]. Це сприяє громадському контролю і зменшує корупційні ризики в дорожньому господарстві. Крім того, карта Укравтодору інтегрується з системою **Prozorro** (закупівлі) та **CoST** (Ініціатива прозорості інфраструктури) – напрямку з ГІС можна перейти до даних тендерів на конкретну ділянку дороги. Цей приклад демонструє, як ГІС-технології покращують управління інфраструктурою, роблячи його дані публічними та наочними [124].

ГІС-рішення для післявоєнного відновлення.

У процесі післявоєнного відновлення геопросторові дані набувають вирішального значення для ефективного розподілу ресурсів і координації зусиль. Масштаби руйнувань, спричинених війною в Україні, вражають своєю величиною. За оцінками Світового банку, станом на кінець 2024 року прямі збитки інфраструктури перевищують десятки мільярдів доларів [125]. Зокрема, до листопада 2024 року пошкоджено понад 26 тисяч кілометрів доріг і 344 мости та мостові переходи державного, місцевого чи комунального значення [1]. Перед дорожнім сектором постає складне завдання: відновлення тисяч кілометрів дорожнього покриття й сотень мостових конструкцій. При цьому ключовими вимогами є оперативність виконання робіт і максимальна економічна результативність. У подальшому викладі розглядаються методи збору та аналізу геопросторових даних, які застосовуються для потреб відновлення дорожньої інфраструктури в Україні в післявоєнний період.

Моніторинг руйнувань та збір доказових даних. Після деокупації територій одним із першочергових завдань стало систематичне документування пошкоджень об'єктів інфраструктури, зокрема доріг, мостів і шляхопроводів. Для цього активно залучалися супутникові технології та аерофотозйомка. Укравтодор, у співпраці з військовими підрозділами та волонтерами, організував аерообльоти за допомогою дронів над зруйнованими ділянками транспортних магістралей [126]. Отримані внаслідок цього ортофотоплани високої роздільної здатності стали основою для подальшого GIS-аналізу. Водночас супутникові знімки від компаній Maxar і Planet [127] використовувалися для порівняння стану інфраструктури «до» і «після» руйнувань. Такий підхід уможливив оперативне картографування ділянок, де дороги зазнали фізичного розриву або були заблоковані завалами. .

Значний внесок у збір даних зробили волонтерські ініціативи. Зокрема, спільноти OSINT-експертів, наприклад Bellingcat, використовуючи відкриті джерела, задокументували сотні фактів руйнування мостів і дорожнього покриття, позначивши їх на загальнодоступних картах [105]. Кожна зафіксована точка супроводжується просторовими координатами, датою події та доказами у вигляді

фото- чи відеоматеріалів. Ця інформація відіграє ключову роль у підготовці звітів для міжнародних партнерів, а також у плануванні відновлювальних робіт, забезпечуючи чіткість і достовірність оцінки потреб.

ГІС у Укравтодорі та Агентстві відновлення. Після реорганізації Державного агентства автомобільних доріг України (Укравтодор) у межах структури Державного агентства відновлення та розвитку інфраструктури ГІС стали ключовим інструментом управління у післявоєнний період. З метою забезпечення оперативного моніторингу стану транспортної інфраструктури, у тому числі зруйнованих і відновлених об'єктів, було розгорнуто цифрову платформу на основі ГІС-технологій [128].

На базі ініціативи ONOVA GIS HUB [129] створено централізовану систему, яка дозволяє фіксувати кожен випадок пошкодження об'єктів дорожньої інфраструктури із зазначенням географічних координат, фотофіксації, поточного статусу об'єкта («не відновлено», «тимчасово відновлено», «відновлено») та прив'язки до відповідного проєкту відбудови. Кожен об'єкт у базі отримує унікальний ідентифікатор, що уможливорює простежування історії робіт та планування подальших заходів.

Інформація вноситься безпосередньо з регіонів та централізується для подальшого аналізу. Керівництво Агентства має доступ до аналітичних дашбордів, які дозволяють у реальному часі оцінювати стан транспортної мережі, контролювати хід виконання робіт, аналізувати відставання від графіків та приймати оперативні управлінські рішення на національному рівні.

Ця система має публічну і закриту частини: на закритій реконструктори вводять та аналізують дані (фотографії руйнувань, експертні висновки, проєкт и відновлення, кошториси), прив'язуючи все до геолокації [130]. ONOVA HUB також пов'язує інфраструктурні дані з генеральними планами розвитку громад, земельним кадастром та мережами інженерних комунікацій [130] – тобто діє як комплексна ГІС відбудови. За підтримки Міністерства розвитку громад, територій та інфраструктури цей проєкт масштабують до створення повноцінної **ГІС Інфраструктури України**, про що підписано меморандум у 2023 році [130].

Очікується, що така національна система охопить і дорожню інфраструктуру, ставши єдиною базою даних для планування інвестицій, контролю проєктів та координації зусиль між різними відомствами і донорами.

На практичному рівні Агентство відновлення комбінує використання комерційних програмних продуктів, таких як ESRI ArcGIS, із власними розробками. Зокрема, впроваджено єдину систему управління зверненнями громадян (CRM), яка пов'язана з географічною картою. Завдяки цьому скарги на стан доріг реєструються з прив'язкою до конкретної локації, що уможливорює їх візуалізацію та аналіз із розподілом за регіонами [131]. Крім того, Укравтодор активно співпрацює з платформою Prozorro, забезпечуючи відкритість тендерів на виконання дорожніх робіт. У системі DREAM для цього передбачено окремий модуль, який відображає, які саме дороги ремонтуються, за які кошти та в якому стані перебуває реалізація проєктів [132]. Такий підхід сприяє підвищенню ефективності управління та прозорості у процесі відбудови.

Портал моніторингу ремонтів доріг (2019). Для забезпечення прозорості та громадського контролю за ремонтами доріг в Україні було створено онлайн-портал, що відображає фінансування та прогрес робіт [132]. Цей ресурс, презентований офісом ефективного регулювання BRDO, інтегрує ГІС-карту з даними про Дорожній фонд, тендери та підрядників. Користувачі можуть обрати регіон або конкретну дорогу і побачити, скільки коштів виділено та освоєно на ремонт, хто виконавець робіт, а також переглянути інформацію про стан дороги (наявність ямковості, план ремонту) [132]. Така система забезпечує зв'язок між фізичним станом дороги та управлінськими даними – від “вибоїни” через відповідальне агентство і тендер до “відремонтованої ділянки”. Портал став прикладом успішної інтеграції ГІС з відкритими даними та системою публічних закупівель, значно підвищивши рівень відкритості в дорожній галузі

4.2 Діагностика цифрової зрілості та моделювання шляхів підвищення ефективності управління на прикладі КП «Центр організації дорожнього руху»

Характеристика об'єкта дослідження.

Апробація розроблених у дисертації моделей та методів проводилась на прикладі ключового структурного підрозділу комунального підприємства «Центр організації дорожнього руху» – Служби дислокації технічних засобів регулювання дорожнього руху (далі – Служба). Вибір саме цього підрозділу як об'єкта для поглибленого аналізу є методологічно обґрунтованим. Діяльність Служби безпосередньо пов'язана з предметом дослідження, оскільки вона є центром компетенцій, відповідальним за цифровізацію та інформаційну підтримку процесів управління дорожньою інфраструктурою.

Відповідно до положення про Службу, до її основних завдань та функцій належать:

- забезпечення формування та ведення загальноміської бази даних дислокації ТЗРДР із використанням сучасних геоінформаційних технологій.
- облік, збереження та оцифрування документації стосовно організування дорожнього руху (ОДР) та впровадження (демонтажу) ТЗРДР.
- впровадження новітніх технологій та методів обліку ТЗРДР, розробка пропозицій щодо покращення умов праці спеціалістів.
- створення та оновлення планово-картографічної основи для бази даних дислокації ТЗРДР.
- надання витягів та інформації з бази даних на запити інших структурних підрозділів та організацій.

До початку процесу активної цифровізації робочі процеси в Службі мали переважно паперовий характер. Інформація про дислокацію ТЗРДР зберігалася на багатометрових паперових кресленнях («кальках»), що створювало значні труднощі з доступом, пошуком та актуалізацією даних. Взаємодія між підрозділами здійснювалася шляхом паперового листування через канцелярію, що могло

затягувати процес передачі запиту та отримання відповіді до кількох робочих днів. Підготовка інформації на запит вимагала ручного пошуку в паперових архівах та перекреслювання необхідних фрагментів у графічних редакторах (наприклад, CorelDRAW), що в середньому займало 2-3 дні. Основними проблемами такого підходу були значні часові затримки, ризик втрати або неактуальності даних та відсутність інструментів для швидкого комплексного аналізу ситуації на вулично-дорожній мережі.

Процес цифрової трансформації, що розпочався на підприємстві, кардинально змінив ці підходи. В структурі Служби були створені нові профільні підрозділи: відділ ведення бази даних дислокації ТЗРДР та відділ картографії і геоінформаційних технологій. Станом на сьогодні в єдиній геоінформаційній системі, яку підтримує Служба, містяться відомості про 752 світлофорних об'єкти та понад 236 тисяч інших об'єктів ТЗРДР (дорожні знаки, огорожі тощо).

Ключовим результатом стало створення єдиної цифрової екосистеми, де дані взаємопов'язані за принципом: «документ → об'єкт → результати моніторингу». Було повністю оцифровано архів паспортів світлофорних об'єктів та значну частину документації з ОДР (5984 документи, впроваджені після 2012 року). Це забезпечило миттєвий доступ до інформації через внутрішній геопортал для всіх уповноважених служб, зокрема для проєктувальників, які тепер можуть використовувати актуальні дані як основу для розробки нових проєктів ОДР без необхідності проведення польових вишукувань.

Діагностика та оцінка за компонентами індексу цифрової зрілості (DMI).

Для всебічної оцінки рівня цифровізації в КП «ЦОДР» було проведено комплексну діагностику за допомогою розробленого індексу цифрової зрілості (DMI). Аналіз проводився послідовно за чотирма ключовими компонентами індексу.

Рівень впровадження технологій (TAL).

Компонент TAL характеризує ступінь використання та інтеграції цифрових технологій в операційну діяльність Служби. Оцінка проводилась на основі аналізу еволюції технологічних процесів від початкового стану до поточного.

На початковому етапі цифровізації єдиним наявним геопросторовим ресурсом у Службі була планово-картографічна основа міста масштабу 1:2000 у растровому та векторному форматах, яка потребувала значного доопрацювання. Процес впровадження цифрових інструментів мав системний характер і включав розробку методичного супроводу, аналіз нормативної бази, створення технічного завдання та структури майбутньої бази даних (БД) ТЗРДР.

Ключовим кроком стала розробка та апробація новітніх технологій збору даних. Було реалізовано пілотний проєкт в одному з районів м. Києва, в межах якого працівники з використанням ГІС-колекторів (планшетів зі спеціалізованим програмним забезпеченням) провели польове обстеження. За результатами проєкту було зібрано, оброблено та завантажено до централізованої БД геопросторові дані щодо 12,7 тис. об'єктів ТЗРДР, що стало відправною точкою у формуванні цифрового обліку.

Розрахунок балу TAL.

Розрахунок проводився згідно з методикою, наведеною в підрозділі 3.4.1.

1. Обсяг охоплення (P_c): За основу для оцінки було взято загальну кількість об'єктів ТЗРДР, що підлягають обліку. Станом на сьогодні, за експертною оцінкою, в геопросторовій базі даних системи містяться відомості щодо 95% всіх ТЗРДР міста Києва.

2. Базовий бал ($S_{B.TAL}$): Відсоток охоплення 95% потрапляє у діапазон ">75%", якому відповідає шкала балів від 21 до 25. Розрахунок за формулою лінійної інтерполяції:

$$S_{B.TAL} = 21 + (25 - 21) \times \frac{(95-75)}{(100-75)} = 21 + 4 \times \frac{20}{25} = 24.2 \text{ бали} \quad (4.1)$$

3. Додаткові бали.

За технологічну різноманітність (B_{div}): Служба використовує щонайменше п'ять різних типів технологій (настільні ГІС, мобільні ГІС-колектори, власні програмні модулі, система відеомоніторингу, система електронного документообігу). Це дає +1 бал.

За інтеграцію технологій (Bint): Уся інформація з різних джерел (польові обстеження, камеральна обробка, оцифровані документи) зберігається та обробляється в єдиній централізованій базі даних. Це дає +1 бал.

4. Фінальний бал TAL .

$$TAL = S_{B.TAL} + B_{div} + B_{int} = 24.2 + 1 + 1 = 26.2 \text{ бали} \quad (4.2)$$

Згідно з методикою, максимальне значення TAL обмежене 25 балами. Таким чином, підсумковий бал становить 25 балів.

Отриманий максимальний бал свідчить про дуже високий рівень технологічного впровадження у Службі. Було пройдено шлях від базової картографічної основи до комплексної, інтегрованої геоінформаційної системи, що охоплює переважну більшість об'єктів обліку.

Якість і доступність даних (DQA).

Компонент DQA оцінює якість, повноту, актуальність та зручність доступу до даних, що є основою для прийняття управлінських рішень.

А. Частота оновлення даних ($S_{\text{оновл}}$).

Аналіз показав, що в екосистемі підприємства існують різні регламенти щодо актуалізації даних. Ці регламенти встановлені на рівні від щомісячного до щоквартального обстеження вулиць щомісячно. Водночас, безпосередньо у досліджуваній Службі, через скорочення штату, повний моніторинг вулично-дорожньої мережі проводиться 1-2 рази на рік.

Однак, для найбільш критичних даних – інформації про недоліки в ОДР – система забезпечує дуже високу частоту оновлення. Дані про виявлені дефекти з'являються на інтерактивному дашборді наступного робочого дня, а інформація про їх усунення – практично в режимі реального часу після отримання звіту про усунення дефекту.

А. Розрахунок балу $S_{\text{оновл}}$:

1. Нормативна частота ($F_{\text{норм}}$): Для оцінки будемо спиратися на найбільш жорсткий регламент, який система покликана обслуговувати – щомісячне обстеження вулиць для виявлення недоліків/дефектів в ОДР.

2. Фактична частота ($F_{\text{факт}}$): Для даних про дефекти, що є найбільш динамічними, частота оновлення відповідає регламенту. Для даних загального моніторингу стану ТЗРДР частота нижча за нормативну.

3. Відсоток відповідності ($P_{\text{ОновВідп}}$): Враховуючи, що система забезпечує високу оперативність для критично важливих даних про недоліки, але має нижчу частоту для планового моніторингу, експертно оцінимо сукупний відсоток відповідності нормам на рівні 75%.

4. Базовий бал ($S_{\text{Оновл}}$): Відсоток 75% потрапляє у діапазон 61–80%, якому відповідає шкала балів від 16 до 20. Розрахунок за формулою лінійної інтерполяції:

$$S_{\text{Оновл}} = 16 + \left(\frac{75-61}{80-61} \right) \times (20 - 16) = 18.95 \text{ балів} \quad (4.3)$$

Б. Повнота даних ($S_{\text{Повн}}$).

Б.1. Базова повнота ($P_{\text{БП}}$): Враховуючи, що 95% всіх ТЗРДР внесені в систему хоча б з базовими атрибутами (тип, координати), приймаємо відсоток базової повноти на рівні 95%.

Розрахунковий бал ($S_{\text{БП}}$) за шкалою 0-15 (Таблиця 3.3):

$$S_{\text{БП}} = 13 + \left(\frac{95-76}{100-76} \right) \times (15 - 13) = 13 + \left(\frac{19}{24} \right) \times 2 = 14.58 \text{ балів} \quad (4.4)$$

Б.2. Деталізація даних ($P_{\text{ДП}}$): Згідно з оцінкою, близько 87% об'єктів ТЗРДР та оцифрованих документів мають повну інформацію з прив'язкою до документів-підстав. Приймаємо відсоток деталізації на рівні 87%.

Розрахунковий бал ($S_{\text{ДП}}$) за шкалою 0-10 (Таблиця 3.4):

$$S_{\text{ДП}} = 9 + \left(\frac{87-76}{100-76} \right) \times (10 - 9) = 9 + \left(\frac{11}{24} \right) \times 1 = 9.46 \text{ балів} \quad (4.5)$$

Б.3. Фінальний бал ($S_{\text{Повн}}$):

$$S_{\text{Повн}} = S_{\text{БП}} + S_{\text{ДП}} = 24.04 \text{ бали} \quad (4.6)$$

В. Доступність даних ($S_{\text{Дост}}$)

Доступність даних характеризує легкість отримання інформації уповноваженими особами.

Розрахунок балу $S_{\text{Дост}}$:

В.1. Аналіз інфраструктури:

- Рівень 5 (Хмарна/інтегрована платформа): Вся актуальна інформація (236 тис. об'єктів, ~6000 нових документів) доступна через геопортал. Оцінимо цю частку як ~60% всього інформаційного активу.

- Рівень 3 (Частково інтегрована система): Архів за 2005-2012 рр. (~4500 документів) доступний на сервері в локальній мережі. Оцінимо цю частку як ~35%.

- Рівень 2 (Локальні файли): ~200 проєктів на локальних ПК. Частка ~3%.

- Рівень 1 (Папір): ~100 старих проєктів. Частка ~2%.

В.2. Розрахунок середньозваженого балу ($S_{\text{Дост}}$):

$$S_{\text{Дост}} = (25 \times 0.60) + (15 \times 0.35) + (10 \times 0.03) + (5 \times 0.02) = 20.65 \text{ балів}$$

В.3. Додаткові бали: За використання автоматизованих засобів збору даних (мобільні колектори, система відеомоніторингу) додається +2 бали.

В.4. Фінальний бал ($S_{\text{Дост}}$):

$$S_{\text{Дост}} = 20.65 + 2 = 22.65 \text{ балів} \quad (4.7)$$

Підсумковий розрахунок DQA.

Підсумковий бал за компонентом DQA розраховується як середнє арифметичне отриманих оцінок:

$$DQA = \frac{S_{\text{Оновл}} + S_{\text{Повн}} + S_{\text{Дост}}}{3} = \frac{18.95 + 24.04 + 22.65}{3} = \frac{65.64}{3} = 21.88 \text{ бали}$$

Отриманий бал DQA 21.88 (з 25) є дуже високим. Він свідчить про те, що попри наявність певних проблем з архівною документацією, Служба побудувала ефективну систему, яка забезпечує високу якість, повноту та доступність актуальних даних, необхідних для операційного управління. Проблема неоцифрованого архіву вплинула на бал, не давши йому стати максимальним, що точно відображає реальний стан справ.

Кваліфікація персоналу (SCL)

Компонент SCL оцінює рівень підготовки персоналу до роботи з цифровими технологіями, а також достатність кадрового ресурсу для виконання поставлених завдань.

Розрахунок балу SCL.

А. Частка працівників із цифровими навичками ($B_{\text{част}}$).

Аналіз: Станом на момент дослідження, штат Служби складає 15 осіб. З них 4 співробітники виконують адміністративні функції, не пов'язані з використанням цифрових інструментів. Таким чином, загальна кількість персоналу, залученого до цифрових процесів ($N_{\text{заг}}$), становить 11 осіб. Всі ці 11 співробітників володіють ключовими цифровими інструментами на рівні, необхідному для виконання своїх посадових обов'язків.

Розрахунок: Відсоток персоналу з цифровими навичками ($P_{\text{нав}}$) становить :

$$P_{\text{нав}} = \left(\frac{10}{11}\right) \times 100\% \quad (4.8)$$

Згідно зі шкалою оцінки (Таблиця 3.6), цей показник відповідає максимальному базовому балу $B_{\text{част}} = 10$ балів.

Б. Наявність спеціалізованих ролей ($B_{\text{спец}}$).

Аналіз: В структурі Служби існують профільні відділи (ведення БД, картографії та ГІС), що свідчить про наявність спеціалізованих ролей. Водночас, через брак кадрів, багато співробітників змушені виконувати декілька функцій одночасно. Це відповідає Рівню 3 – "Часткове покриття функцій" за шкалою з Таблиці 3.7.

Розрахунок:

$$B_{\text{спец}} = 2 \times \text{Рівень покриття} = 2 \times 3 = 6 \text{ балів.} \quad (4.9)$$

В. Програми навчання ($B_{\text{навч}}$):

Аналіз: Системні та регулярні програми підвищення кваліфікації на підприємстві відсутні. Навчання переважно відбувається у форматі самоосвіти та внутрішньої передачі знань, зокрема через розроблені автором інструкції для нових співробітників. Це відповідає Рівню 2 – "Впроваджено регулярні програми підвищення кваліфікації (наприклад, щорічні/піврічні формальні курси для ключових спеціалістів) ТА/АБО існує базова система внутрішнього навчання основам роботи з цифровими інструментами" за шкалою з Таблиці 3.8.

Розрахунок: $B_{\text{навч}} = 2$ бали.

Г. Відповідність кількості фахівців обсягу робіт ($B_{\text{відп}}$).

Аналіз: Спостерігається значний дефіцит кадрів (штат заповнений менш ніж на 70%), що не дозволяє виконувати весь обсяг завдань, зокрема проводити оцифрування архіву та виконувати моніторинг згідно з регламентами. При цьому наявні спеціалісти справляються з поточними операційними завданнями, але не мають ресурсу для розширення діяльності. Така ситуація відповідає 1 балу за шкалою оцінки відповідності.

Розрахунок: $B_{\text{відп}} = 1$ бал.

Підсумковий розрахунок SCL.

$$SCL = B_{\text{част}} + B_{\text{спец}} + B_{\text{навч}} + B_{\text{відп}} = 10 + 6 + 2 + 1 = 19 \text{ балів} \quad (4.10)$$

триманий бал SCL 19 (з 25) свідчить про змішану ситуацію в кадровому забезпеченні. З одного боку, Служба має ядро висококваліфікованих, які здатні виконувати складні завдання та самостійно розвивати цифрові інструменти (високий $B_{\text{част}}$). З іншого боку, системна крихкість, спричинена значним дефіцитом кадрів ($B_{\text{відп}}$) та відсутністю формалізованих програм навчання ($B_{\text{навч}}$), є суттєвим бар'єром для подальшого розвитку та масштабування цифрових ініціатив.

Економічний ефект (ЕІ)

Компонент ЕІ оцінює ступінь досягнення позитивних економічних змін та рівня оптимізації процесів внаслідок впровадження цифрових систем. Оцінка ґрунтується на аналізі зростання продуктивності та скорочення операційних витрат.

А. Зростання продуктивності ($E_{\text{прод}}$).

Аналіз показав кардинальне зростання продуктивності праці в ключовій операції – моніторингу стану ТЗРДР, на яку припадає близько 35% загальної діяльності Служби.

- До цифровізації: Процес обстеження 200 об'єктів ТЗРДР вимагав двох повних робочих днів (один день на польові роботи, другий – на камеральну обробку). Це відповідає продуктивності ~100 об'єктів на день на одного спеціаліста.

• Після впровадження: Завдяки розробленому модулю для QGIS та технології збору даних з відеореєстратора, один спеціаліст обробляє в середньому ~300 об'єктів на день, причому дані не потребують додаткової камеральної обробки.

Розрахунок $E_{\text{прод}}$:

$$E_{\text{прод}} = \frac{(300_{\text{об/день}} - 100_{\text{об/день}})}{100_{\text{об/день}}} \times 100\% = 200\% \quad (4.11)$$

Б. Зменшення витрат ($E_{\text{витр}}$).

Прямі фінансові витрати важко підрахувати без доступу до бухгалтерської звітності, однак аналіз скорочення часових витрат на виконання операцій дозволяє оцінити ефект.

Підготовка інформації на запит: Час скоротився з 2-3 днів до кількох годин, що становить економію часу понад 90%.

Доступ до даних для проєктувальників: Час скоротився з кількох годин (на виїзд) до кількох хвилин (на геопорталі), економія >95%.

Доступ до паспортів світлофорів: Скоротився з кількох годин до кількох хвилин.

Витрати на матеріали: Впровадження системи електронного документообігу та геопорталу нівелювало необхідність у масовому друці та копіюванні паперових документів, що призвело до суттєвої економії.

Розрахунок $E_{\text{витр}}$: Експертно оцінимо середнє скорочення певних операційних (часових та матеріальних) витрат на рівні 80%.

Підсумковий розрахунок E_I

Середній відсотковий економічний ефект ($E_{\text{ср}}$), оскільки обидва показники більше нуля, то:

$$E_{\text{ср}} = \frac{(E_{\text{витр}} + E_{\text{прод}})}{2} = \frac{(200 + 80)}{2} = 140\% \quad (4.12)$$

Базовий бал (B_{EI}): Показник 140% потрапляє у діапазон ">70%", якому відповідає шкала балів від 24 до 25.

Розрахунковий бал становить $BEI = 25$ балів

Отриманий максимальний бал EI 25 (з 25) свідчить про надзвичайно високий економічний ефект від впровадження цифрових рішень. Хоча пряма фінансова

економія не підраховувалась, кардинальне зростання продуктивності праці та скорочення часових витрат на ключові операції в службі демонструють глибоку оптимізацію робочих процесів.

Підсумкова оцінка та інтегральний індекс DMI

Таким чином, підсумовуючи бали за всіма компонентами, інтегральний індекс цифрової зрілості (DMI) для Служби дислокації ТЗРДР КП «Центр організації дорожнього руху» становить:

$$DMI = TAL + DQA + SCL + EI = 25 + 21.88 + 19 + 25 = 90.88 \text{ балів} \quad (4.13)$$

Отриманий результат 90.88 зі 100 можливих характеризує досліджувану Службу як організацію з дуже високим рівнем цифрової зрілості. Підрозділ демонструє передовий рівень впровадження технологій, високу якість даних та значний економічний ефект від цифровізації. Ключовою зоною для подальшого розвитку є кадровий потенціал ($SCL = 19$), зокрема системне навчання та вирішення проблеми дефіциту кадрів, що стримує масштабування успішних практик.

Моделювання шляхів підвищення ефективності на основі аналітичних інструментів

Проведена діагностика та високий бал DMI підтверджують, що створена в Службі геоінформаційна екосистема є потужним фундаментом для впровадження більш складних аналітичних інструментів. Розроблена в межах дисертаційного дослідження концептуальна модель (підрозділ 2.1) передбачає використання комплексу математичних моделей, що дозволяють перейти від фіксації стану до його оптимізації та прогнозування. Розглянемо можливість їх практичного застосування для вирішення завдань, що стоять перед КП «Центр організації дорожнього руху».

1. Модель оптимізації маршрутів моніторингу

Проблема: Планування щоденних маршрутів для мобільних екіпажів, що здійснюють відеомоніторинг стану ОДР, наразі відбувається без застосування спеціалізованих алгоритмів. Це призводить до неоптимального використання робочого часу та транспортних ресурсів, особливо враховуючи значну протяжність вулично-дорожньої мережі м. Києва.

Пропоноване рішення: Застосування моделі оптимізації маршрутів на основі алгоритмів пошуку найкоротшого шляху (наприклад, алгоритм Дейкстри або більш складні евристичні методи для вирішення задачі комівояжера). На вхід моделі подаються дані з ГІС про перелік об'єктів або вулиць, що підлягають обстеженню впродовж дня, та актуальний дорожній граф міста з урахуванням статистики заторів.

Очікуваний ефект:

- Скорочення часу на планування: Процес складання маршруту для екіпажу скорочується з кількох годин ручної роботи до кількох хвилин автоматизованого розрахунку.

- Зниження операційних витрат: Оптимізація послідовності об'їзду дозволяє, за попередніми оцінками, скоротити щоденний пробіг транспорту на 15-25%, що веде до прямої економії пального та амортизаційних витрат.

- Підвищення продуктивності: Завдяки економії часу на переміщеннях, кожен екіпаж може за той самий робочий день охопити більшу кількість об'єктів або ділянок мережі.

2. Модель прогнозування та превентивного реагування на ризики ДТП

Проблема: Аналіз аварійності на підприємстві має переважно ретроспективний характер, тобто заходи щодо покращення безпеки руху розробляються для локацій, які вже зарекомендували себе як місця концентрації ДТП. Такий підхід не дозволяє працювати на випередження та запобігати виникненню нових небезпечних ділянок.

Пропоноване рішення: Впровадження ймовірнісної моделі оцінки ризиків ДТП на основі логістичної регресії, як це описано в підрозділі 2.1. Модель передбачає інтеграцію історичних даних про ДТП (отриманих від Національної поліції) з детальними атрибутами дорожньої інфраструктури, що містяться в ГІС Служби (наприклад, тип перехрестя, наявність та стан дорожніх знаків і розмітки, режим роботи світлофорів, інтенсивність руху тощо).

Очікуваний ефект:

- **Перехід від реактивного до проактивного управління безпекою:** Модель дозволить не лише аналізувати минулі події, а й прогнозувати ймовірність виникнення ДТП на будь-якій ділянці мережі.

- **Виявлення прихованих ризиків:** Ідентифікація потенційно небезпечних локацій, які ще не стали офіційними "місцями концентрації ДТП", але мають високу статистичну ймовірність їх виникнення через сукупність інфраструктурних факторів.

- **Обґрунтованість рішень:** Надання Службою аналітично обґрунтованих пропозицій для Департаменту транспортної інфраструктури щодо превентивних заходів (наприклад, встановлення нового знаку, зміна фаз світлофорного регулювання, нанесення шумових смуг).

3. Модель аналізу просторової концентрації дефектів та інцидентів

Проблема: Служба моніторингу щоденно фіксує велику кількість різноманітних недоліків в ОДР по всьому місту. При їх великому обсязі, візуальний аналіз карти з окремими точками дефектів не завжди дозволяє виявити системні проблеми, а лише реагувати на поодинокі випадки.

Пропоноване рішення: Застосування алгоритмів просторової кластеризації (наприклад, DBSCAN), як це описано в підрозділі 2.1. Модель аналізує весь масив геопросторових даних про дефекти (пошкоджені знаки, несправні детектори транспорту, скарги громадян) і автоматично виявляє зони їх аномальної щільності («гарячі точки»). Аналіз можна проводити як для всіх дефектів разом, так і для окремих їх типів.

Очікуваний ефект:

- **Виявлення прихованих закономірностей:** Замість бачити 10 окремих випадків пошкодження знаків, модель може показати один великий кластер. Це може свідчити не про випадковість, а про системну причину (наприклад, невдала конструкція кріплень у цьому районі, системний вандалізм, або маршрут великогабаритного транспорту).

- Перехід від усунення симптомів до вирішення першопричин: Аналіз "гарячих точок" дозволяє приймати більш стратегічні рішення (наприклад, змінити тип кріплень для знаків у всьому кластері, а не просто замінювати їх по одному).

- Оптимізація роботи ремонтних бригад: Можливість групувати заявки на ремонт, що знаходяться в одному кластері, та виконувати їх за один виїзд, підвищуючи ефективність логістики.

4. Модель оптимізації розподілу ресурсів

Проблема: В умовах значного дефіциту кадрів та обмеженого бюджету, перед керівництвом Служби та підприємства в цілому постає щоденна задача пріоритезації робіт. Необхідно об'єктивно вирішувати, які недоліки усувати в першу чергу, які ТЗРДР ремонтувати чи замінювати, щоб отримати максимальний ефект для транспортної системи міста.

Пропоноване рішення: Застосування моделі багатокритеріальної оптимізації, як це описано в підрозділі 2.1. Модель дозволяє формалізувати процес прийняття рішень шляхом присвоєння кожному потенційному завданню (наприклад, усунення дефекту) інтегрального пріоритетного балу. Цей бал розраховується на основі кількох зважених критеріїв:

- вартість та трудомісткість робіт.
- критичність дефекту для безпеки руху (наприклад, непрацюючий світлофор має найвищий пріоритет).

- прогнозований рівень ризику ДТП на ділянці.
- інтенсивність транспортних та пішохідних потоків.
- кількість скарг від громадян.

Очікуваний ефект:

- об'єктивне та прозоре прийняття рішень: Замість суб'єктивного визначення пріоритетів, керівництво отримує аналітично обґрунтований рейтинг завдань для виконання.

- максимізація ефективності бюджету: Гарантія того, що обмежені фінансові та людські ресурси спрямовуються на ті заходи, які дають найбільший сукупний ефект для безпеки та стабільності дорожнього руху.

- системна інтеграція аналітики: Ця модель може використовувати результати інших моделей (прогнозування ризиків, кластеризації) як вхідні дані, об'єднуючи всю аналітичну роботу в єдиний цикл підтримки прийняття рішень.

Впровадження описаного комплексу аналітичних інструментів дозволило б перейти від фіксації та візуалізації даних до їх глибокого аналізу, прогнозування та оптимізації. Це уможливорює перехід на принципово новий рівень управління, де рішення ґрунтуються не лише на констатації фактів, а на науково обґрунтованих прогнозах та оптимізаційних розрахунках. Такий підхід є ключовим для максимізації ефективності діяльності в умовах обмежених ресурсів та підвищення загальної якості функціонування транспортної системи міста.

4.3 Оцінка ефективності впровадження цифровізації в контексті світового досвіду

Впровадження цифрових технологій у дорожньо-інфраструктурні проєкти дає відчутний ефект як у **кількісному**, так і **якісному** вимірах. Світовий досвід і перші українські результати дозволяють оцінити ці ефекти більш предметно.

Кількісні показники. Цифровізація зазвичай спрямована на економію часу та коштів і підвищення продуктивності. Практичні кейси підтверджують значні вигоди. Наприклад, дослідження KPMG показує, що використання цифрових двійників в інфраструктурі забезпечує приблизно **9-разове повернення інвестицій**: кожен 1 долар, вкладений у цифровий twin-технології, дає до 9 доларів вигоди [137]. За рахунок точнішого планування і моделювання **витрати на проєктування** можуть бути зменшені до 50%, а **час на отримання дозволів** скорочено вполовину завдяки цифровим моделям і автоматизації процесів [137]. Так само, коли об'єкт введено в експлуатацію, цифрові рішення допомагають оптимізувати його обслуговування: прогнозне технічне обслуговування на основі даних сенсорів та аналітики може знизити **витрати на утримання** приблизно на 20% [137]. Це узгоджується з досвідом міст, які впроваджують цифрових двійників: за оцінками, міські цифрові моделі можуть дати до 35% економії на експлуатації та обслуговуванні інфраструктури і одночасно підвищити продуктивність

муніципальних служб на 20% [138]. Інший вимір – **часові показники та продуктивність**. У згаданому прикладі Південної Кореї впровадження AI-системи управління рухом призвело до *15% зменшення середнього часу поїздки* на контрольованих перехрестях [39]. Це конкретний доказ того, як цифрові технології можуть поліпшити пропускну спроможність доріг без фізичного розширення. В Україні поки рано говорити про великі статистичні вибірки, але навіть на рівні окремих процесів є зрушення: наприклад, впровадження електронного обліку доріг (Digital Road) та порталу прозорих даних скоротило час пошуку і перевірки інформації про проєкти з кількох днів до лічених хвилин. Автоматичне перетягування 40% даних про ремонти з ProZorro означає суттєву економію людино-годин і швидше оновлення інформації [139].

Для наочності, в таблиці розглянуто декілька показників «до і після» впровадження цифрових інструментів (Таблиця 4.1)

Таблиця 4.1 – Приклади впливу цифровізації на ключові показники дорожньої галузі (джерела наведено в тексті)

Показник / Сценарій	До цифровізації (традиційно)	Після впровадження цифрових рішень
Відкритість даних про дороги (Україна)	Дані розпорошені, доступ обмежений (до 2015 р.) [139] – суспільний контроль ускладнений.	>9 000 контрактів опубліковано онлайн (2018–2021 рр.) – дані оновлюються щоденно [139]. Прозорі дашборди для моніторингу проєктів.
Ефективність використання бюджету	Значні втрати від корупції та нецільового використання (напр., ~\$9,2 млн втрачено в Укравтодорі у 2011–2012 рр.) [139]	Підвищена економія: рахунок прозорості, 40% інформації автоматично публікуються [139] завдяки усуненню розкрадань та дублювання витрат.
Тривалість і вартість проєктування	Довгі цикли проєктування, багато змін і переробок (100% часу/вартості).	Проектування зі стримуванням змін завдяки BIM/GIS: час і витрати знижено ~на 50% [139]. Менше помилок = менше дорогих переробок.
Пропускна здатність доріг у містах	Часті затори в години пік, статичне регулювання світлофорів.	-15% часу в дорозі після впровадження адаптивної системи керування трафіком (AI + IoT). Покращена динаміка руху без будівництва нових доріг.
Планування ремонтів і обслуговування	Реактивні ремонти по мірі виникнення поломок; планування на основі інспекцій раз на рік.	Прогнозне обслуговування на основі датчиків та ГІС-моніторингу: зниження вартості утримання на ~20% і запобігання аваріям [139]

Джерело: сформовано автором.

Як видно з наведеного, **цифрові технології дають реальні, вимірювані покращення**: швидкість виконання завдань зростає, а витрати й втрати – зменшуються. Звісно, результати можуть варіюватися залежно від умов та рівня впровадження, проте тренд є однозначним – підвищення ефективності.

Якісні ефекти. Окрім цифр, цифровізація приносить зміни в самій якості процесів та результатів. Одним з найважливіших ефектів є **прозорість та підзвітність**. Коли дані про проєкти, тендери, виконання робіт доступні в електронному вигляді публічно, це різко знижує можливості для зловживань. Випадки, коли раніше рішення приймалися кулуарно або інформація приховувалася, зараз відходять у минуле – суспільство та бізнес можуть відслідковувати, куди йдуть бюджетні кошти. За словами п'ятого Президента України, завдяки комплексній прозорості та цифровим інструментам “ми зможемо побудувати більше за €30 млрд, ніж раніше будували за €50 млрд” [139], тобто підвищити віддачу від кожної вкладеної гривні. Публічний контроль та аналітичні панелі також дисциплінують підрядників і чиновників – відтепер **якість робіт і дотримання строків** легше перевірити, оскільки все фіксується в системі.

Наступний якісний аспект – **обґрунтованість та швидкість прийняття рішень**. Завдяки ГІС та системам моніторингу керівники отримують *цілісну картину* стану інфраструктури. Це означає, що рішення про ремонт чи інвестиції ґрунтуються на актуальних даних, а не на інтуїції чи застарілій інформації. Наприклад, цифровий двійник дороги може змодельовати наслідки підвищення навантаження фур на покриття – і керівництво отримає наочний прогноз, де можуть з'явитися руйнування, щоб вжити заходів на випередження [137]. Сучасні ГІС дозволяють інтегрувати різномірну інформацію (геодані, фінансові показники, трафік, погодні умови тощо) в єдиному просторі, що значно підвищує **якість аналізу**. Як відзначають в CDOT, **візуалізація великих обсягів даних** на картах допомагає виявляти тренди і перетворювати “сірі” дані на корисні інсайти для дій [31]. Відповідно, рішення ухвалюються швидше – замість багатотижневих узгоджень і паперового листування дані доступні миттєво і зрозумілі всім

залученим сторонам. Це особливо критично в кризових ситуаціях: військові дії, стихійні лиха.

Безпека і надійність інфраструктури теж зростають. Системи моніторингу на основі датчиків і ГІС здатні цілодобово стежити за критичними об'єктами – мостами, тунелями, шляхопроводами. Це дає можливість рано виявляти небезпечні тенденції (просідання опори, тріщини, перевищення вібрацій) і завчасно проводити ремонт, запобігаючи аваріям. Дослідження з моніторингу тунелів відзначають, що впровадження постійного контролю стану конструкцій **підвищує надійність і безпеку експлуатації, зменшує ризик катастроф** і одночасно знижує витрати на ремонт за рахунок профілактики [140]. Крім того, цифрові технології сприяють підвищенню **культури безпеки**: наприклад, публічні додатки, що показують в реальному часі стан доріг (затори, аварії), впливають на поведінку водіїв, роблять їх більш обачними або допомагають обрати безпечніший маршрут.

Не менш важливий ефект – **інституційний розвиток і міжнародна інтеграція**. Впроваджуючи сучасні ГІС та відкриті дані, українські установи підвищують свою спроможність працювати за світовими стандартами. Формуються нові навички у персоналу (робота з даними, аналітика, ІТ-рішення), змінюється організаційна культура на більш прозору і орієнтовану на результат. До того ж, використання міжнародних стандартів (OCDS, INSPIRE тощо) полегшує співпрацю з донорами і сусідніми країнами – дані та підходи стають “однією мовою”. Як результат, цифровізація створює **довгострокову основу для сталого розвитку** дорожньої галузі. Вона не лише змінює поточні процеси, а й слугує передумовою для економічної ефективності, швидкого реагування на виклики та інновацій у майбутньому.

4.4 Рекомендації для стратегічного використання ГІС у менеджменті

На основі проведеного аналізу можна сформулювати низку рекомендацій щодо ефективного впровадження цифрових технологій (зокрема ГІС) у дорожньо-інфраструктурні проєкти для органів влади та комунальних підприємств України.

Ці рекомендації охоплюють стратегічний рівень планування, практичні кроки впровадження та використання міжнародного досвіду:

- **Розробити єдину стратегію цифровізації дорожньої інфраструктури.** На національному рівні доцільно затвердити комплексну стратегію або дорожню карту, що визначає бачення та етапи цифрової трансформації галузі. Така стратегія має враховувати створення цілісної **системи управління дорожніми даними** – від збору інформації (інвентаризації доріг) до впровадження цифрових двійників і аналітичних панелей. Важливо визначити пріоритети: які підсистеми впроваджувати першочергово (наприклад, ГІС-реєстр доріг, система моніторингу мостів), а також забезпечити ресурсами їх реалізацію. Стратегічне бачення повинно узгоджуватися з загальною цифровою політикою держави (наприклад, зі стратегіями цифрового розвитку Мінцифри) та враховувати повоєнні реалії – потребу в швидкому відновленні та потенціал залучення міжнародної допомоги.

- **Інтегрувати ГІС у всі етапи життєвого циклу дорожніх проєктів.** ГІС здатні стати основою для роботи з дорожньою інфраструктурою на всіх фазах – планування, проєктування, будівництва, експлуатації і ремонту. Рекомендується:

- На етапі **планування** нових доріг чи реконструкції – використовувати ГІС для аналізу місцевості, трафіку, екологічних обмежень. Інтеграція ГІС із BIM допоможе створювати 3D-моделі проєктів, оцінювати різні сценарії (об'їзди, розв'язки) і прогнозувати вплив на довкілля та економіку громади.
- На етапі **тендерів і підготовки** – вимагати від підрядників подання необхідних геоданих (траси, точки підключення, геологія) в електронному вигляді. Всі проєктні документи доцільно зберігати в централізованій електронній системі, пов'язаній з ГІС (як планує DREAM [141]), щоб відповідальні особи мали швидкий доступ до актуальних креслень та кошторисів.
- Під час **будівництва** – використовувати цифрові інструменти контролю: дрони для моніторингу прогресу робіт, датчики на техніці для відстеження витрат матеріалів, мобільні додатки для інженерів технагляду, прив'язані

до ГІС (щоб кожне зауваження мало геолокацію). Це підвищить точність контролю і створить цифровий слід реалізації проєкту.

- У фазі **експлуатації** – впровадити **системи моніторингу стану** доріг і штучних споруд. Сенсори (навантажеміри, датчики температури, вологості в покритті, GPS-трекери на дорожній техніці) мають передавати дані до єдиного центру. На базі ГІС-дашбордів диспетчери та інженери будуть бачити в режимі реального часу стан мережі: де утворилась яма, де перевищено навантаження, де потрібна снігоочистка. Такі рішення вже реалізуються в США та ЄС і довели ефективність [31]. Варто започаткувати пілотні проєкти й в Україні, наприклад, на найбільш завантажених магістралях чи мостах.

- На етапі **ремонтів і утримання** – використовувати **прогнозну аналітику**. На основі зібраних великих даних (Big Data) про стан покриття, трафік і ремонти за минулі роки можна з допомогою ШІ прогнозувати, які ділянки потребуватимуть ремонту наступного сезону, і завчасно планувати бюджет. Рекомендується впровадити практику складання середньострокових планів ремонту за допомогою ГІС-аналізу, щоб оптимізувати графік робіт і мінімізувати простої руху.

- **Забезпечити сумісність та стандарти даних.** Для успішної цифровізації всі залучені системи повинні “розмовляти однією мовою”. На практиці це означає впровадження **єдиних стандартів даних** і класифікаторів у дорожній галузі. Необхідно розробити та затвердити стандартизовані формати для геопросторових даних про дороги (наприклад, структура дорожнього паспорту в ГІС), для даних про проєкти (структура запису про контракт, хід виконання тощо) та інтегрувати їх з вже існуючими державними стандартами. Тут доцільно орієнтуватися на міжнародні напрацювання: в геоданих – на згадану директиву INSPIRE (що регламентує моделі даних для транспортних мереж у ЄС), в даних про проєкти – на стандарт CoST IDS (Infrastructure Data Standard) та OCDS. Використання цих стандартів в Україні вже почалося (CoST портал, DREAM) [141 , 139], тому завдання – розширити його на всі рівні. Комунальним підприємствам варто

адаптувати свої внутрішні системи (якщо вони є) до цих стандартів, щоб у майбутньому безперешкодно передавати дані в національні бази. Сумісність даних також означає інтеграцію різних інформаційних ресурсів: реєстрів майна, фінансових систем, систем керування трафіком. Рекомендується на рівні міністерства розбудувати централізовану **платформу-«шину» обміну даними**, через яку різні відомчі та місцеві системи зможуть підключатися і обмінюватися інформацією. Це зніме проблему розрізнених “острівців цифровізації” і об’єднає все в єдину екосистему.

• **Навчання кадрів та організаційна підготовка.** Впровадження навіть найсучаснішого програмного забезпечення не дасть ефекту, якщо персонал не вмітиме ним користуватися або не розумітиме цінності нових підходів. Тому необхідно інвестувати в **підготовку фахівців** на всіх рівнях – від керівників департаментів до інженерів-операторів ГІС. Рекомендується:

- Проводити регулярні тренінги і семінари для держслужбовців і працівників комунальних підприємств з тематики ГІС, баз даних, аналітики даних. В Україні вже були тренінги CoST для облдержадміністрацій щодо відкриття даних [139] – цю практику слід розширити і зробити постійною.
- Співпрацювати з вищими навчальними закладами для підготовки нової генерації спеціалістів з транспортної інженерії з ІТ-компетенціями. Ввести спеціальні курси або навіть освітні програми на перетині дорожнього господарства та цифрових технологій (ГІС-менеджмент в інфраструктурі, тощо).
- Мотивувати працівників до освоєння нових інструментів – можливо, через включення КРІ щодо якості даних або успішності впровадження ІТ-рішень. Також важливо підтримувати **культуру даних**: рішення мають прийматися на основі даних, і працівники повинні це усвідомлювати та довіряти цифровим системам.
- Переглянути внутрішні процеси і інструкції з урахуванням цифровізації. Наприклад, якщо впроваджується електронний журнал обліку дорожніх

дефектів у ГІС, то потрібно офіційно затвердити, що цей електронний запис є підставою для планування ремонту, замість паперових актів. Тобто, **нормативне поле** має підлаштуватися під цифрові інновації, щоб вони були юридично значимими і обов’язковими до використання.

• **Пілотні проєкти та масштабування.** Для комунальних підприємств, які лише починають шлях цифровізації, варто стартувати з пілотів. Наприклад, вибрати окреме місто чи район і впровадити там ГІС-рішення: цифрову карту дорожньої мережі зі всіма характеристиками, модуль для звернень громадян про ями, дашборд для контролю виконання ремонтів. На основі пілоту оцінити результати (скільки часу зекономлено, які проблеми виникли), допрацювати систему. Успішні пілоти слід **масштабувати** на інші регіони. При цьому важливо забезпечити фінансування: закладати кошти на ІТ-розвиток у дорожніх фондах, залучати гранти. Міжнародні партнери (Світовий банк, ЄІБ, USAID) часто підтримують проєкти з розвитку інфраструктури – варто включати компонент цифровізації в заявки на таке фінансування. Наприклад, в рамках кредиту на ремонт дороги передбачити субпроєкт зі створення ГІС-моделі цієї дороги та навчання персоналу її підтримувати.

• **Використання міжнародного досвіду та партнерств.** Українським інституціям не потрібно «винаходити колесо» наново – натомість слід активно переймати найкращі практики інших країн. Рекомендується:

- **Консультації та обмін досвідом** з колегами з ЄС, США, інших країн. Організувати стажування для українських фахівців у транспортних агентствах, які вже впровадили цифрові двійники чи розумні системи керування рухом. У світі існують професійні спільноти, конференції з транспортної ІТ – участь у них дасть змогу бути в курсі новітніх тенденцій.
- **Адаптація готових рішень.** Багато ІТ-рішень для інфраструктури доступні на ринку: від платформ від великих вендорів (Esri, Bentley, Hexagon) до відкритого програмного забезпечення. Треба проаналізувати, що підходить під українські потреби, і адаптувати – можливо, зі створенням локалізованого інтерфейсу, підтримкою української мови

тощо. Наприклад, існують **модулі ГІС для дорожніх активів**, які можна налаштувати під стандарти Укравтодору, замість розробки з нуля.

- **Співпраця у рамках ініціатив.** Продовжувати і розширювати участь України в міжнародних ініціативах прозорості та цифровізації. CoST вже приніс користь – варто його продовжити і інтегрувати повністю в систему управління дорогами. Аналогічно, партнерство з Open Contracting Partnership (яке є співтворцем DREAM) слід підтримувати для успішного запуску цієї екосистеми [141]. В рамках **Open Government Partnership** виконувати взяті зобов'язання по цифровій відбудові [141]. Це підвищує довіру донорів і гарантує методичну підтримку.

- **Фокус на кібербезпеці та надійності систем.** Міжнародний досвід, на жаль, містить і уроки про вразливість цифрових систем. Тому українським відомствам слід приділити увагу захисту даних: убезпечити ГІС та бази від кібератак, забезпечити резервне копіювання інформації, особливо в умовах війни. Звернутися по консультацію до країн, що мають успішні кейси кіберзахисту транспортної інфраструктури (Ізраїль, Естонія). В цьому контексті створення системи «Digital Road» саме під егідою центру кібербезпеки є правильним кроком. У сучасних умовах кіберзахист геопросторових даних набуває стратегічного значення, стаючи не лише технічним завданням, але й ключовим елементом національної безпеки [142]. Для забезпечення їх захисту необхідно впроваджувати комплексні механізми безпеки, які включають:

- Шифрування даних – застосування сучасних криптографічних алгоритмів для захисту як збережених, так і передаваних даних.
- Багаторівневий доступ – впровадження систем аутентифікації, зокрема багатофакторної (MFA), що обмежує доступ до чутливих даних лише для авторизованих користувачів.
- Моніторинг і виявлення загроз – використання спеціалізованих інструментів для постійного контролю активності та оперативного виявлення підозрілих дій.

- Резервне копіювання – регулярне створення резервних копій геопросторових даних з обов’язковим зберіганням у фізично або логічно відокремлених захищених середовищах.
- Навчання персоналу – підготовка співробітників до виявлення кіберзагроз, включаючи фішинг, та дотримання вимог політики безпеки.
- Нормативно-правове регулювання – розробка стандартів кібербезпеки з урахуванням міжнародного досвіду та адаптація їх до вітчизняних умов для організацій, які працюють з геопросторовими даними.
- Інвестиції у кібербезпеку в цьому напрямі є запорукою стійкості інфраструктурних проєктів і зниження ризиків, пов’язаних з порушенням цілісності або конфіденційності даних [143]

• **Залучення громадськості і прозорість.** Рекомендується продовжувати курс на відкритість даних. Комунальним підприємствам слід не боятися публікувати інформацію про свою діяльність (плани ремонтів, використання коштів) на відкритих платформах. Це не лише підвищує довіру громади, але й створює зовнішній стимул працювати ефективніше. Варто впроваджувати зручні сервіси для громадян: мобільні додатки або веб-карти, де можна переглянути, які дороги заплановані до ремонту цього року, де зараз йдуть роботи, куди звернутись щодо ям на дорозі тощо. Такий двосторонній цифровий зв’язок між владою і громадою підсилить взаєморозуміння і дозволить оперативно виявляти проблеми. Міжнародні партнери відзначають, що **єдиний цифровий простір** для всіх учасників (влада, бізнес, громадяни) є запорукою успішного розвитку інфраструктури [137]. Тому курс на відкриті дані та публічні дашборди треба продовжувати і після перемоги та відбудови.

Підсумовуючи, впровадження ГІС та інших цифрових технологій у дорожню галузь України має відбуватися системно і з урахуванням кращих світових стандартів. Це стратегічна інвестиція, яка окупиться прискоренням розвитку інфраструктури та економії ресурсів у майбутньому. **Цифровізація дорожньо-інфраструктурних проєктів не лише змінює традиційні підходи до управління, але й стає важливою передумовою економічної ефективності, оперативності та**

сталого розвитку транспортної системи. Застосування ГІС, аналіз даних та прозорі платформи допоможуть Україні швидше відновити зруйновані дороги, будувати нові якісні автошляхи та інтегруватися у глобальну транспортну мережу ХХІ століття.

Висновок до четвертого розділу

У четвертому розділі дисертаційного дослідження було проведено практичну апробацію та оцінку ефективності запропонованих моделей і методів цифровізації дорожньо-інфраструктурних проєктів. Аналіз практичного впровадження ГІС в Україні підтвердив загальнодержавну тенденцію до цифровізації, що реалізується через такі ініціативи, як система "Digital Road", інтерактивна мапа Укравтодору та платформи для моніторингу післявоєнного відновлення DREAM і ONOVA GIS Hub.

Ключовим етапом практичної частини дослідження стала діагностика рівня цифрової зрілості на прикладі профільного підрозділу КП «Центр організації дорожнього руху» м. Києва – Служби дислокації ТЗРДР. За допомогою розробленого в дисертації індексу цифрової зрілості (DMI) було проведено комплексну оцінку, яка показала дуже високий інтегральний результат – 90.88 балів. Цей показник свідчить про передовий рівень впровадження технологій ($TAL = 25$), високу якість та доступність даних ($DQA = 21.88$) і надзвичайно значний економічний ефект від цифровізації ($EI = 25$), що підтверджується кардинальним зростанням продуктивності праці (до 200%) та скороченням операційних витрат. Водночас діагностика виявила ключову зону для подальшого розвитку – кадровий потенціал ($SCL = 19$), де спостерігається дефіцит фахівців та відсутність системних програм навчання.

На основі проведеної діагностики та підтвердженого високого рівня цифрової готовності підприємства було змодельовано шляхи подальшого підвищення ефективності управління через впровадження комплексу аналітичних інструментів, розроблених у другому розділі. Запропоновано практичне застосування моделей для оптимізації маршрутів моніторингу, проактивного прогнозування ризиків ДТП, аналізу просторової концентрації дефектів та оптимізації розподілу ресурсів.

Узагальнюючи, результати четвертого розділу підтвердили практичну значущість та ефективність розробленого інструментарію. Апробація на базі профільного комунального підприємства не лише довела дієвість запропонованих підходів, а й дозволила надати конкретні рекомендації для стратегічного використання ГІС, що сприятиме переходу від фіксації даних до їх глибокого аналізу, прогнозування та оптимізації управлінських рішень в умовах обмежених ресурсів.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

За результатами дисертаційного дослідження, можна зробити наступні висновки:

- Узагальнено теоретико-методологічні засади цифровізації дорожньо-інфраструктурних проєктів, що дозволило виявити ключові тенденції, зокрема перехід до гібридних методологій управління та інтеграцію технологій ГІС, BIM та IoT. Систематизовано основні бар'єри на шляху цифрової трансформації в Україні (фінансові, технічні, організаційно-кадрові, нормативно-правові), що сформувало підґрунтя для розробки прикладних рішень.

- Розроблено концептуальну модель цифрового менеджменту дорожньо-інфраструктурних проєктів, яка, на відміну від існуючих, базується на принципі динамічного цифрового двійника та забезпечує комплексну інтеграцію різномірних просторових і атрибутивних даних у єдину інформаційну платформу.

- Удосконалено метод управління дорожньо-інфраструктурними проєктами, який, на відміну від традиційних підходів, реалізує проактивний, аналітично орієнтований підхід (data-driven) завдяки наскрізній інтеграції ГІС на всіх етапах життєвого циклу проєкту, що забезпечує безперервність проєктних даних (digital thread).

- Розроблено комплекс аналітичних моделей для підтримки прийняття управлінських рішень, що включає: оптимізаційні моделі планування ресурсів, прогностичні моделі для оцінки технічного стану інфраструктури та інтенсивності транспортних потоків, імовірнісні моделі для оцінки ризиків ДТП, а також моделі просторової кластеризації для виявлення зон концентрації дефектів.

- Запропоновано та обґрунтовано індекс цифрової зрілості (Digital Maturity Index, DMI) як інтегральний інструмент для комплексної діагностики та порівняльної оцінки організацій дорожньої галузі за чотирма критеріями: рівень впровадження технологій (TAL), якість і доступність даних (DQA), кваліфікація персоналу (SCL) та економічний ефект (EI).

- Проведено комплексну діагностику цифрової зрілості на прикладі Служби дислокації ТЗРДР КП «Центр організації дорожнього руху», за результатами якої розраховано індекс DMI, що склав 90.88 балів. Це підтвердило високий рівень цифрової зрілості підрозділу, значний економічний ефект від впровадження цифрових рішень та дозволило ідентифікувати зони для подальшого розвитку.

- Розроблено практичні рекомендації для органів державної влади та комунальних підприємств щодо стратегічного використання ГІС, впровадження єдиних стандартів даних, розвитку кадрового потенціалу та масштабування успішних цифрових практик в умовах повоєнного відновлення України.

Практичне значення отриманих результатів полягає у тому, що розроблені моделі, методи та рекомендації можуть бути використані органами державної влади та комунальними підприємствами при реалізації проєктів цифровізації дорожньої інфраструктури. Застосування запропонованого інструментарію сприяє підвищенню обґрунтованості управлінських рішень, оптимізації використання ресурсів та посиленню прозорості, що є особливо актуальним в контексті реалізації положень Національної транспортної стратегії України та Закону України «Про національну інфраструктуру геопросторових даних».

Практичне значення підтверджується апробацією результатів дослідження у виробничій діяльності Служби дислокації технічних засобів регулювання дорожнього руху КП «Центр організації дорожнього руху» (м. Київ) при виконанні таких завдань, як: планування маршрутів моніторингу з використанням ГІС, розробка та підтримка структури геопросторової бази даних, цифрова обробка результатів обстежень, підготовка навчальних матеріалів для персоналу та участь у створенні веб-модуля для обліку архівної документації. Ефективність запропонованих підходів підтверджена значним скороченням часу виконання операційних завдань та підвищенням точності й доступності проєктних даних. Також практичне значення результатів підтверджується 3 свідоцтвами про реєстрацію авторського права на твір та публікаціями автора.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Звіт про прямі збитки інфраструктури від руйнувань внаслідок військової агресії Росії проти України станом на листопад 2024 року. Київ : Kyiv School of Economics, 2024. 28 с. URL: https://kse.ua/wp-content/uploads/2025/02/KSE_Damages_Report-November-2024-UA.pdf (дата звернення: 11.03.2025).
2. Бушуєв С.Д, Веренич О.В., Терейковська Л.О., Войтенко О.С. (2023). Інфраструктурні проекти організації дорожнього руху: вибір методології управління. Управління розвитком складних систем. 2023. №56. С. 24–30.
3. Войтенко, О. С., Васильєв, І. А. (2024). Упровадження проектного підходу при модернізації комунального підприємства у сфері організування дорожнього руху під час повоєнної відбудови громади. Управління розвитком складних систем. 2024. № 60. С. 33–43. DOI: <https://doi.org/10.32347/2412-9933.2024.60.33-43>.
4. Бушуєва Н. С., Черниш О. В. (2023). Менеджмент проектів сталого розвитку неприбуткових організацій в ризиковому оточенні. Управління розвитком складних систем. 2023. № 55. С. 12–17. DOI: <https://doi.org/10.32347/2412-9933.2023.55.12-17>
5. Захарчишин С.В., Зачко О.Б. (2024). Футурологічні засади управління інфраструктурними проектами в умовах воєнного стану. Вісник Львівського державного університету безпеки життєдіяльності, 30, 220-228. URL: <https://sci.ldubgd.edu.ua/jspui/handle/123456789/15441>
6. Гончаренко Т. А. Сучасні інформаційні технології для моделювання міського середовища та розробки цифрових двійників міських об'єктів. Управління розвитком складних систем. 2022. № 5. С. 87–93. DOI: <https://doi.org/10.32347/2412-9933.2022.51.87-93>
7. Buuveibaatar M, Shin S, Lee W. Digital Twin Framework for Road Infrastructure Management. Applied Sciences. 2025. № 15:5765. DOI: <https://doi.org/10.3390/app15105765>.

8. Yan Y., et al. Digital Twin Enabling Technologies for Advancing Road Engineering and Lifecycle Applications / Y. Yan та ін. Engineering. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eng.2024.12.017>.

9. Pavard A., Dony A., & Bordin P. Road modelling for infrastructure management – the efficient use of geographic information systems. Journal of Information Technology in Construction (ITcon). 2023. № 28. 438-45.

10. Mihaylenko V., Honcharenko T., Chupryna K., Liazschenko T. Integrated Processing of Spatial Information based on Multidimensional Data Models for General Planning Tasks. International Journal of Computing. 2021. № 20. С. 55-62 DOI: <http://dx.doi.org/10.47839/ijc.20.1.2092>.

11. Honcharenko T., Ryzhakova G., Borodavka Y., Ryzhakov D., Savenko V., Polosenko O. Method for Representing Spatial Information of Topological Relations Based on a Multidimensional Data Model. ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2021. № 16 (7). С. 802-809.

12. Trunov O., Skiter I., Dorosh M., Trunova E., Voitsekhovska M. Modeling of the Information Security Risk of a Transport and Logistics Center Based on Fuzzy Analytic Hierarchy Process. In: Kazymyr, V., et al. Mathematical Modeling and Simulation of Systems. MODS 2023. Lecture Notes in Networks and Systems, vol. 1091. Springer, Cham. 2024. С. 306-322. DOI: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-031-67348-1_23.

13. Trunov O., Dorosh M., Skiter I., Trunova E., Voitsekhovska M. Simulation of Strategies for Providing Information Security of the Transport and Logistics Center Based on Fuzzy Logic Methods. In: Kazymyr, V., et al. Mathematical Modeling and Simulation of Systems. MODS 2024. Lecture Notes in Networks and Systems, vol. 1391. Springer, Cham. 2025. С. 262-281. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-90735-7_2.

14. Voitsekhovska M., Dorosh M., Grechaninov V., Verenych O. Functional modeling of the organization's information security culture state monitoring system development. Herald of Advanced Information Technology. 2022. № 5 (4). С. 297-308. DOI: <https://doi.org/10.15276/hait.05.2022.22>.

15. Bushuyev S., Bushuyeva N., Bushuieva V., & Bushuiev D. The Architecture of Dynamic Integrated Intelligence Model for Managing Innovation Projects. Scientific Journal of Astana IT University. 2023. № 13. С. 103–116. DOI: <https://doi.org/10.37943/13ZXMG1447>.

16. Bushuev S., Bushueva N., Bushuev D., & Ilin O. Evaluation of an organization's capacity for innovation using the Theory of Inventive Problem Solving (TRIZ) in AI environment. Transfer of Innovative Technologies. 2025. № 7 (2). С. 57–67 DOI: <https://doi.org/10.32347/tit.2024.7.2.02.07>.

17. Zachko O., Demchyna V., Zachko I. Intellectual Models of Projects for the Development of Transport Infrastructure of Urban Territorial Systems. Proceedings of the 3rd International Workshop IT Project Management (ITPM 2022). Conference. Kyiv, Ukraine, August 26. 2022. С. 159-169. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-3295/paper15.pdf>.

18. Verenych O., Boiko Y., & Voitenko O. Approaches to assessing the sustainability of territorial communi-ties. Transfer of Innovative Technologies. 2024. № 7 (2). С. 40–50. DOI: <https://doi.org/10.32347/tit.2024.7.2.01.05>

19. Vozniuk A. Use of the geographic information system of ukrainian roads (gis) to optimize road management in the lack of financial resource. 26th World Road Congress, м. Abu Dhabi, 10.10.2019. URL: https://www.researchgate.net/publication/362694835_USE_OF_THE_GEOGRAPHIC_INFORMATION_SYSTEM_OF_UKRAINIAN_ROADS_GIS_TO_OPTIMIZE_ROAD_MANAGEMENT_IN_THE_LACK_OF_FINANCIAL_RESOURCE.

20. Сизоненко В.В., Рибіцький Л.Л. Тенденції розвитку управління дорожнім господарством на основі новітніх світових геоінформаційних технологій. Дорожня галузь України. 2008. № 3. с. 62с63.

21. Рибіцький Л.Л., Харченко Г.А. Геоінформаційна система управління автомобільними дорогами України – на допомогу водіям. Дорожня галузь України. 2010. № 1. с. 49–52.

22. Тимощук О.Ю., Рахуба О.І. Впровадження геоінформаційних технологій для удосконалення процесу управління автомобільними дорогами. Автомобільні дороги. 2015. № 5. С. 44-46.

23. Особливості використання геоінформаційних технологій під час паспортизації автомобільних доріг / Ряпухін В.М та ін. Вчені записки Таврійського Національного Університету Імені В.І. Вернадського. 2019. Т. 30, № 2. С. 227. URL: https://tech.vernadskyjournals.in.ua/journals/2019/2_2019/part_2/37.pdf.

24. Пальчик А.М., Савчук С.О. Використання GPS-технологій при вишукуванні та паспортизації автомобільних доріг. Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. 2013. 90. с. 12-19.

25. Тімінський О., Войтенко О., & Райчук, І. Аналіз моделей і методів діджиталізації бізнес-процесів. Управління розвитком складних систем. 2021. № 46. С. 38–47. DOI: <https://doi.org/10.32347/2412-9933.2021.46.38-47>

26. Ruslana Sodoma, Maryana Kohut., et al. Management of digitization of infrastructure projects and programs. ITPM 2024: Proceedings of the 5th International Workshop IT Project Management, May 22. 2024. Bratislava, Slovakia.

27. S. Bushuyev, O. Verenych. The Blended Mental Space: Mobility and Flexibility as Characteristics of Project/Program Success. 2018 IEEE 13th International Scientific and Technical Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT), Lviv, Ukraine. 2018. pp. 148-151, DOI: 10.1109/STC-CSIT.2018.8526699.

28. A. Tryhuba, R. Ratushny, I. Tryhuba, N. Koval, I. Androshchuk. The Model of Projects Creation of the Fire Extinguishing Systems in Community Territories. Acta Univ. Agric. Silvic. Mendel.Brun. 2020. pp. 419–431.

29. N. Kovalchuk, O. Zachko, O. Kovalchuk and D. Kobylkin. Project Management of the Information System for the Selection of Project Teams. 2023 IEEE 12th International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS), Dortmund, Germany, 2023, pp. 1054-1057, DOI: 10.1109/IDAACS58523.2023.10348656

30. Ложачевська О. М., Марціпака В. М. (2023). Інноваційний розвиток транспортного комплексу в умовах цифрової трансформації. Проблеми сучасних трансформацій. Серія: економіка та управління. 2023. № 10. DOI: <https://doi.org/10.54929/2786-5738-2023-10-04-10>.

31. CDOT Improves Safety and Journey Experience of Travelers. GIS Software for Mapping and Spatial Analytics | Esri. URL: <https://www.esri.com/en-us/landing-page/industry/transportation/2019/cdot-case-study> (дата звернення: 22.04.2025).

32. GIS and Digital Twins are Crucial Building Blocks for Renewing US Infrastructure. Highways Today. URL: <https://highways.today/2021/11/05/gis-digital-infrastructure/> (дата звернення: 03.02.2025).

33. Building Information Modeling (BIM) for Infrastructure Overview. Federal Highway Administration. URL: <https://web.archive.org/web/20250120100825/https://highways.dot.gov/research/research-programs/infrastructure/building-information-modeling-bim-infrastructure-overview> (дата звернення: 03.02.2025).

34. Smart Mobility Framework. Caltrans. URL: <https://dot.ca.gov/programs/transportation-planning/division-of-transportation-planning/complete-streets/smart-mobility-framework> (дата звернення: 07.02.2025).

35. Транспортні тенденції в національних планах економічного відновлення та стійкості. European Parliament. URL: [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2021/698765/EPRS_BRI\(2021\)698765_XL.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2021/698765/EPRS_BRI(2021)698765_XL.pdf) (дата звернення: 18.02.2025).

36. May I., Taylor M., Irwin D. Crossrail: A Case Study in BIM. ETH Zurich. URL: https://web.archive.org/web/20240216213620/https://ethz.ch/content/dam/ethz/special-interest/baug/igt/tunneling-dam/kolloquien/2016/May_Crossrail_BIM_Implementierung_ohne_Risiko.pdf (дата звернення: 10.02.2025).

37. Bernhardsson V. Report Representation of the Swedish transport and logistics system in Samgods 1.2.2. Borlänge : Traficvervet, 2024. 97 p. URL: <https://bransch.trafikverket.se/contentassets/ab220f9016154ef7a8478555560bb280/2024/representation-of-the-swedish-transport-and-logistics-system-in-samgods-1.2.2.pdf> (дата звернення: 04.03.2025).

38. Anas Smart Road. Carlo Ratti Associati. URL: <https://carlorattiassociati.com/project/anas-smart-road/> (дата звернення: 10.02.2025).

39. Hong A.-reum2025. AI optimizes traffic signals, reduces congestion on South Korean roads. CHOSUNBIZ. URL: <https://biz.chosun.com/en/en-science/2025/01/27/2NREOOUXE5H3BOHTFUK7XMQ3RE/> (дата звернення: 10.02.2025).

40. Hightopo. Digital Twin Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge: Integrated Management Information System for Greater Bay Area. SegmentFault. URL: <https://segmentfault.com/a/1190000041379952/en> (дата звернення: 13.02.2025).

41. S. Danshyna та ін. Geoinformation technologies for engineering and geodetic surveys in the modernisation of railway infrastructure in Ukraine. Innovative technologies and scientific solutions for industries. 2024. № 4(30). С. 39–58. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2024.4.039> (дата звернення: 03.02.2025).

42. Мироненко О. Інноваційні технології у транспортній логістиці: перспективи та виклики. Транспортная компания Cargofy.ua: Услуги перевозки автотранспортом в Украине. URL: <https://cargofy.ua/uk/blog/innovaciini-tehnologiji-u-transportnii-logistici-perspektivi-ta-vikliki> (дата звернення: 08.02.2025).

43. Цифрова адженда України – 2020 («Цифровий порядок денний» – 2020). Концептуальні засади (версія 1.0). Першочергові сфери, ініціативи, проекти «цифровізації» України до 2020 року : Проект. NITECH office, 2016. 90 с. URL: <https://uccci.org.ua/uploads/files/58e78ee3c3922.pdf> (дата звернення: 12.02.2025).

44. Доля К. В., Доля я. О. Є. Геоінформаційні системи на транспорті : навчальний посібник. Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2018. 230 с. URL: <https://eprints.kname.edu.ua/47564/1/2017%20печ.%204Н.pdf> (дата звернення: 11.02.2025).

45. Boiko O., Lyashenko D., Prusov D. Концептуальні засади BIM/GIS інтеграції геопросторових даних аеропортів, отриманих лазерним скануванням. Technical sciences and technologies. 2019. № 4(18). С. 238–246. URL: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2019-4\(18\)-238-246](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2019-4(18)-238-246) (дата звернення: 03.02.2025).

46. Результати поточного моніторингу (піврічний/річний) проекту (програми) «Інституційна підтримка в рамках архітектури підтримки реформ в Україні – Команди підтримки реформ». Громадська спілка «Фонд підтримки реформ в

Україні». URL: https://fsr.org.ua/sites/default/files/reports/2024-11/pivrichnyy_monitoring_proektu_2019_rst_1.pdf (дата звернення: 15.02.2025).

47. Марченко В.Б. поняття та правове забезпечення цифрової трансформації в Україні. Юридичний науковий електронний журнал. 2019. № 6. С. 279-282. DOI: <https://doi.org/10.32782/2524-0374/2019-6/66>.

48. Дресвянніков А. На шляху до єдиного цифрового ринку ЄС: Довірчі послуги : Дослідження. ГО «Укр. центр європ. політики», 2021. 35 с. URL: https://ucerp.org.ua/wp-content/uploads/2021/07/ucerp_report_trust_service__6.06.2021.pdf (дата звернення: 11.02.2025)

49. Повоєнне відновлення України. Нові ринки та цифрові рішення / Н. Шаповал та ін. Kyiv School of Economics - Kyiv School of Economics. URL: <https://kse.ua/wp-content/uploads/2022/09/Digital-instruments-in-Ukrainian-recovery.pdf> (дата звернення: 14.02.2025).

50. М-во інфраструктури України. Європа підтримає Україну у післявоєнному відновленні інфраструктури. Урядовий портал. URL: <https://www.kmu.gov.ua/news/evropa-pidtrimaye-ukrayinu-u-pislyavoyennomu-vidnovlenni-infrastrukturi> (дата звернення: 09.02.2025).

51. Проєкт «Підтримка цифрової трансформації» 2023-2028. Eurasia Foundation. URL: <https://www.eurasia.org/project/digital-transformation-activity-ua/> (дата звернення: 11.02.2025).

52. Цифрова трансформація економіки України у воєнний час. Грудень 2024 року. Національний Інститут Стратеїчних Досліджень. URL: <https://niss.gov.ua/news/komentari-ekspertiv/tsyfrova-transformatsiya-ekonomiky-ukrayiny-u-voyennyy-chas-hruden-2024> (дата звернення: 10.02.2025).

53. Огляд заходів щодо цифрової трансформації та відновлення економічного розвитку України в умовах війни. Національний Інститут Стратеїчних Досліджень. URL: <https://niss.gov.ua/news/komentari-ekspertiv/ohlyad-zakhodiv-shchodo-tsyfrovoyi-transformatsiyi-ta-vidnovlennya> (дата звернення: 10.02.2025).

54. Цифрова екосистема для підзвітнього управління відновленням. DREAM. URL: <https://dream.gov.ua/ua> (дата звернення: 10.02.2025).

55. Copernicus. URL: <https://www.copernicus.eu/en> (дата звернення: 10.02.2025).

56. G. Christou та ін. Design and development of a gis-based platform using open source components for monitoring, maintenance and management of road network: the case study of cyprus The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2021. XLVI-4/W2-2021. С. 37–42. DOI: <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-xlvi-4-w2-2021-37-2021>.

57. Waterfall Methodology. ProjectManager. URL: <https://www.projectmanager.com/guides/waterfall-methodology> (дата звернення: 01.03.2025).

58. Stojadinovic L. Traditional vs. Agile Project Management (Pros & Cons). Nifty Blog | Delivering our thoughts and findings on the future of project management!. URL: <https://niftypm.com/blog/traditional-vs-agile-project-management-pros-cons/> (дата звернення: 11.02.2025).

59. What Is BIM | Building Information Modelling. Autodesk. URL: <https://www.autodesk.com/uk/solutions/bim> (дата звернення: 02.04.2025)

60. What is Scrum?. Scrum.org. URL: <https://www.scrum.org/learning-series/what-is-scrum/> (дата звернення: 09.04.2025).

61. Lean Construction. Lean Construction. URL: <https://leanconstruction.org/lean-topics/lean-construction/> (дата звернення: 10.02.2025).

62. Brown D., Tell J. Lean Construction: Principles, Implementation & Benefits. Procore. URL: <https://www.procore.com/library/lean-construction> (дата звернення: 01.03.2025).

63. Introduction to Jira Workflows. Atlassian. URL: <https://www.atlassian.com/software/jira/guides/workflows/overview#what-is-a-jira-workflow> (дата звернення: 12.02.2025).

64. Manage Tasks in One Shared Space. Trello. URL: <https://trello.com/use-cases/task-management> (дата звернення: 06.02.2025).

65. Mangon N. GIS and BIM integration will transform infrastructure design. Autodesk. URL: <https://www.autodesk.com/design-make/articles/gis-and-bim-integration> (дата звернення: 20.02.2025).

66. McFarland A. 6 Best AI Tools for the Construction Industry (June 2025). Unite.AI. URL: <https://www.unite.ai/best-ai-tools-for-the-construction-industry/> (дата звернення: 31.05.2025).

67. Архітектура професійної діяльності: управління змінами: електронний навчальний курс. / розробник Кравченко Г.Ю. / Біла Церква: БІНПО ДЗВО «УМО» НАПН України, 2023. 55 с.

68. J. J. Сера та ін. Towards bim-gis integration for road intelligent management system. Journal of civil engineering and management. 2023. Т. 29, № 7. С. 621–638. URL: <https://doi.org/10.3846/jcem.2023.19514> (дата звернення: 10.02.2025).

69. Геоінформаційна система регіонального розвитку (ГІС): презентовано тестову версію. DREAM. URL: <https://dream.gov.ua/ua/news/article-34> (дата звернення: 10.02.2025).

70. GIS for Roads & Highways Data & Technology | Break Down Data Silos. GIS Software for Mapping and Spatial Analytics | Esri. URL: <https://www.esri.com/en-us/industries/roads-highways/business-areas/data-technology> (дата звернення: 15.02.2025).

71. Про національну інфраструктуру геопросторових даних : Закон України від 13.04.2020 № 554-IX : станом на 31 груд. 2023 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/554-20#Text> (дата звернення: 14.02.2025).

72. В Україні затвердили Порядок функціонування Національної інфраструктури геопросторових даних. Міністерство економіки України. Міністерство економіки України. URL: <https://me.gov.ua/News/Detail/f68642bf-8b7c-4a45-94d9-176ec5bdab6b> (дата звернення: 16.02.2025).

73. Про топографо-геодезичну і картографічну діяльність : Закон України від 23.12.1998 № 353-XIV : станом на 15 листоп. 2024 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/353-14#Text> (дата звернення: 14.02.2025).

74. Digital Public Administration factsheet 2022 - Ukraine. Interoperable Europe Portal. URL: https://interoperable-europe.ec.europa.eu/sites/default/files/inline-files/DPA_Factsheets_2022_Ukraine_vFinal.pdf (дата звернення: 13.02.2025).

75. Про доступ до публічної інформації : Закон України від 13.01.2011 № 2939-VI : станом на 8 жовт. 2023 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2939-17#Text> (дата звернення: 15.02.2025).

76. Про затвердження Положення про набори даних, які підлягають оприлюдненню у формі відкритих даних : Постанова Каб. Міністрів України від 21.10.2015 № 835 : станом на 1 квіт. 2025 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/835-2015-п#Text> (дата звернення: 14.02.2025).

77. ДСТУ 8774:2018. Географічна інформація. Правила моделювання геопросторових даних. Чинний від 2019-07-01. Вид. офіц. ДП «УкрНДНЦ»). 212 с. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=78080 (дата звернення: 15.02.2025).

78. СОУ 42.1-37641918-063:2016. Геоінформаційна система автомобільних доріг. Вимоги до складу, змісту та застосування. На заміну СОУ 45.2-00018112-063:2011 ; чинний від 2016-03-01. Вид. офіц. Київ : Держ. агентство автомоб. доріг України (Укравтодор), 2016. 66 с. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=63996 (дата звернення: 15.02.2024).

79. Васильєв І., Безшапкін С., Тимченко С. Проекти організації дорожнього руху: питання понятійного апарату та нормативно-правового забезпечення в контексті національної безпеки та оборони країни. Управління розвитком складних систем. 2023. № 56. С. 31–39. DOI: <https://doi.org/10.32347/2412-9933.2023.56.31-39>.

80. Harnessing the Power of Digital Twin in Road Pavement Constructions. Tigernix Australia. URL: <https://tigernix.com.au/blog/digital-twin-road-pavement-constructions> (дата звернення: 22.03.2025).

81. Methods for Addressing Pavement Defects Based on Digital Twin Technology-A Case Study of Snow and Water Accumulation on Road Surface / S. Zhu та ін. E3S Web of Conferences. 2024. Т. 512. С. 04015. URL: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202451204015> (дата звернення: 17.03.2025).

82. Schneider C. Digital Twins – Lessons Learned from the City of Aachen. EU Urban Mobility Observatory. URL: https://urban-mobility-observatory.transport.ec.europa.eu/resources/case-studies/digital-twins-lessons-learned-city-aachen_en (дата звернення: 19.03.2025).

83. Sasaki S., Snider J. Synchronizing Construction Schedules to ArcGIS Enterprise and ArcGIS Online. Industry Blogs Esri. URL: <https://www.esri.com/en-us/industries/blog/articles/synchronizing-construction-schedules-to-arccgis-enterprise-and-arccgis-online> (дата звернення: 07.04.2025).

84. The role of BIM in revolutionising road construction projects. Planning, Building & Construction Today. URL: <https://www.pbctoday.co.uk/news/digital-construction-news/bim-news/revolutionising-road-construction-the-role-of-bim-technology/146277/> (дата звернення: 13.03.2025).

85. Digital Twin Platform. Digital Twin Cities Centre – A Vinnova competence centre. URL: <https://dtcc.chalmers.se/digital-twin-platform/> (дата звернення: 17.04.2025).

86. Smartflow enables digital twin. Triona. URL: <https://www.triona.eu/case/infrastructure/smartflow-enables-digital-twin/> (дата звернення: 18.03.2025).

87. BIM Platform for Infrastructure. Twinfinity. URL: <https://twinfinity.com/en/industry-solutions/infrastructure/trafikverket> (дата звернення: 23.04.2025).

88. Garrido L. Launch of European funding instrument to upscale Digital Twins towards the CitiVerse through Living-in.EU - Eurocities. Eurocities - Home. URL: <https://eurocities.eu/latest/launch-of-european-funding-instrument-to-upscale-digital-twins-towards-the-citiverse-through-living-in-eu/> (дата звернення: 09.03.2025).

89. Global Smart City Global Partnership Program. Towards Developing a Digital Twin and ThreeDimensional Cadaster for Smart Land and Infrastructure Management in Indonesia. World Bank Group. URL: <https://thedocs.worldbank.org/en/doc/cc92982a5764e7a2bde421d357ae8db3-0090012023/original/Indonesia.pdf> (дата звернення: 17.03.2025).

90. Building information modelling review with potential applications in tunnel engineering of China / W. Zhou та ін. Royal Society Open Science. 2017. Т. 4, № 8. С. 170174. URL: <https://doi.org/10.1098/rsos.170174> (дата звернення: 21.03.2025).

91. DeMeritt M. Simplifying Citizen Reporting. GIS Software for Mapping and Spatial Analytics | Esri. URL: <https://www.esri.com/news/arcuser/0111/citysourced.html> (дата звернення: 24.03.2025).

92. Fugro Supports Dutch Roads Maintenance Under 5-Year Survey Contract. GIM International. URL: <https://www.gim-international.com/content/news/fugro-supports-dutch-roads-maintenance-under-5-year-survey-contract-2> (дата звернення: 27.03.2025).

93. Batrakova A., Dorozhko Y., Urdzik S. GEOINFORMATION SUPPORT FOR PAVEMENT'S STATE MANAGEMENT: Array. Municipal economy of cities. URL: <https://khg.kname.edu.ua/index.php/khg/article/view/5348> (дата звернення: 10.03.2025).

94. Y. Huang та ін. A Framework of Life-Cycle Infrastructure Digitalization for Highway Asset Management. Sustainability. 2025. Т. 17, № 3. С. 907. DOI: <https://doi.org/10.3390/su17030907> (дата звернення: 27.04.2025).

95. Esri Industries | GIS Industry Solutions. GIS Software for Mapping and Spatial Analytics | Esri. URL: <https://www.esri.com/en-us/industries/index> (дата звернення: 27.03.2025).

96. Roadworks Solution: City of Amsterdam Case Study. GIS Cloud. URL: <https://www.giscloud.com/blog/roadworks-solution-city-of-amsterdam-case-study/> (дата звернення: 15.03.2025).

97. A modern AI, IoT and analytics platform powered by SAS® Viya® 4 helps Rijkswaterstaat move from reactive to predictive infrastructure maintenance. sas. URL: https://www.sas.com/en_us/customers/rijkswaterstaat.html (дата звернення: 14.03.2025).

98. Building Smart Infrastructure in a Digital Age: Global Innovators : стаття. New York : the science of where, 2013. 19 с. URL: <https://www.esri.com/content/dam/esrisites/en-us/media/ebooks/g1065653-buildingsmartinfrastructure-ebook.pdf> (дата звернення: 15.03.2025).

99. «50». Odessa Journal. URL: <https://odessa-journal.com/public/50-more-wim-complexes-to-appear-on-ukrainian-roads-in-2022> (дата звернення: 08.06.2025).

100. Prahladrao S. Geospatial Information Systems (GIS) for Efficient Transportation Management. Logistics Viewpoints. URL: <https://logisticsviewpoints.com/2024/06/26/gis-for-efficient-transportation-management/> (дата звернення: 09.04.2025).

101. New mobility & road infrastructure : Журнал. International benchmark, 2020. 249 с. URL: https://erf.be/wp-content/uploads/2024/04/ERF_Etude_Benchmark_GB.pdf (дата звернення: 17.03.2025).

102. Antos S. E., Triveno L. M., Jan C. Detecting Urban Clues for Road Safety. Leveraging Big Data and Machine Learning : Методологія. World Bank Group, 2021. 69 с. URL: <https://documents1.worldbank.org/curated/en/099200002152227482/pdf/P170812026cd2b0550асес0ef8165301833.pdf> (дата звернення: 15.03.2025).

103. Cormier C., Proskuryakova T. Crowd-sourcing road condition data can improve transport infrastructure across Central Asia. World Bank Blogs. URL: <https://blogs.worldbank.org/en/europeandcentralasia/crowd-sourcing-road-condition-data-can-improve-transport-infrastructure-across-central-asia> (дата звернення: 08.03.2025).

104. Hernandez M. Visualizing the destruction in Ukraine: A years-long project following satellite clues. Marco Hernandez. URL: <https://mhinfographics.com/2024/06/22/visualizing-the-destruction-in-ukraine-a-years-long-project-following-satellite-clues/> (дата звернення: 20.03.2025).

105. Service R. R. Investigative Group Publishes Map Of Destroyed Civilian Targets In Ukraine. RadioFreeEurope/RadioLiberty. URL: <https://www.rferl.org/a/bellingcat-map-civilians-ukraine/31760848.html> (дата звернення: 19.03.2025).

106. Davis A. How IoT is Revolutionizing Traffic Management on Smart Highways How IoT is Revolutionizing Traffic Management on Smart Highways.

Highways Today. URL: <https://highways.today/2024/10/04/iot-smart-highways/> (дата звернення: 09.03.2025).

107. Jeon W., Kim J., Lee J. A Data-Driven Decision-Making Support Method for Priority Determination for an Intelligent Road Problem Reporting System. *Applied Sciences*. 2024. Т. 14, № 23. С. 10861. URL: <https://doi.org/10.3390/app142310861> (дата звернення: 09.03.2025).

108. Altaweel M. The Role of GIS in Predicting Road Conditions. *Geography Realm*. URL: <https://www.geographyrealm.com/role-gis-predicting-road-conditions/> (дата звернення: 29.03.2025).

109. Kosmidou-Bradley W. K.-B., Belanger J., Gertin T. Roads Data Fusion : Методологія. World Bank Group, 2019. 36 с. URL: <https://datacatalogfiles.worldbank.org/ddh-published/0038019/DR0072169/RoadsDataFusion.pdf> (дата звернення: 11.03.2025).

110. Antos S. E., Triveno L. M., Jan C. How Big Data and Machine Learning Can Strengthen Road Safety. *Development Data Partnership*. URL: <https://datapartnership.org/updates/detecting-urban-clues-for-road-safety/> (дата звернення: 10.03.2025).

111. Тимченко С. Застосування ГІС у менеджменті проєктів безпеки дорожнього руху: аналітичні інструменти та український досвід. *Економіка та суспільство*. 2025. № 74. DOI: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2025-74-55>.

112. Filonenko O. Sustainable development of Ukrainian iron and steel industry enterprises in regards to the bulk manufacturing waste recycling efficiency improvement. *Mining of Mineral Deposits*. 2018. Т. 12, № 1. С. 115–122. URL: <https://doi.org/10.15407/mining12.01.115> (дата звернення: 20.03.2025).

113. ONOVA GIS Hub helps Ukraine with war recovery and reconstruction. GIS Software for Mapping and Spatial Analytics | Esri. URL: <https://www.esri.com/en-us/lg/industry/electric-and-gas/onova-case-study> (дата звернення: 26.03.2025).

114. NHAH Goes 'Fully Digital' With Cloud-Based 'Data Lake' Software. *ClearTax Chronicles*. URL: <https://news.cleartax.in/nhai-goes-fully-digital-with-cloud-based-data-lake-software/4762/> (дата звернення: 23.04.2025).

115. Road Work Management, Field Inspections and Maintenance Using GIS. GIS Cloud. URL: <https://www.giscloud.com/blog/online-gis-in-road-work-inspections-and-maintenance/> (дата звернення: 10.04.2025).

116. Cruz C. O., Sarmiento J. M. Maximizing the value for money of road projects through digitalization. *Competition and Regulation in Network Industries*. 2018. Т. 19, № 1-2. С. 69–92. URL: <https://doi.org/10.1177/1783591718811436> (дата звернення: 14.05.2025).

117. Kaparias I., Bell M. G. H. Key Performance Indicators for traffic management and Intelligent Transport Systems : Програма. 2-ге вид. London : CONDUITS, 2011. 75 с. URL: <https://www.polisnetwork.eu/wp-content/uploads/2019/06/d-3-5-key-performance-indicators-for-traffic-management-and-its-final.pdf> (дата звернення: 07.04.2025).

118. Strategy for Prioritization of Investments, Funding and Modernization of Ukraine's Road Sector : Звіт. World Bank Group, 2018. 109 с. URL: <https://web.archive.org/web/20240524173855/https://documents1.worldbank.org/curated/fr/908121530528798409/pdf/Strategy-for-Prioritization-of-Investments-Funding-and-Modernization-of-Ukraine-s-Road-Sector.pdf> (дата звернення: 10.04.2025).

119. У Мінінфраструктури презентували цифрові інструменти для управління дорожньою галуззю. Укрінформ. URL: <https://www.ukrinform.ua/rubric-economy/3229372-u-mininfrastrukturi-prezentuvali-cifrovi-instrumenti-dla-upravlinna-doroznou-galuzzu.html> (дата звернення: 09.04.2025).

120. A Complete Guide to Digital Maturity Models in 2024. Upcore. URL: <https://www.upcoretech.com/insights/digital-maturity-models/> (дата звернення: 13.04.2025).

121. Aksu H. Digital Maturity Index Explained: All About Business Performance - Digitopia. Digitopia. URL: <https://digitopia.co/blog/digital-maturity-index-explained/> (дата звернення: 02.04.2025).

122. Дорожня галузь «в цифрі». Мінінфраструктури створює нові цифрові інструменти для якісного управління. Міністерство інфраструктури України. URL: <https://mtu.gov.ua/news/32749.html> (дата звернення: 02.03.2025).

123. Білик Ю. Потенціал цифрової трансформації у громадах України. VoxUkraine | «Вокс Україна». URL: <https://voxukraine.org/potentsial-tsyfrovoyi-transformatsiyi-u-gromadah-ukrayiny> (дата звернення: 03.03.2025).

124. Інтерактивна карта ремонту доріг України вже працює. Головна | Рівненська обласна державна адміністрація. URL: <https://www.rv.gov.ua/news/interaktivna-karta-remontu-dorig-ukrayini-vzhe-pracyuye> (дата звернення: 11.02.2025).

125. World Bank Group. Updated Ukraine Recovery and Reconstruction Needs Assessment Released. World Bank. URL: <https://www.worldbank.org/en/news/press-release/2025/02/25/updated-ukraine-recovery-and-reconstruction-needs-assessment-released> (date of access: 27.03.2025).

126. Андрій Івко: "Повне відновлення доріг може тривати 3-4 роки". Центр транспортних стратегій. URL: https://cfts.org.ua/articles/andriy_ivko_povne_vidnovlennya_dorig_mozhe_trivati_3_4_roki_1916 (дата звернення: 22.05.2025).

127. The Most Documented Invasion In History. Planet Labs PBC. URL: <https://www.planet.com/ukraine-photo-story> (дата звернення: 23.05.2025).

128. Міністерство відновлення розпочало роботу над створенням ГІС регіонального розвитку – єдиної Геоінформаційної системи моніторингу кожного етапу розвитку та відновлення регіонів і громад України. державне агентство відновлення та розвитку інфраструктури України. 2023. URL: <https://restoration.gov.ua/press/news/55528.html> (дата звернення: 20.05.2025).

129. Платформа ефективних управлінських рішень Відновлення України. ONOVA GIS HUB. URL: https://media.onova.org.ua/onova-october-stg/media/ONOVA%20GIS%20HUB/ONOVA_платформа%20GIS%20HUB.pdf

130. Building Ukrainian Infrastructure Back. Esri. URL: <https://www.esri.com/about/newsroom/arcuser/ukraine-hub> (дата звернення: 18.02.2025).

131. Укравтодор запроваджує єдиний контакт-центр. Кременецька районна державна адміністрація. URL: <https://kremenets.te.gov.ua/news/ukravtodor-zaprovadzhuie-iedynyi-kontakt-tsentr> (дата звернення: 09.03.2025).

132. From now on, everyone will be able to keep track of roads repair costs online - Better Regulation Delivery Office. Better Regulation Delivery Office. URL: <https://brdo.com.ua/en/main/now-everyone-will-able-keep-track-roads-repair-costs-online/> (дата звернення: 15.02.2025).

133. Four Benefits of Integrating BIM and GIS for Rail and Highways. Autodesk. URL: <https://www.autodesk.com/autodesk-university/article/Four-Benefits-Integrating-BIM-and-GIS-Rail-and-Highways-2022/> (дата звернення: 22.02.2025).

134. Геоінформаційна система автомобільних доріг. MagneticOne Municipal Technologies. URL: <https://magneticonemt.com/mlgis-geoinformatsijna-sistema-avtomobilnih-dorig/> (дата звернення: 15.02.2025).

135. Predictive analytics, IoT, and machine learning save lives. Openvia. URL: <https://www.openvia.io/predictive-analytics-in-road-infrastructure-how-iot-and-machine-learning-save-lives/> (дата звернення: 11.02.2025).

136. Leveraging GIS for Public Infrastructure Projects. CentralSquare. URL: <https://www.centralsquare.com/resources/articles/leveraging-gis-for-public-infrastructure-projects> (дата звернення: 24.02.2025).

137. Gazula N., Earp C. How To Use Digital Twins for Infrastructure Innovations - Sustainable Tech Partner for Green IT Service Providers. Sustainable Tech Partner for Green IT Service Providers. URL: <https://sustainabletechpartner.com/guests/how-to-use-digital-twins-for-infrastructure-innovations> (дата звернення: 25.04.2025).

138. Digital twins set to save cities \$280 billion. Cities Today. URL: <https://cities-today.com/industry/digital-twins-set-save-cities-280-billion/> (дата звернення: 12.02.2025).

139. CoST Ukraine | CoST – Infrastructure Transparency Initiative. CoST – Infrastructure Transparency Initiative | Better lives from better infrastructure. URL: <https://infrastructuretransparency.org/where/cost-ukraine/> (дата звернення: 15.04.2025).

140. An Improved Wavelet Threshold Denoising Method for Health Monitoring Data: A Case Study of the Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge Immersed Tunnel / X. Jiang та ін. *Applied Sciences*. 2022. Т. 12, № 13. С. 6743. URL: <https://doi.org/10.3390/app12136743> (дата звернення: 27.04.2025).

141. Digital Tool for Managing Reconstruction of Infrastructure and Real Estate Projects (UA0101). Open Government Partnership. URL: <https://www.opengovpartnership.org/members/ukraine/commitments/ua0101/> (дата звернення: 28.04.2025).

142. Тимченко, С. Концепція цифровізації дорожньо-інфраструктурних проєктів в Україні: використання геоінформаційних технологій для підвищення ефективності управління. *Управління розвитком складних систем*. 2024. № 60. С. 95–104. DOI: <https://doi.org/10.32347/2412-9933.2024.60.95-104>

143. Protecting critical infrastructure from cyber-attacks. URL: <https://www.plainconcepts.com/protecting-critical-infrastructure-cyberattacks/>

144. Про географічні назви : Закон України від 31.05.2005 № 2604-IV : станом на 27 лип. 2023 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2604-15#Text> (дата звернення: 15.02.2025).

145. Про затвердження Порядку загальнодержавного топографічного і тематичного картографування : Постанова Каб. Міністрів України від 04.09.2013 № 661 : станом на 14 черв. 2023 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/661-2013-п#Text> (дата звернення: 15.02.2025).

146. Про затвердження Положення про порядок надходження, зберігання, використання та обліку матеріалів Державного картографо-геодезичного фонду України : Постанова Каб. Міністрів України від 22.07.1999 № 1344 : станом на 26 січ. 2024 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1344-99-п#Text> (дата звернення: 15.02.2025).

147. Про Порядок використання апаратури супутникових радіонавігаційних систем під час проведення топографо-геодезичних, картографічних, аерофотознімальних, проєктних, дослідницьких робіт і вишукувань та кадастрових

зйомок : Постанова Каб. Міністрів України від 13.07.1998 №1075. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1075-98-п#Text> (дата звернення: 15.02.2025).

148. Про затвердження Порядку використання Державної геодезичної референцної системи координат УСК-2000 при здійсненні робіт із землеустрою Мінагрополітики України; Наказ, Порядок від 02.12.2016 № 509 URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1646-16#Text>

149. ДСТУ EN 16157-1:2022. Інтелектуальні транспортні системи. Специфікації обміну даними DATEX II для керування дорожнім рухом та інформації про дорожній рух. Частина 1. Контекст та платформа (EN 16157-1:2018, IDT). Чинний від 2023-02-01. Вид. офіц. ДП «УкрНДНЦ», 2022. 30 с. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=98494 (дата звернення: 15.02.2025).

150. СОУ 71.12 – 37-944:2014. Стандартизація у сфері топографо-геодезичної та картографічної діяльності. База топографічних даних. Загальні вимоги. Вид. офіц. Київ, 2014. 35 с. URL: <https://nsdi.gov.ua/files/legislation/b691cae0-0a8b-11e8-a9c9-d16a7205336d.pdf> (дата звернення: 12.02.2025).

151. Makarenko D. Global Geospatial Frameworks enabling the geospatial ecosystem development in Ukraine : Презентація. Rotterdam : State Service of Ukraine for Geodesy, Cartography and Cadastre, 2023. 11 с. URL: https://geospatialworld.net/gwf/2023/presentation/gki/session-3/Global-Geospatial-Frameworks-enabling-the-geospatial-ecosystem-development-in-Ukraine-Dmytro_Makarenko.pdf (дата звернення: 16.02.2025).

152. Законодавство у сфері топографо- геодезичної та картографічної діяльності. Головне управління Держгеокадастру у Миколаївській області – Офіційний веб-сайт. URL: <https://mykolaivska.land.gov.ua/heodeziia-ta-kartohrafiia/zakonodavstvo-u-sferi-topohrafo-heodezychnoi-ta-kartohrafichnoi-diialnosti/> (дата звернення: 10.02.2025).

153. Capacity Development Project for Utilizing the National Geospatial Data Infrastructure. Ukrainian Climate Office. URL: <https://ukrainian-climate->

office.org/en/project/capacity-development-project-for-utilizing-the-national-geospatial-data-infrastructure/ (дата звернення: 09.02.2025).

154. Зузанська Т. Переваги та недоліки «публічної кадастрової карти України». npcz-rivne. URL: https://npcz-rivne.ucoz.ua/OLIMPIADA_2013/Boyarka/stattja_zuzanska.pdf (дата звернення: 16.02.2025).

155. Публічна кадастрова карта: крок до прозорості. Гал-інфо. URL: https://galinfo.com.ua/articles/publiczna_kadastrova_karta_krok_do_prozorosti_127988.html (дата звернення: 13.02.2025).

156. У столиці оновили мапу укриттів: доступна веб-версія, а також мапа в застосунку Київ Цифровий. Офіційний портал КМДА - Головна. URL: https://kyivcity.gov.ua/news/u_stolitsi_onovili_mapu_ukrittiv_dostupna_veb-versiya_a_takozh_mapa_v_zastosunku_kiv_tsifroviy/ (дата звернення: 11.02.2025).

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А



ВИКОНАВЧИЙ ОРГАН КИЇВСЬКОЇ МІСЬКОЇ РАДИ
(КИЇВСЬКА МІСЬКА ДЕРЖАВНА АДМІНІСТРАЦІЯ)

ДЕПАРТАМЕНТ ТРАНСПОРТНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ

**КОМУНАЛЬНЕ ПІДПРИЄМСТВО
«ЦЕНТР ОРГАНІЗАЦІЇ ДОРОЖНЬОГО РУХУ»**

вул. Чистяківська, 19-А, м. Київ, 03062, тел: (044) 374 11 03, 374 11 01
Адреса для листування: 01054 м. Київ-54, а/с № 245 E-mail: kyiv.codr@kyivcity.gov.ua
<https://codr.kyivcity.gov.ua> Код ЄДРПОУ 32955518

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Директор КП «Центр організації дорожнього руху»

Міщенко О. Г.

« 27 » травня 2025

ДОВІДКА

про апробацію результатів дисертаційного дослідження

Представлені результати дисертаційного дослідження Тимченка Сергія Ігоровича за темою «Цифровізація дорожньо-інфраструктурних проєктів із застосуванням геоінформаційних технологій» були апробовані у виробничій діяльності Служби дислокації технічних засобів регулювання дорожнього руху (ТЗРДР) комунального підприємства «Центр організації дорожнього руху».

Апробація здійснювалася під час виконання низки завдань, зокрема:

- камеральна обробка результатів обстеження технічних засобів регулювання дорожнього руху (ТЗРДР);
- планування маршрутів обстеження з використанням геоінформаційних систем;
- аналіз даних щодо ДТП та підготовка звітних матеріалів за результатами виявлення місць концентрації дорожньо-транспортних пригод;
- розробка та підтримка структури геопросторової бази даних PostgreSQL, створення SQL-запитів для отримання актуальних даних про елементи ОДР та формування звітності для операційної діяльності;
- підготовка методичних та інструктивних матеріалів і навчання персоналу щодо роботи з ГІС-модулями, польовими інструментами та функціоналом геопорталу;
- участь у створенні веб-модуля для електронного обліку архівної документації з ОДР, що підвищив оперативність доступу до архівних матеріалів та актуальної інформації.

Апробація підтвердила ефективність застосування наукових підходів, розроблених у межах дисертаційного дослідження, у практичній діяльності Служби. Застосовані підходи сприяли скороченню часу виконання низки операційних завдань, зокрема в частині обробки, аналізу та доступу до геопросторових і проєктних даних. Це, у свою чергу, позитивно вплинуло на підвищення точності, актуальності та доступності інформації, яка використовується.

У майбутньому буде розглянута можливість інтеграції апробованих рішень в операційну діяльність служби відповідно до технічних та організаційних умов.

Начальник служби дислокації ТЗРДР

Олег ФЕДЯНІН

ДОДАТОК Б

УКРАЇНА



СВІДОЦТВО

про реєстрацію авторського права на твір

№ 132661

Літературний письмовий твір наукового характеру «Рекомендації щодо змін у нормативно-правовій базі щодо організації дорожнього руху з врахуванням вимог до національної безпеки та оборони країни»

(вид, назва твору)

Автор (співавтори) **Веренич Олена Володимирівна, Тимченко Сергій Ігорович, Безшапкін Сергій Миколайович, Васильєв Ігор Анатолійович, Бушуєв Сергій Дмитрович, Войтенко Олександр Степанович**

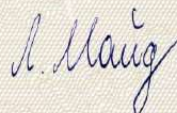
(прізвище, ім'я, по батькові (за наявності), псевдонім (за наявності))

Авторські майнові права належать повністю **Київський національний університет будівництва і архітектури, просп. Повітряних Сил, 31, м. Київ, 03037**

(прізвище, ім'я, по батькові (за наявності) фізичної особи / найменування юридичної особи, адреса)

Дата реєстрації 13 січня 2025 р.

Виконувач обов'язків
Директора Державної
організації «Український
національний офіс
інтелектуальної власності та
інновацій»



Любов МАЙДАНИК



УКРАЇНА



СВІДОЦТВО

про реєстрацію авторського права на твір

№ 132663

Літературний письмовий твір наукового характеру «Звіт щодо існуючих методологій управління проєктами для інфраструктурних проєктів та програм в контексті їх застосування для організації дорожнього руху із зазначенням переваг та недоліків та визначенням пріоритетних методологій чи їх конвергенції для управління інфраструктурними проєктами в контексті їх використання для організації дорожнього руху»

(вид, назва твору)

Автор (співавтори) **Веренич Олена Володимирівна, Тимченко Сергій Ігорович, Безшапкін Сергій Миколайович, Васильєв Ігор Анатолійович, Бушуєв Сергій Дмитрович, Войтенко Олександр Степанович, Терейковська Людмила Олексіївна**

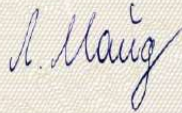
(прізвище, ім'я, по батькові (за наявності), псевдонім (за наявності))

Авторські майнові права належать повністю **Київський національний університет будівництва і архітектури, просп. Повітряних Сил, 31, м. Київ, 03037**

(прізвище, ім'я, по батькові (за наявності) фізичної особи / найменування юридичної особи, адреса)

Дата реєстрації 13 січня 2025 р.

Виконувач обов'язків
Директора Державної
організації «Український
національний офіс
інтелектуальної власності та
інновацій»

 **Любов МАЙДАНИК**



УКРАЇНА



СВІДОЦТВО

про реєстрацію авторського права на твір

№ 132662

Літературний письмовий твір наукового характеру «Звіт щодо впливу наслідків воєнних дій в контексті організації дорожнього руху щодо безпеки вулично-дорожньої мережі для населення територіальних громад та впливу на національну безпеку та оборону країни»

(вид, назва твору)

Автор (співавтори) **Веренич Олена Володимирівна, Тимченко Сергій Ігорович, Безшапкін Сергій Миколайович, Васильєв Ігор Анатолійович, Бушуєв Сергій Дмитрович**

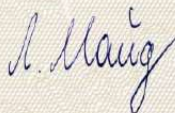
(прізвище, ім'я, по батькові (за наявності), псевдонім (за наявності))

Авторські майнові права належать повністю **Київський національний університет будівництва і архітектури, просп. Повітряних Сил, 31, м. Київ, 03037**

(прізвище, ім'я, по батькові (за наявності) фізичної особи / найменування юридичної особи, адреса)

Дата реєстрації 13 січня 2025 р.

**Виконувач обов'язків
Директора Державної
організації «Український
національний офіс
інтелектуальної власності та
інновацій»**



Любов МАЙДАНИК



ДОДАТОК В

Список опублікованих праць за темою дисертації

1. Тимченко, С. (2024). Концепція цифровізації дорожньо-інфраструктурних проєктів в Україні: використання геоінформаційних технологій для підвищення ефективності управління. Управління розвитком складних систем, (60), с. 95–104. <https://doi.org/10.32347/2412-9933.2024.60.95-104>.

Особистий внесок автора полягає у формулюванні концепції цифровізації дорожньо-інфраструктурних проєктів в умовах воєнного стану, виокремленні основних бар'єрів впровадження цифрових рішень та обґрунтуванні послідовної моделі впровадження геоінформаційних технологій в управління дорожньою інфраструктурою.

2. Тимченко, С. (2025). Геоінформаційні системи в управлінні дорожньою інфраструктурою: виклики та рішення для України. Економіка та суспільство, (71). <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2025-71-154>.

Особистий внесок автора полягає в узагальненні міжнародного та українського досвіду цифровізації управління дорожньою інфраструктурою, систематизації регіональних ініціатив та формулюванні практичних рекомендацій щодо впровадження геоінформаційних систем у проєктне управління дорожньо-інфраструктурними об'єктами.

3. Тимченко, С. (2025). Застосування ГІС у менеджменті проєктів безпеки дорожнього руху: аналітичні інструменти та Український досвід. Економіка та суспільство, (74). <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2025-74-55>.

Особистий внесок автора полягає в обґрунтуванні доцільності використання просторового аналізу в проєктах з безпеки дорожнього руху, розробленні IT-архітектури ГІС-рішень для підтримки управлінських рішень, а також в аналізі практичних кейсів з міст України.

4. Васильєв І., Безшапкін С., Тимченко С. (2023). Проєкти організації дорожнього руху: питання понятійного апарату та нормативно-правового забезпечення в контексті національної безпеки та оборони країни. Управління

розвитком складних систем, (56), 31–39. <https://doi.org/10.32347/2412-9933.2023.56.31-39>

Особистий внесок автора полягає в участі в аналізі нормативного тлумачення понять у сфері організації дорожнього руху та у формуванні висновків щодо їх уточнення в контексті реалізації проєктів модернізації

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

5. Веренич О. В., Безшапкін С. М., Васильєв І. А., Тимченко С. І. Роль просторових даних у реалізації інфраструктурних проєктів на прикладі організації дорожнього руху територіальних громад. Управління проєктами у розвитку суспільства. Управління проєктами післявоєнної розбудови України : тези доповідей ХХІ Міжнар. конф. / відповідальний за випуск С. Д. Бушуєв. м. Київ, 24 травня 2024 р. Київ : КНУБА, 2024. С. 86–90. URL: <https://repository.knuba.edu.ua/handle/123456789/13268> .

Особистий внесок автора полягає в участі у висвітленні можливостей використання цифрових технологій (ГІС, вебкартографії, цифрового зору) для збору, обробки та аналізу просторових даних в інфраструктурних проєктах у сфері організації дорожнього руху

ДОДАТОК Г

Аналіз нормативно-правової бази цифровізації дорожньо-інфраструктурних проєктів

Актуальне законодавство у сфері ГІС та цифровізації. Закони.

Ключовим законом є Закон України «Про національну інфраструктуру геопросторових даних» №554-IX від 13.04.2020 р., який визначає правові та організаційні засади створення, функціонування та розвитку національної інфраструктури геопросторових даних (НІГД) [71]. Цей закон спрямований на забезпечення ефективного прийняття управлінських рішень органами влади, задоволення потреб суспільства у всіх видах географічної інформації та інтеграцію України в глобальні й європейські геопросторові інфраструктури [71]. Закон передбачає створення Національного геопорталу та галузевих геопорталів, відкритість геопросторових даних та метаданих, визначає терміни (зокрема поняття «геоінформаційна система») та розподіляє відповідальність між виробниками і держателями геоданих [71, 72].

Інші чинні закони у цій сфері включають:

1. Закон України «Про топографо-геодезичну і картографічну діяльність» №353-XIV від 23.12.1998 р. – базовий закон, що регулює відносини у сфері топографо-геодезичної та картографічної діяльності [73]. Він визначає завдання у цій сфері та створює умови для забезпечення потреб держави і громадян картографо-геодезичною продукцією [73]. Цей закон залишається чинним (станом на січень 2025 р.), хоча ухвалений ще у 1998 році і багато його положень потребують осучаснення.

2. Закон України «Про географічні назви» №2604-IV від 31.05.2005 р. – встановлює правові основи діяльності, пов'язаної з найменуванням географічних об'єктів, їх обліком, реєстрацією та використанням [144]. Нормування географічних назв є важливим для уніфікації топонімів у базах геоданих державного та місцевого рівня.

3. Закони у сфері цифрового розвитку. На законодавчому рівні впроваджено нормативи для розвитку електронного урядування та цифрових послуг, що опосередковано стимулюють використання ГІС. Наприклад, Закон України «Про особливості надання публічних (електронних публічних) послуг» №1689-IX від 15.07.2021 р. запроваджує принцип «digital by default» при наданні адмінпослуг [74]. Хоча він прямо не згадує ГІС, реалізація багатьох е-послуг (напр. реєстри нерухомості, землі, транспорту) вимагає використання геопросторових даних та картографічних сервісів. Також важливим є Закон «Про доступ до публічної інформації» [75] та підзаконні акти Кабміну про відкриті дані (Постанова КМУ №835 від 2015 р. з наступними змінами [76]), які зобов'язують публікувати набори відкритих даних, зокрема геопросторові (адміністративно-територіальний устрій, дорожня інфраструктура тощо).

Підзаконні акти. На виконання Закону про НІГД Кабінет Міністрів прийняв Постанову №532 від 26.05.2021 р. «Про затвердження Порядку функціонування національної інфраструктури геопросторових даних», яка конкретизує механізм реалізації НІГД [72]. Цим порядком визначено склад базових геопросторових даних, перелік органів влади та інших держателів, відповідальних за їх створення і оновлення, вимоги до виробництва, оброблення, зберігання, оприлюднення та використання геоданих, а також умови функціонування національного Геопорталу [72]. Реалізація постанови покликана забезпечити сучасні геоінформаційні сервіси та вільний доступ громадян до якісних актуальних геоданих онлайн.

У сфері геодезії та картографії продовжують діяти підзаконні акти, які встановлюють технічні правила та порядки ведення робіт, багато з яких були прийняті до ери цифровізації. Серед них: Постанова КМУ №1259 від 22.09.2004 р. «Деякі питання застосування геодезичної системи координат» – стосувалася запровадження єдиної системи координат (тоді діючою була СК-42). Також Постанова КМУ №661 від 04.09.2013 р. «Про затвердження Порядку загальнодержавного топографічного і тематичного картографування» – регулює виконання картографування на державному рівні [145]. Існують урядові рішення щодо Державного картографо-геодезичного фонду (Постанова КМУ №1344 від

22.07.1999 [146]) та використання GPS-апаратури при виконанні зйомок (Постанова КМУ №1075 від 13.07.1998 [147]), що заклали основи переходу до сучасних технологій збору просторових даних. Згодом, із розвитком ГНСС, був затверджений перехід на нову систему координат УСК-2000 – це закріплено, зокрема, наказом Мінагрополітики №509 від 02.12.2016, який зобов'язує застосовувати геодезичну систему УСК-2000 при здійсненні землеустрою [148]. Таким чином, нормативно врегульовано відхід від застарілої системи СК-42 до сучасної системи координат, сумісної з глобальними стандартами.

Національні стандарти (ДСТУ). В Україні впроваджено низку державних стандартів, що унормовують геоінформаційні дані та суміжні технології згідно з міжнародними вимогами. Так, у 2017–2019 рр. технічний комітет стандартизації «Географічна інформація/геоматика» (ТК 103) переклав і прийняв основоположні стандарти ISO серії 19100. Зокрема, діють: ДСТУ 8774:2018 «Географічна інформація. Правила моделювання геопросторових даних» (набрала чинності з 01.07.2019 р.) [77], яка встановлює єдині принципи створення концептуальних схем та структурування геопросторових даних. Цей стандарт розроблено з урахуванням міжнародних норм і містить посилання на цілу низку профільних ДСТУ ISO (наприклад, стандарти на геопросторові метадані, модель GML, схему покриттів тощо). Такі стандарти забезпечують сумісність українських ГІС-даних із європейськими (INSPIRE) та світовими (OGC) форматами.

Окремо варто відзначити стандарти у сфері інтелектуальних транспортних систем (ITS), що теж є складовою цифровізації транспорту. У 2022 році Україна прийняла серію стандартів ДСТУ EN 16157:2022 (IDT з європейським стандартом DATEX II), які встановлюють формат обміну даними про дорожній рух. Наприклад, ДСТУ EN 16157-1:2022 «Інтелектуальні транспортні системи. Специфікації обміну даними DATEX II... Частина 1: Контекст та платформа» визначає загальний набір специфікацій моделювання даних, необхідних для забезпечення концепції безперебійного обміну інформацією про дорожній рух та поїздки між різними рівнями і учасниками дорожньої інфраструктури [149]. Набрання чинності цих стандартів (з лютого 2023 р.) створює підґрунтя для впровадження європейських

ITS-рішень (наприклад, системи eCall, обмін даними про затори, ДТП тощо) в Україні.

Стандарти організацій України (СОУ). У вузькогалузевих аспектах застосування ГІС діють відомчі стандарти. Для забезпечення єдиних технічних вимог до ГІС у дорожньому господарстві «Укравтодор» запровадив стандарт: СОУ 42.1-37641918-063:2016 «Геоінформаційна система автомобільних доріг. Вимоги до складу, змісту та застосування» – набув чинності з 01.03.2016 р. [78]. Цей стандарт встановлює структуру та формат даних для ГІС автомобільних доріг загального користування, регламентує зміст інформаційних шарів (дорожня мережа, мости, знаки тощо) і правила ведення та актуалізації цієї системи. Він прийнятий на заміну попередніх нормативів 2011–2014 рр. [78], що свідчить про оновлення вимог відповідно до сучасних можливостей ГІС.

В сфері топографо-геодезичної діяльності у 2014 році було затверджено пакет відомчих стандартів, що описують структуру Національної топографічної бази даних. Зокрема: СОУ 71.12-37-944:2014 «База топографічних даних. Загальні вимоги» та СОУ 71.12-37-949:2014 «База топографічних даних. Каталог об'єктів і атрибутів», затверджені наказом Мінагрополітики України (яке тоді координувало картографо-геодезичну службу) [150]. Перший стандарт встановлює загальні принципи створення і ведення цифрової топографічної бази на всю територію України, другий – визначає систему класифікації топографічних об'єктів та їх атрибутів. На їх основі ведеться наповнення національної топографічної бази, що інтегрується в НІГД.

Таким чином, в Україні сформовано багаторівневу нормативну базу: від законів (які визначають політику відкритості та інтеграції геоданих) – до стандартів (що уніфікують формати й технічні аспекти ГІС). Вона охоплює як загальнодержавне регулювання використання ГІС у публічному секторі, так і спеціальні стандарти для галузі транспорту та інших сфер.

Застарілі нормативи та необхідність оновлення.

Попри наявність сучасних законів і стандартів, частина нормативно-правових актів у сфері ГІС залишається застарілою. Закон 1998 року про картографо-

геодезичну діяльність ухвалювався в інший технологічний період – він не оперував поняттями відкритих даних чи цифрових геопорталів. Лише у 2020 році, після 18 років обговорень та кількох невдалих спроб прийняття закону про НІГД [151], вдалося законодавчо закріпити сучасну концепцію просторових даних. Відтак, назріла потреба гармонізувати старий закон із новим: привести визначення термінів, вимоги до розповсюдження картматеріалів і доступу до них у відповідність до Закону про НІГД. Фактично, Закон 1998 р. слід оновити, щоб він враховував існування національного Геопорталу, принцип відкритості даних (open data) та ролі нових учасників (наприклад, визначених у законі «виробників» і «держателів» геоданих).

Також підзаконні акти 1990-х – початку 2000-х років потребують ревізії. Наприклад, інструкції з топографічного знімання 1998 року (ГКНТА-2.04-02-98) досі застосовуються [152], але в них не були закладені сучасні методи (лазерне сканування, БПЛА) та цифрові формати видачі матеріалів. Нові технології вимагають внесення змін до цих інструкцій або ухвалення нових – з описом процедур цифрового знімання, фотограмметрії, формування геопросторових баз даних замість паперових планів.

Необхідність оновлення простежується і в транспортній галузі. До середини 2010-х рр. відсутні були сучасні норми щодо електронних карт доріг та навігаційних систем. «Укравтодор» лише у 2016 р. ввів в дію СОУ на ГІС доріг, замінивши документ 2011 р. [78]. Це означає, що в 2011–2015 рр. дорожнє господарство не мало єдиного підходу до ведення електронних карт – інформація велася переважно в таблицях, окремих файлах, що ускладнювало аналіз і прийняття рішень. Тепер, із впровадженням стандартизованої дорожньої ГІС, виникає потреба *поновити супутні нормативи*: наприклад, будівельні норми щодо проектування доріг, щоб вимагати надавати проектну документацію і виконавчі зйомки у форматі, сумісному з ГІС. Аналогічно, у міському транспорті та логістиці – раніше не було обов’язкових вимог використовувати ГІС для планування маршрутів чи керування трафіком. Зараз, коли державою прийняті стандарти на ITS (серія ДСТУ EN 16157:2022), необхідно внести зміни до профільних правил експлуатації доріг і

вулично-дорожньої мережі, щоб використання інтелектуальних систем стало нормою.

Перехід на єдину систему координат теж є прикладом актуалізації застарілого регулювання. Старі нормативи спиралися на СК-42 (Пулково 1942), що не узгоджується з GPS-даними. В 2004 р. уряд приймав постанову про запровадження нової системи, але фактично процес розтягнувся до 2017 р., коли УСК-2000 стала обов'язковою для землеустрою [152]. Сьогодні всі нові зйомки виконуються в УСК-2000 (еквівалент WGS-84 для України), проте історичні дані (карти, плани) залишаються в старих координатах. Тож на порядку денному – проблеми *трансформування старих геоданих* у нову систему координат та їх інтеграції у сучасні ГІС. Це вимагає методичних документів чи стандартів, які наразі ще в стадії розробки.

Крім того, неповнота охоплення сучасних реалій в законодавстві проявляється у відсутності прямих норм про хмарні ГІС-сервіси, про великі дані геолокації, про захист геопросторових даних (особливо персональних, як-то треки телефонів). Законодавство про захист інформації і персональних даних потребує уточнень щодо геолокаційних даних громадян в мобільних застосунках, транспортних картках тощо. Так само, законодавство про транспорт наразі не містить термінів «інтелектуальні транспортні системи», «електронна навігація» – ці поняття введено стандартами і стратегіями, але варто закріпити і в законах (наприклад, у Законі «Про дорожній рух» або прийняти окремий закон про ITS).

Отже, подальше оновлення нормативної бази повинно йти за двома напрямками: по-перше, перегляд старих актів з метою їх цифрової трансформації (вписати ГІС і відкриті дані в існуючі правила), а по-друге – прийняття нових нормативів під нові технології (хмарні геопортали, навігаційні системи, дистанційне зондування тощо).

Державні ініціативи, програми та стратегії у сфері ГІС.

Держава усвідомила пріоритетність цифровізації, і у останні роки було запущено ряд стратегічних ініціатив, що включають компонент ГІС:

1. **«Цифровий порядок денний України 2018–2020».** 17 січня 2018 року Кабмін затвердив Концепцію розвитку цифрової економіки та суспільства та план заходів на 2018–2020 роки [74 ст 13]. Цей стратегічний документ (Digital Agenda) передбачав розвиток цифрової інфраструктури, е-урядування, відкритих даних та smart-технологій. Одним зі стовпів було *«Цифрове врядування»*, що мало на меті модернізувати публічну адміністрацію, уніфікувати дані, впровадити єдині реєстри та сервіси [74 ст 13]. У межах цього напрямку було започатковано інвентаризацію державних інформаційних ресурсів і створення інтегрованих систем. Зокрема, ще у 2017 році Державне агентство з питань електронного уряду розпочало проєкт **«Карта державних реєстрів»**, який виявив понад 135 різних реєстрів у більш ніж 40 органах влади [74]. Цей проєкт рекомендував забезпечити взаємопов’язаність реєстрів та впровадити уніфіковані ідентифікатори (у тому числі для адрес, координат об’єктів) [74]. Таким чином, на стратегічному рівні було закладено основу для інтеграції геопросторової інформації з реєстрами (земельним, містобудівним, транспортним тощо).

2. **Створення Міністерства цифрової трансформації.** У 2019 році вперше утворено профільне міністерство (Мінцифри), що координує всі цифрові проєкти. Одним із трьох ключових завдань Мінцифри визначено «100% публічних послуг онлайн» [74 ст 13], що включає і геопросторово-залежні послуги (наприклад, реєстрація землі, будівництва, дозволи на транспортні перевезення – які неможливі без карт). Мінцифри запустило бренд «Дія», під яким об’єднано портал електронних послуг і мобільний застосунок. Хоча «Дія» сама по собі не є ГІС, вона використовує геоінформацію – зокрема, додаток «Дія» інтегрує мапи найближчих сервісів, відображає місцезнаходження ЦНАПів, точки вакцинації тощо. Такі рішення стали можливими завдяки розвитку бек-енд інфраструктури геоданих. Міністерство також співпрацює з профільними відомствами для розвитку відкритих даних: в 2020–2021 рр. у партнерстві з Міндовкілля створено публічну екологічну мапу, з Міносвіти – мапу закладів освіти, тощо.

3. **Національна інфраструктура геопросторових даних (НІГД).** Після ухвалення закону у 2020 р. розпочато практичні кроки з впровадження НІГД.

Держгеокадастр (визначений базовим органом) за підтримки міжнародних партнерів реалізує відповідний проєкт . У 2021 р. Норвезьке картографічне агентство (Kartverket) здійснило для України оцінку за методикою IGIF (Integrated Geospatial Information Framework) [151 ст 3,], на основі чого сформовано дорожню карту розвитку НІГД. У 2021 р. запрацював **Національний геопортал НІГД** (nsdi.gov.ua) – наразі він функціонує в обмеженому режимі через воєнний стан, але для зареєстрованих виробників і держателів даних доступний. На геопорталі створено каталог метаданих, модуль реєстру географічних назв, тематичні шари та сервіси. Наповнення геопорталу відбувається поетапно: пріоритет надано базовим наборам (межі адміністративно-територіальні, адресний реєстр, дорожня мережа, гідрографія, топографічна основа тощо). У 2022 р. стартував трирічний проєкт технічної допомоги JICA (Японія) з розвитку НІГД [153]. Його мета – побудувати в Держгеокадастрі сучасну інтеграційну платформу геоданих, навчити персонал та забезпечити поповнення даних. Усі ці ініціативи є складовими державної програми з розбудови НІГД, яка по суті є впровадженням в Україні європейської директиви INSPIRE.

4. Відкриті дані та прозорість. Україна приєдналася до Міжнародної хартії відкритих даних (2017) і послідовно розширює перелік оприлюднюваних наборів. Багато з них – геопросторові за своєю суттю. Так, на єдиному порталі data.gov.ua доступні у ГІС-форматах: Державний земельний кадастр, Лісовий кадастр, Населені пункти і їх межі, Мережа доріг, Залізничні колії, Мережі громадського транспорту міст тощо. Крім центрального portalу, діють галузеві відкриті реєстри з картографічними сервісами: наприклад, геопортал Держслужби з надзвичайних ситуацій (мапа пожеж, надзвичайних ситуацій), геоінформаційна система Державного агентства автомобільних доріг, публічна мапа надрокористування Держгеонадр, мапа мережі укриттів (КМДА) тощо. Курс на відкритість значно стимулював розвиток публічних ГІС-сервісів – адже при публікації просторових даних зручніше одразу показати їх на карті. У 2020–2021 рр. було оновлено дизайн та функціонал Публічної кадастрової карти України (map.land.gov.ua) [154, 155], яка стала одним з найпопулярніших державних веб-ресурсів (за даними

Держгеокадастру, від дня запуску у 2013 р. і станом на 2019 рік її відвідали мільйони користувачів [155]). Загалом, програми відкритих даних тісно переплетені з впровадженням ГІС, і держава продовжує фінансувати такі ініціативи (наприклад, гранти USAID та Світового банку на підтримку відкритих геоданих для міст, на розвиток геопорталів громад тощо).

5. Стратегія розвитку транспорту та смарт-інфраструктури. У 2018 році затверджено **Національну транспортну стратегію України на період до 2030 року («Drive Ukraine 2030»)**, яка серед іншого передбачає цифрову трансформацію транспортної галузі. Зокрема, стратегія декларує впровадження інтелектуальних транспортних систем на дорогах, цифрових логістичних коридорів, систем моніторингу перевезень. На виконання цієї стратегії Мініфраструктури реалізує проєкт «Електронна транспортна система», що включає створення єдиної інформаційної системи управління дорожнім рухом і інфраструктурою. У співпраці з ЄС опрацьовується імплементація вимог Директиви 2010/40/ЄС про ITS – прийняті українські стандарти DATEX II є частиною цього процесу. Також діє державна цільова програма підвищення безпеки дорожнього руху, де одним із заходів є розгортання автоматизованих систем керування дорожнім рухом (світлофори з адаптивним управлінням, камери контролю швидкості, метеосистеми) – всі вони потребують ГІС для прив'язки до місцевості та інтегрованого відображення.

На місцевому рівні активно розвиваються концепції «**Smart City**», які включають підсистеми ГІС для управління міським господарством і транспортом. Наприклад, у місті Києві впроваджено систему «Київ Цифровий», що має модулі транспорту (електронний квиток, GPS-відстеження транспорту), паркування, безпеки. У 2023 році КМДА запустила оновлену інтерактивну мапу захисних укриттів – веб-ГІС сервіс, де мешканці можуть знайти найближче бомбосховище [156]. Мапа працює як у веб-версії, так і інтегрована в мобільний застосунок «Київ Цифровий», причому доступна офлайн завдяки попередньому кешуванню даних [156]. Цей приклад демонструє, як державні та комунальні установи оперативно застосовують ГІС-технології для вирішення актуальних завдань (в даному випадку

– цивільного захисту населення). Схожі ініціативи є і в інших містах: наприклад, у Львові – портал відкритих даних з геоінформаційними наборами (ремонт доріг, комунальне майно на карті), у Дніпрі – система диспетчеризації громадського транспорту з публічною мапою тощо.

Наведені приклади свідчать про те, що Україна вже має успішні кейси впровадження ГІС як на загальнодержавному рівні (кадастрова карта, національний геопортал, інтерактивна карта доріг), так і на рівні окремих міст і галузей. Ці кейси стали можливими завдяки поєднанню оновленої нормативної бази та політичної волі до цифровізації.

Нижче подано узагальнювальну таблицю (таблиця Г.1) з прикладами нормативних документів та відповідних реалізованих ГІС-проектів.

Таблиця Г.1 - прикладами нормативних документів та відповідних реалізованих ГІС-проектів

Нормативний акт / стандарт	Короткий зміст	Реалізація в ГІС
Закон «Про НІГД» (2020)	Відкриття геоданих, створення Національного геопорталу, визначення базових наборів геоданих [71]	Національний геопортал НІГД (nsdi.gov.ua) – каталог і сервіси геоданих; регіональні геопортали.
Закон «Про топографо-геодезичну...» (1998)	Правові основи картографо-геодезичної діяльності; державне управління у цій сфері [152]	Створення Держкартгеофонду, держгеодезичної мережі; (потребує оновлення під сучасні ГІС).
Постанова КМУ №532 (2021)	Порядок функціонування НІГД: відповідальні органи, вимоги до даних, робота геопорталів [72]	Механізм наповнення геопорталу НІГД (виконують держателі даних); забезпечено роботу держреєстру назв.
Постанова КМУ №661 (2013)	Порядок топографічного і тематичного картографування (нац. і регіонального).	Виконання державних карт масштабу 1:50 000 у цифровій формі; створення топооснови для кадастрів.
ДСТУ 8774:2018 «Географічна інформація. Правила моделювання...»	Профільний стандарт геоінформації: мінімальний набір елементів для створення моделей геоданих.	Єдина структура баз геоданих для різних реєстрів; використаний при розробці специфікацій НІГД.
ДСТУ ISO 19115:2017 «Географічна інформація. Метадані» та ін.	Набір прийнятих ISO-стандартів (19115, 19119, 19136 тощо) для сумісності геоданих [77]	Формат метаданих на Нацгеопорталі; обмін даними між системами (наприклад, GML у кадастрі).

Продовження таблиця Г.1

СОУ 71.12-37-944:2014 «База топографічних даних. Загальні вимоги»	Цифрова топографічна база держави, принципи побудови [150]	Єдина топовбаза України (в Держгеокадастрі); використовується для оновлення карт і НІГД.
СОУ 42.1-37641918-063:2016 «ГІС автомобільних доріг...»	Вимоги до складу та змісту ГІС доріг (для Укравтодору) [78]	Геоінфосистема доріг – “Інтерактивна мапа Укравтодору” (map.ukravtodor.gov.ua) [124]
ДСТУ EN 16157:2022 «DATEX II для дорожнього руху»	Стандарти обміну даними про трафік, дорожні події, паркінги (європейський формат) [149]	Системи моніторингу трафіку та аварій (в перспективі – Нац. центр управління рухом при Мінінфр.).
Стратегія «Цифрова держава» (2020) та «Drive Ukraine 2030»	Стратегічні документи, що передбачають цифровізацію послуг і інфраструктури.	Портал «Дія» (е-послуги з геоприв’язкою), система e-ticket у транспорті, камери автофіксації порушень.

Джерело: сформовано автором.

Таким чином, на державному рівні реалізується комплекс заходів, що сприяють впровадженню ГІС: стратегічні документи ставлять цілі цифровізації, профільні відомства (Мінцифра, Держгеокадастр, Мінінфраструктури) виконують програми і проєкти, а місцева влада впроваджує конкретні ГІС-рішення в межах Smart City. Це створює сприятливе середовище для подальшого розвитку ГІС в управлінні та транспорті.

Аналіз нормативно-правової бази показує, що Україна створила базове правове поле для впровадження ГІС у державному управлінні та транспортному секторі. Прийнято сучасні закони (про НІГД, про електронні публічні послуги), які відповідають духу цифрової трансформації та європейським підходам. Унормовано відкритість геоданих, їх стандарти (через ДСТУ, гармонізовані з ISO/INSPIRE) та відповідальність органів за їх актуальність. Державні програми активно просувають створення геоінформаційних сервісів на практиці – від кадастрів до транспортних навігаційних систем. Водночас, частина нормативної бази (особливо та, що створена до 2010 року) **відстає від сучасних потреб**: вона не враховує нових технологій і може стримувати розвиток (наприклад, застарілі інструкції чи відсутність прямих норм про інтеграцію даних). Однак вже зараз бачимо, що багато «вузьких місць» усуваються: впроваджуються нові стандарти замість ГОСТів, змінюються постанови щодо координат, створюються нові реєстри.