

Харківський національний автомобільно-дорожній університет
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

БУГАЄВСЬКИЙ МИХАЙЛО СЕРГІЙОВИЧ

УДК 004.942

ДИСЕРТАЦІЯ
МОДЕЛІ ТА ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ЦИФРОВИХ
ДВІЙНИКІВ У ВИРОБНИЦТВІ ТА ЛОГІСТИЦІ БЕТОНУ

Спеціальність 122 Комп'ютерні науки
Галузь знань 12 Інформаційні технології

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

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

_____ Бугаєвський Михайло Сергійович

Науковий керівник
Петренко Юрій Антонович,
проф. каф. автоматизації та
комп'ютерно-інтегрованих технологій,
доктор техн. наук, професор

Харків – 2026

АНОТАЦІЯ

Бугаєвський Михайло Сергійович. Моделі та інформаційна технологія цифрових двійників у виробництві та логістиці бетону. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 12 – Інформаційні технології за спеціальністю 122 – Комп’ютерні науки. – Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків, 2026.

Дисертаційна робота присвячена розробці методів, моделей та інформаційної технології підтримки прийняття рішень для ефективного управління виробництвом готової бетонної суміші та плануванням її доставки до будівельних майданчиків з урахуванням факторів ризику.

У роботі детально проаналізовано теоретичні засади організації виробництва та логістики товарного бетону, сучасні підходи до планування виробничо-логістичних процесів, методи імітаційного моделювання та оптимізації, а також застосування цифрових двійників, штучного інтелекту та машинного навчання у виробничих системах.

З урахуванням проведеного аналізу в роботі поставлено та вирішено науково-прикладне завдання розробки моделей, методів та інформаційної технології цифрових двійників для завдань планування та управління у виробництві та логістиці бетонних заводів в умовах змінних ринкових вимог та обмежень.

Робота базується на методах системного аналізу, теорії прийняття рішень, імітаційного моделювання, теорії оптимізації, методах машинного навчання, а також сучасних підходах до побудови цифрових двійників виробничо-логістичних систем.

Вперше розроблено імітаційну модель аналізу процесів виробництва та логістики готових бетонних сумішей, яка на відміну від існуючих інтегрує технологічні та економічні показники у динамічну мультиагентну модель з

урахуванням оптимізаційних механізмів, що дозволяє проводити оцінювання раціональності та ефективності організації виробництва та доставки товарного бетону, визначення вузьких місць виробничих та логістичних процесів, прогнозувати показники діяльності бетонних заводів, з урахуванням динаміки ринкових умов та розвитку інфраструктури виробничої й розподільчої мережі.

Удосконалено модель планування та оптимізації в логістичному ланцюгу дала змогу врахувати фактори попиту, маршрутів доставки, часових обмежень і виробничих потужностей, що підвищило обґрунтованість управлінських рішень та дозволяє досить повно врахувати можливі варіанти переміщення транспортних засобів у логістиці бетону.

Удосконалено модель оптимізації інфраструктури виробничо-розподільчої мережі, що надало можливість виявити конфігурації, які забезпечують найкраще співвідношення між витратами на експлуатацію, транспортом і прибутковістю при змінних сценаріях роботи системи та реалізації проєктів модернізації та розвитку.

Дістали подальшого розвитку моделі машинного навчання для аналізу ефективності логістики та якості готового бетону в реальному часі, що засновані на ансамблевих методах машинного навчання, які на відміну від існуючих враховують параметри системи управління замовленнями, IoT-платформи заводу та автобетонозмішувачів та систем маршрутизації, що дозволяє підвищити ефективність предиктивної аналітики якості та логістики готового бетону.

Практичне значення одержаних результатів полягає в можливості використання запропонованого комплексу моделей, методів та інформаційної технології цифрового двійника для планування та управління виробництвом й логістикою бетонних підприємств, з метою підвищення продуктивності, скорочення простоїв та зниження витрат.

Ключові слова: бетонні заводи, готовий бетон, логістика, планування виробництва та логістики, управління проєктами, цифровий двійник, імітаційне моделювання, машинне навчання, оптимізація, агентне

моделювання, планування поставок, IoT, предиктивна аналітика, штучний інтелект, ефективність управління, оптимізація, мультиагентні системи.

Список публікацій здобувача за темою дисертації

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Бугаєвський М., Петренко Ю. Simulation of production and logistics for concrete plants // Radioelectronic and Computer Systems. – 2024. – Vol. 2024, no. 3. – P. 190–204. – DOI: 10.32620/reks.2024.3.13. (Scopus, Q2).

Особистий внесок: системне подання цифрового двійника бетонного заводу, розробка імітаційної моделі аналізу виробничих процесів та логістики готових бетонних сумішей.

2. Buhaievskyi M., Petrenko Y. Planning and optimization models in ready-made concrete production and logistics // Radioelectronic and Computer Systems. – 2025. – No. 2. – P. 264–279. – DOI: 10.32620/reks.2025.2.17. (Scopus, Q2).

Особистий внесок: системне подання логістичних процесів у виробництві та розподілі бетону; розробка моделі планування та оптимізації ланцюга постачання готового бетону; розробка моделі оптимізації інфраструктури для виробничо-розподільчої мережі; розробка імітаційної моделі аналізу виробничих процесів та логістики готових бетонних сумішей.

3. Бугаєвський М. С., Петренко Ю. А. Багаторівневе планування й управління у розвитку виробництва та ланцюжках поставок бетону // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Стратегічне управління, управління портфелями, програмами та проектами. – 2025. – № 1(10). – С. 10–17. – DOI: 10.20998/2413-3000.2025.10.2. (Категорія Б).

Особистий внесок: розробка багаторівневої моделі планування логістики бетону; розробка імітаційної моделі аналізу виробничих процесів та логістики готових бетонних сумішей.

4. Бугаєвський М. С., Петренко Ю. А. Моделі машинного навчання для аналізу ефективності виробництва та логістики готового бетону // Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету. – 2025. – № 109. – С. 48–55. – DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2025.109.0.48. (Категорія Б)

Особистий внесок: розробка моделей машинного навчання для аналізу ефективності логістики готового бетону, розробка інформаційної технології цифрового двійника для планування та управління виробництвом і логістикою бетонних підприємств.

5. Петренко Ю. А., Бугаєвський М. С. Упровадження гнучких підходів до технологій укладання контрактів на основі гібридної методології управління проєктами в дорожньо-будівельній галузі // Вісник ХНАДУ. – Харків: ХНАДУ, 2023. – № 100. – С. 25–29. – DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2023.100.0.25. (Категорія Б).

Особистий внесок: розробка методології управління проєктами модернізації систем автоматизованого управління на асфальтобетонних заводах.

Друковані праці, що засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

6. Бугаєвський М. С. Аналіз інформаційних технологій планування та управління у виробництві та логістиці бетону // Science: development and factors its influence : proceedings of the 7th International Scientific and Practical Conference, April 6–8, 2026, Amsterdam, Netherlands. – Scientific Collection «InterConf», 2026. – № 289. – С. 176–179. – URL: <https://archive.interconf.center/index.php/conference-proceeding/issue/view/6-8.04.2026/300>.

7. Петренко Ю. А., Бугаєвський М. С. Методи машинного навчання для цифрових двійників виробництва та логістики бетонних заводів у проєктах післявоєнного відновлення України // Управління проєктами у розвитку суспільства : тези доп. XXII Міжнар. конф., 23 трав. 2025 р., Київ. – Київ : Київ. нац. ун-т буд-ва і архітектури, 2025. – С. 233–237.

Особистий внесок: запропоновано концепцію застосування предиктивної аналітики у виробництві та логістики будівельних матеріалів, розробка моделей машинного навчання для аналізу ефективності логістики готового бетону.

8. Buhaievskiy M., Petrenko Y. Planning and management of the order portfolio and development projects of concrete plants // Integrated strategic management, portfolio, program, and project management : abstr. of the 15th Intern. Sci. and Practical Conf., February 11–12, 2025. – Kharkiv : NTU «KhPI», 2025. – P. 22–23.

Особистий внесок: запропоновано системну модель процесу планування виробництва та логістики товарного бетону.

9. Петренко Ю. А., Бугаєвський М. С. Гібридна методологія управління проектами модернізації системи автоматизованого управління на асфальтобетонних заводах // Multidisciplinary academic notes. Theory, methodology and practice : матеріали XVII Міжнар. наук.-практ. конф., 03–06 трав. 2022 р., Токуо, Япон. – 2022. – С. 1092–1096. – DOI: 10.46299/ISG.2022.1.17. – URL: <https://isg-konf.com/wp-content/uploads/2022/05/Multidisciplinary-academic-notes.-Theory-methodology-and-practice.pdf>

Особистий внесок: розробка методології управління проектами модернізації систем автоматизованого управління на асфальтобетонних заводах.

10. Петренко Ю. А., Бугаєвський М. С. Використання гібридної методології в управлінні проектами // Комп'ютерно-інтегровані технології автоматизації технологічних процесів на транспорті та у виробництві : матеріали Всеукр. наук.-практ. конф. здобувачів вищої освіти і молодих учених, 23 листоп. 2022 р. – Харків : ХНАДУ, 2022. – С. 255–258. – URL: https://mf.khadi.kharkov.ua/fileadmin/user_upload/%D0%9C%D0%B0%D1%82%D0%B5%D1%80%D1%96%D0%B0%D0%BB%D0%B8_%D0%9A%D0%86%D0%A2-2022.pdf

Особистий внесок: запропоновано використання гібридної методології в управлінні проектами модернізації та розвитку асфальтобетонних заводів.

11. Петренко Ю. А., Бугаєвський М. С. Задачі впровадження методів управління проектами модернізації систем автоматизованого управління на асфальтобетонних заводах // Збірник наукових праць за матеріалами V Міжнар. наук.-практ. інтернет-конф., 23–24 берез. 2023 р. – Дніпро : Юрсервіс, 2023. – С. 148–151. – URL: https://nmetau.edu.ua/file/zbirnik__materialiv__konf_udunt_2023.pdf

Особистий внесок: сформовано принципи та вимоги щодо впровадження інформаційних технологій в управлінні проектами модернізації та розвитку асфальтобетонних заводів.

12. Петренко Ю. А., Бугаєвський М. С. Використання сучасних методів контролю якості у проектній діяльності з розробки програмного забезпечення // Комп'ютерно-інтегровані технології автоматизації технологічних процесів на транспорті та у виробництві : матеріали Всеукр. наук.-практ. конф. здобувачів вищої освіти і молодих учених, 22 листоп. 2023 р. – Харків : ХНАДУ, 2023. – С. 297–301. – URL: <https://dspace.khadi.kharkov.ua/handle/123456789/17902>

Особистий внесок: проведений аналіз підходів та методів контролю якості у проектній діяльності в рамках цифрової трансформації та впровадженні інформаційних технологій на асфальтобетонних заводах.

13. Петренко Ю. А., Бугаєвський М. С. Використання гнучких методів у проектній діяльності з розробки програмного забезпечення // Сучасний стан досліджень в сфері ІТ : матеріали Всеукр. наук.-практ. конф. здобувачів вищої освіти і молодих учених, 19 квіт. 2024 р. – Харків : ХНАДУ, 2024. – С. 168–172. – URL: <https://bit.ly/4eQD6Iq>

Особистий внесок: системний аналіз підходів та методів управління ІТ-проектами в рамках цифрової трансформації.

14. Петренко Ю. А., Бугаєвський М. С. Управління проектами розвитку бетонних заводів при відновленні житлової і промислової

інфраструктури в післявоєнний період // Управління проектами у розвитку суспільства. Управління проектами післявоєнної розбудови України : тези доп. XXI Міжнар. наук.-практ. конф., 24 трав. 2024 р. – Київ : КНУБА, 2024. – С. 194–198.

Особистий внесок: формування системного логістичного подання процесів управління підприємствами з виробництва та розподілення готового бетону; формування принципів управління ризиками при виробництві готового бетону.

15. Петренко Ю. А., Бугаєвський М. С. Цифрові двійники у виробництві та логістиці бетонних заводів // Інформаційні системи в управлінні проектами та програмами : зб. праць Міжнар. наук.-практ. конф., 9–13 верес. 2024 р. – Харків–Коблево : ХНУРЕ, 2024. – С. 180–183. – URL: <https://mmp-conf.org/documents/archive/proceedings2024.pdf>

Особистий внесок: формування концептуальних положень щодо створення цифрового двійника виробничо-логістичної системи бетонного заводу.

16. Бугаєвський М. С., Петренко Ю. А. Використання штучного інтелекту для виявлення аномалій і відхилень у виробничих даних // Сталий розвиток сучасних інформаційних технологій : матеріали студентської наук. конф. здобувачів вищої освіти та молодих учених, 24 квіт. 2025 р. – Харків : ХНАДУ, 2025. – С. 136–140. – URL: <https://bit.ly/495JPKT>

Особистий внесок: запропоновано концепцію застосування методів машинного навчання та предиктивної аналітики у виробничих процесах.

Усі співавтори погодилися із задекларованим особистим внеском здобувача у спільних публікаціях.

ABSTRACT

Buhaievskiy Mykhaylo. Models and Information Technology of Digital Twins in Concrete Production and Logistics. – manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy (PhD) in the field of knowledge 12 – Information Technologies in the specialty 122 – Computer Science. – Kharkiv National Automobile and Road University, Kharkiv, 2026.

The dissertation is devoted to the development of methods, models, and information technology for decision support aimed at efficient management of ready-mix concrete production and planning of its delivery to construction sites under risk factors.

The work provides a detailed analysis of the theoretical foundations of ready-mix concrete production and logistics organization, modern approaches to planning production and logistics processes, methods of simulation modeling and optimization, as well as the application of digital twins, artificial intelligence, and machine learning in production systems.

Based on the conducted analysis, the dissertation formulates and solves the scientific and applied problem of developing models, methods, and information technology of digital twins for planning and management tasks in the production and logistics of concrete plants under changing market requirements and constraints.

The research is based on methods of systems analysis, decision-making theory, simulation modeling, optimization theory, machine learning methods, and modern approaches to the development of digital twins for production and logistics systems.

For the first time, a simulation model for analyzing the processes of ready-mix concrete production and logistics has been developed. Unlike existing approaches, the proposed model integrates technological and economic indicators into a dynamic multi-agent model with optimization mechanisms, enabling the assessment of the rationality and efficiency of organizing concrete production and delivery, identification of bottlenecks in production and logistics processes,

forecasting the performance indicators of concrete plants, and considering the dynamics of market conditions as well as the development of production and distribution infrastructure networks.

The model of planning and optimization within the logistics chain has been improved by incorporating demand factors, delivery routes, time constraints, and production capacities. This increases the validity of managerial decisions and enables a more comprehensive consideration of possible vehicle movement scenarios in concrete logistics.

The model for optimizing the infrastructure of the production and distribution network has also been improved, making it possible to identify configurations that provide the best balance between operating costs, transportation expenses, and profitability under varying operational scenarios and modernization and development projects.

Further development has been achieved in machine learning models for real-time analysis of logistics efficiency and ready-mix concrete quality. These models are based on ensemble machine learning methods and, unlike existing approaches, take into account the parameters of order management systems, IoT platforms of concrete plants and truck mixers, as well as routing systems. This improves the effectiveness of predictive analytics for concrete quality and logistics.

The practical significance of the obtained results lies in the possibility of using the proposed комплекс of models, methods, and digital twin information technology for planning and managing the production and logistics activities of concrete enterprises in order to increase productivity, reduce downtime, and minimize operational costs.

Keywords: concrete plants, ready-mix concrete, logistics, production and logistics planning, project management, digital twin, simulation modeling, machine learning, optimization, agent-based modeling, delivery planning, IoT, predictive analytics, artificial intelligence, management efficiency, optimization, multi-agent systems.

ЗМІСТ

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ..... | 14 |
| ВСТУП..... | 15 |
| РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СТАНУ Й ПРОБЛЕМ УПРАВЛІННЯ ТА РОЗВИТКУ БЕТОННИХ ВИРОБНИЦТВ ПРИ ВПРОВАДЖЕННІ ЦИФРОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ У МИРНИЙ ЧАС ТА В ОСОБЛИВИХ УМОВАХ | 20 |
| 1.1 Стан та проблеми планування, управління й розвитку бетонних виробництв..... | 20 |
| 1.2 Цифрові двійники у виробництві та логістиці товарного бетону | 25 |
| 1.3 Аналіз методів планування та моделювання процесів виробництва та логістики товарного бетону | 34 |
| 1.4 Методи штучного інтелекту та машинного навчання у цифрових двійниках виробничо-логістичних систем готового бетону..... | 46 |
| 1.5 Аналіз інформаційних технологій планування та управління у виробництві та логістиці бетону..... | 49 |
| 1.6 Висновки за розділом і постановка завдань дисертаційного дослідження | 52 |
| РОЗДІЛ 2. СИСТЕМНЕ ЛОГІСТИЧНЕ ПОДАННЯ ПРОЦЕСІВ У ВИРОБНИЦТВІ ТА ЛОГІСТИЦІ ГОТОВОГО БЕТОНУ | 55 |
| 2.1 Формування системного логістичного подання процесів управління підприємствами з виробництва та розподілення готового бетону | 55 |
| 2.2 Багаторівнева модель планування виробництва та логістики товарного бетону | 57 |
| 2.3 Концептуальні положення щодо створення цифрового двійника виробничо-логістичної системи бетонного заводу..... | 60 |
| 2.3.1 Фізичний рівень цифрового двійника бетонного заводу | 62 |
| 2.3.2 Інформаційний рівень цифрового двійника бетонного заводу | 64 |
| 2.3.3 Аналітико-моделюючий рівень цифрового двійника бетонного заводу | 66 |

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 2.4 Модель планування та оптимізації в логістичному ланцюгу постачання готового бетону | 67 |
| 2.5 Модель оптимізації інфраструктури виробничої та розподільчої мережі | 72 |
| 2.6 Дослідження моделей машинного навчання для аналізу ефективності логістики готового бетону в реальному часі | 76 |
| 2.6.1 Моделі машинного навчання для прогнозування ймовірності затримок в логістиці готового бетону..... | 76 |
| 2.6.2 Моделі машинного навчання для контролю придатності бетону під час транспортування..... | 80 |
| 2.6.3 Моделі машинного навчання для контролю якості бетону на основі IoT-моніторингу виробництва..... | 91 |
| 2.7 Висновки до розділу 2 | 98 |
| РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА ІМІТАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ АНАЛІЗУ ПРОЦЕСІВ ВИРОБНИЦТВА ТА ЛОГІСТИКИ БЕТОНУ | 99 |
| 3.1 Основні положення при імітаційному моделюванні процесів виробництва та логістики бетону | 99 |
| 3.2 Імітаційна модель аналізу процесів виробництва та логістики готових бетонних сумішей..... | 100 |
| 3.3.1 Агент бетонного заводу | 104 |
| 3.3.2 Агент автобетонозмішувача..... | 107 |
| 3.3.3 Агент будівельного майданчику..... | 113 |
| 3.3 Розширення імітаційної моделі до управлінсько-економічного рівня.... | 114 |
| 3.4 Розширення імітаційної моделі для врахування ризиків у виробництві та логістиці готового бетону..... | 117 |
| 3.4.1 Врахування ризиків у агенті бетонного заводу..... | 119 |
| 3.4.2 Врахування ризиків постачання матеріалів..... | 120 |
| 3.4.3 Врахування ризиків доставки та втрати якості бетонної суміші | 121 |
| 3.4.4 Врахування ризиків на будівельному майданчику | 123 |
| 3.4.5 КРІ оцінювання ризикостійкості системи | 125 |
| 3.5 Висновки до розділу 3 | 127 |

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА ІНФОРМАЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ДЛЯ ПЛАНУВАННЯ ВИРОБНИЦТВА ТА РОЗПОДІЛУ БЕТОНУ | 129 |
| 4.1 Інформаційна технологія для планування виробництва та розподілу бетону | 129 |
| 4.2 Приклад моделювання процесів виробництва та логістики товарного бетону | 131 |
| 4.3 Результати моделювання факторів ризику при виробництві та логістиці бетону | 144 |
| 4.3.1 Сценарій логістичних ризиків доставки | 146 |
| 4.3.2 Сценарій виробничих ризиків бетонного заводу | 146 |
| 4.3.3 Сценарій ризиків постачання матеріалів | 148 |
| 4.3.4 Сценарій ризиків будівельного майданчика | 149 |
| 4.3.5 Комбінований сценарій ризиків..... | 150 |
| 4.4 Оцінка ефективності та розробка стратегій планування поставок бетону | 153 |
| 4.4.1 Методика оцінювання ефективності | 153 |
| 4.4.2 Результати застосування інформаційної технології | 153 |
| 4.4.3 Стратегії планування поставок | 156 |
| 4.4.4 Перспективи впровадження у виробничих системах в особливих умовах | 157 |
| 4.4 Висновки до розділу 4 | 159 |
| ВИСНОВКИ..... | 162 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ..... | 165 |
| ДОДАТОК А. Акти впровадження результатів дисертаційної роботи | 185 |

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

АТП – автотранспортне підприємство,
API – Application Programming Interface,
AI – Artificial Intelligence,
AUC – Area Under the Curve,
BPMN – Business Process Model and Notation,
CRM – Customer Relationship Management,
CVRP – Capacitated Vehicle Routing Problem,
CVRPTW – Capacitated Vehicle Routing Problem with Time Windows,
EAM – Enterprise Asset Management,
ERP – Enterprise Resource Planning,
IoT – Internet of Things,
JIT – Just-in-Time,
KPI – Key Performance Indicator,
LSTM – Long Short-Term Memory,
MDVRP – Multi-Depot Vehicle Routing Problem,
MES – Manufacturing Execution System,
ML – Machine Learning,
MLP – Multilayer Perceptron,
NP – Nondeterministic Polynomial,
PLC – Programmable Logic Controller,
SCADA – Supervisory Control and Data Acquisition,
SCM – Supply Chain Management,
SDVRP – Split Delivery Vehicle Routing Problem,
TMS – Transportation Management System,
TSP – Traveling Salesman Problem,
VRP – Vehicle Routing Problem,
VRPTW – Vehicle Routing Problem with Time Windows,
WMS – Warehouse Management System.

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дослідження. Постачальники готових бетонних сумішей є одними з значущих учасників у будівельному проєкті, а логістика представляє значні виклики у промисловості готового бетону. Відновлення знищеного житлового фонду, відбудова пошкодженої інфраструктури та промислових будівель, відновлення робіт на всіх будівельних майданчиках країни призведе до різкого зростання попиту на бетон, що вочевидь буде перевищувати існуючі виробничі потужності. В особливий період найбільшими драйверами попиту для бетону є інфраструктурне будівництво, зведення фортифікаційних та різноманітних військових захисних споруд, а також роботи з відбудови постраждалих від війни регіонів. Післявоєнний стан будівельної галузі в Україні буде характеризуватись збільшенням попиту на будівельні матеріали, динамічним розвитком та залученням інвестицій, що дозволить галузі розширювати виробничі потужності але для відновлення доріг [1], будівель, підприємств, мостів та інших об'єктів потрібний відповідний рівень внутрішніх спроможностей України щодо виробництва бетону, який суттєво перевищує довоєнні потреби. Згідно дослідження, що проведено за ініціативою Європейської Бізнес Асоціації [2] на середину травня 2024 року військових руйнувань зазнали 93,7 млн кв. м. житлових будівель, 25,8 тис. км. доріг, мости протяжністю 87,5 тис. м., державні та приватні підприємства площею в близько 38 млн кв. м.

Це робить все більшою актуальність та важливість потреби в підтримці розвитку внутрішнього потенціалу України щодо виготовлення будівельних матеріалів. Тому, одним з ключових пріоритетів українських бетонних заводів вже сьогодні має стати реалізація стратегії та відповідних проєктів розвитку, що спрямовані на підвищення продуктивності без втрати якості.

Для того, щоб вирішити ці задачі та керувати своїми виробничими операціями з більшою реакцією на ризики є перехід на використання

технологій цифрових двійників, промислового Інтернету речей та цифрового моделювання.

Таким чином, **актуальним науково-прикладним завданням** є розробка моделей, методів та інформаційної технології цифрових двійників для завдань планування та управління у виробництві та логістики бетонних заводів в умовах змінних ринкових вимог та ризиків.

Об'єкт дослідження – процеси планування та управління виробництвом та логістикою бетонних заводів.

Предмет дослідження – моделі, методи та інформаційна технологія планування та управління виробництвом та логістикою бетонних заводів при впровадженні цифрових технологій у мирний час та в особливих умовах.

Метою дисертаційної роботи є підвищення ефективності планування та управління виробництвом та доставкою бетону в умовах динаміки ринкових вимог, масштабної логістики, обмежень та розвитку виробничої системи.

Для досягнення поставленої мети розв'язуються наступні **задачі**:

- 1) аналіз стану, проблем та методів управління та розвитку бетонних виробництв при впровадженні цифрових технологій у мирний час та в особливих умовах;
- 2) формування системного логістичного подання процесів управління підприємствами з виробництва та розподілення готового бетону;
- 3) розробка моделі планування та оптимізації в логістичному ланцюгу постачання готового бетону;
- 4) розробка моделі оптимізації інфраструктури виробничої та розподільчої мережі;
- 5) розробка моделей машинного навчання для аналізу ефективності логістики готового бетону в реальному часі;
- 6) розробка імітаційної моделі аналізу процесів виробництва та логістики готового бетону;
- 7) розробка інформаційної технології планування та управління виробництвом та логістикою бетонних підприємств;

8) проведення експериментів та впровадження результатів дослідження в практику управління асфальтобетонних підприємств.

Методи дослідження базуються на використанні: системного аналізу для дослідження процесів логістичного управління бетонних підприємств, методів оптимізації, агентного імітаційного моделювання, методи штучного інтелекту та машинного навчання.

Наукова новизна одержаних результатів:

1. Вперше розроблено імітаційну модель аналізу процесів виробництва та логістики готових бетонних сумішей, яка на відміну від існуючих інтегрує технологічні та економічні показники у динамічну мультиагентну модель з урахуванням оптимізаційних механізмів, що дозволяє проводити оцінювання раціональності та ефективності організації виробництва та доставки товарного бетону, визначення вузьких місць виробничих та логістичних процесів, прогнозувати показники діяльності бетонних заводів, з урахуванням динаміки ринкових умов та розвитку інфраструктури виробничої й розподільчої мережі.

2. Удосконалено модель планування та оптимізації в логістичному ланцюгу дала змогу врахувати фактори попиту, маршрутів доставки, часових обмежень і виробничих потужностей, що підвищило обґрунтованість управлінських рішень та дозволяє досить повно врахувати можливі варіанти переміщення транспортних засобів у логістиці бетону.

3. Удосконалено модель оптимізації інфраструктури виробничо-розподільчої мережі, що надало можливість виявити конфігурації, які забезпечують найкраще співвідношення між витратами на експлуатацію, транспортом і прибутковістю при змінних сценаріях роботи системи та реалізації проєктів модернізації та розвитку.

4. Дістали подальшого розвитку моделі машинного навчання для аналізу ефективності логістики та якості готового бетону в реальному часі, що засновані на ансамблевих методах машинного навчання, які на відміну від існуючих враховують параметри системи управління замовленнями, IoT-

платформи заводу та автобетонозмішувачів та системи маршрутизації, що дозволяє підвищити ефективність предиктивної аналітики якості та логістики готового бетону.

Апробація матеріалів дисертації. Основні положення, ідеї, висновки дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на міжнародних конференціях: «Multidisciplinary academic notes. Theory, methodology and practice» (Токуо, Япон, 2022); «Комп'ютерно-інтегровані технології автоматизації технологічних процесів на транспорті та у виробництві» (м. Харків, 2022, 2023); V Міжнародній науково-практичній інтернет-конференції (м. Дніпро, 2023); «Сучасний стан досліджень в сфері ІТ» (м. Харків, 2024); «Управління проектами у розвитку суспільства» (м. Київ, 2024, 2025); «Інформаційні системи в управлінні проектами та програмами» (м. Харків – сел. Коблево, 2024); «Сталий розвиток сучасних інформаційних технологій» (м. Харків, 2025); «Integrated Strategic Management, Portfolio, Program, and Project Management» (м. Харків, 2025); Scientific Collection «InterConf» (Amsterdam, Netherlands, 2026)

Публікації. За темою дисертаційної роботи опубліковано 16 наукових праць: 5 статей у наукових фахових виданнях України, з них дві у виданнях, внесених до міжнародної наукометричної бази Scopus, 11 публікацій у матеріалах наукових конференцій.

Структура й обсяг дисертації. Дисертація складається з анотації, змісту, переліку умовних скорочень, вступу, чотирьох розділів, висновку, списку використаних джерел та додатків. Повний обсяг роботи становить 187 сторінок друкованого тексту, з них анотація – на 9 стор., зміст – на 3 стор., перелік умовних скорочень – на 1 стор., основний текст – на 146 стор., список із 150 використаних джерел – на 20 стор., додатки – на 3 стор. Дисертація містить 62 рисунки, та 26 таблиць.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дослідження, результати яких викладено в дисертації, виконано на кафедрі автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій Харківського

національного автомобільно-дорожнього університету в рамках виконання науково-дослідних робіт за проєктами 0124U004234 (2024-2025), 0123U104417 (2023-2024).

Практичне значення. Розроблений комплекс моделей та методів реалізований у вигляді інформаційної технології цифрового двійнику для планування та управління виробництвом й логістикою бетонних підприємств, що дозволяє прогнозувати тривалість та режими робіт під час виконання виробничих операцій на бетонних заводах та доставки продукції споживачам і, таким чином, корисно впливати на прийняття рішень, прогнозування ходу робіт та ефективного управління процесами виробництва та логістики, з метою підвищення продуктивності, скорочення простоїв та зниження витрат. Сформовані рішення можуть бути корисним інструментом, який допоможе менеджерам, диспетчерам та інженерам бетонних заводів спланувати свою діяльність в умовах реалізації проєктів розвитку.

Результати дисертаційної роботи впроваджено (Додаток А) у практичну діяльність організацій, що підтверджено відповідними актами: ТОВ «Еталон» (м. Харків) (акт впровадження 15/1 від 15.05.2026), Autostrada (м. Вінниця) (акт впровадження 003214 від 14.05.2026), а також у освітньому процесі Харківського національного автомобільно-дорожнього університету (акт впровадження 838/42 від 07.05.2026).

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СТАНУ Й ПРОБЛЕМ УПРАВЛІННЯ ТА РОЗВИТКУ БЕТОННИХ ВИРОБНИЦТВ ПРИ ВПРОВАДЖЕННІ ЦИФРОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ У МИРНИЙ ЧАС ТА В ОСОБЛИВИХ УМОВАХ

1.1 Стан та проблеми планування, управління й розвитку бетонних виробництв

Наразі будівельна галузь України проходить етап активних змін, особливо у напрямі відновлення та розвитку інфраструктури. Пріоритетними залишаються проекти, пов'язані з безпекою населення, зокрема будівництво та модернізація шкіл із захисними укриттями, споруд подвійного призначення та інших об'єктів цивільної інфраструктури. Триває впровадження масштабних державних програм («Відновлення, «Оселя та цифрова екосистема DREAM), спрямованих на спорудження укриттів і завершення раніше розпочатих будівельних об'єктів. Водночас спостерігається посилення участі приватного бізнесу, який інвестує значні кошти у створення нових підприємств з виробництва будівельних матеріалів, зокрема бетону.

Відповідно до даних Національного банку України [3], у березні 2025 року індекс очікувань ділової активності у сфері будівництва становив 52,9, перевищуючи нейтральний показник 50,0, що свідчить про позитивні тенденції у розвитку ринку, окремі індикатори також демонструють зростання, зокрема індекс нових замовлень становив 55,6, ціни на продукцію власного виробництва – 63,0 (рисунок 1.1).

П'ята швидка оцінка завданої шкоди та потреб України (Rapid Damage and Needs Assessment – RDNA5) [4], представлена 24 лютого 2025 року Урядом України спільно зі Світовим банком, Європейською комісією та ООН, формує найбільш повне й актуальне бачення масштабів руйнувань, спричинених війною.

Відповідно до результатів RDNA5, сукупна потреба у реконструкції та відновленні України протягом наступних десяти років оцінюється у 588 млрд доларів США [5].

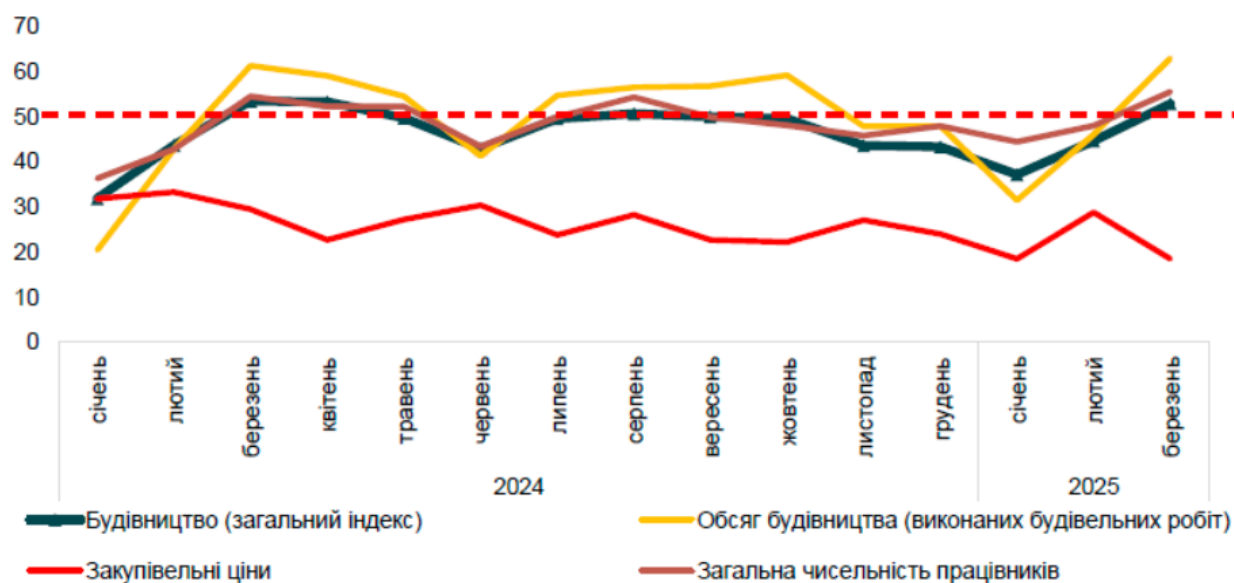


Рисунок 1.1 – Індекс очікування ділової активності у будівельній галузі з 2024 по 1-й квартал 2025 р. за даними [3]

Значних втрат також зазнали транспортна та енергетична інфраструктури. Частка пошкоджень транспортного сектору становить 20,6% від загального обсягу збитків: зруйновано або пошкоджено понад 26 тис. км автомобільних доріг, 344 мости та шляхопроводи, а також суттєво постраждала залізнична інфраструктура [6]. Енергетичний сектор, на який припадає близько 12% загальних збитків, потребує відновлення, вартість якого оцінюється у 90,6 млрд доларів США.

Відновлення знищеного житлового фонду, відбудова пошкодженої інфраструктури та промислових будівель, відновлення робіт на всіх будівельних майданчиках країни призведе до різкого зростання попиту на бетон, що вочевидь буде перевищувати існуючі виробничі потужності [7, 8]. Тому, одним з ключових пріоритетів українських бетонних заводів вже

сьогодні має стати реалізація стратегії та відповідних проєктів розвитку, що спрямовані на підвищення продуктивності без втрати якості.

Постачальники готових бетонних сумішей є одними з значущих учасників у будівельному проєкті [9], а логістика представляє значні виклики у промисловості готового бетону [10]. Ризики у виробництві та логістиці готового бетону можуть бути пов'язані з наступними факторами [11, 12]: неефективне планування роботи бетонозмішувального устаткування та самої доставки; черги або помилки на завантаженні; довгі простой в очікуванні заливки на будівельних майданчиках; неузгодженість дій з клієнтом; запізнення транспорту на завантаження або вивантаження; неоптимальні маршрути доставки; відхилення від маршруту під час доставки тощо. Все це, в підсумку, призводить до ускладнення знайти оптимальний баланс витрат на постачання/транспортування, порушення виробничих планів та до неповного використання продуктивності заводу.

Відповіддю в асфальто-бетонній індустрії та в логістиці сипучих матеріалів для того, щоб вирішити ці задачі та керувати своїми виробничими операціями з більшою реакцією на ризики є перехід на використання технологій Industry 4.0 та 5.0 – цифрових двійників, промислового Інтернету речей (IoT) та цифрового моделювання [13, 14].

В Україні функціонує понад 300 підприємств з виробництва бетону, загальна виробнича спроможність яких оцінюється приблизно у 12 млн м³ на рік [15]. Значну частку ринку формують шість великих виробників, розташованих у Києві, із сумарною потужністю близько 7 млн м³ на рік. Решта учасників ринку представлені переважно невеликими регіональними компаніями, орієнтованими на обслуговування локального попиту [16]. Через специфіку бетонної продукції, зокрема необхідність транспортування на відстань не більше 50–70 км до місця використання, конкуренція у галузі має переважно регіональний характер.

До початку повномасштабної агресії виробництво бетону в Україні характеризувалося позитивною динамікою розвитку (рисунок 1.2). Після

спаду, спричиненого пандемією COVID-19 у 2020 році, у 2021 році ринок зріс більш ніж на 20%. Проте з лютого 2022 року бетонна галузь, як і сфера будівельних матеріалів загалом, зіткнулася з суттєвими трансформаціями та новими викликами. Основною проблемою стало кардинальне зменшення попиту. За даними Державної служби статистики України, у 2022 році було реалізовано виробів із бетону, гіпсу та цементу у двічі менше ніж у попередній рік. Найбільше постраждав сектор будівництва нового житла, тоді як комерційне будівництво та спорудження інфраструктурних об'єктів підтримувало ринок.

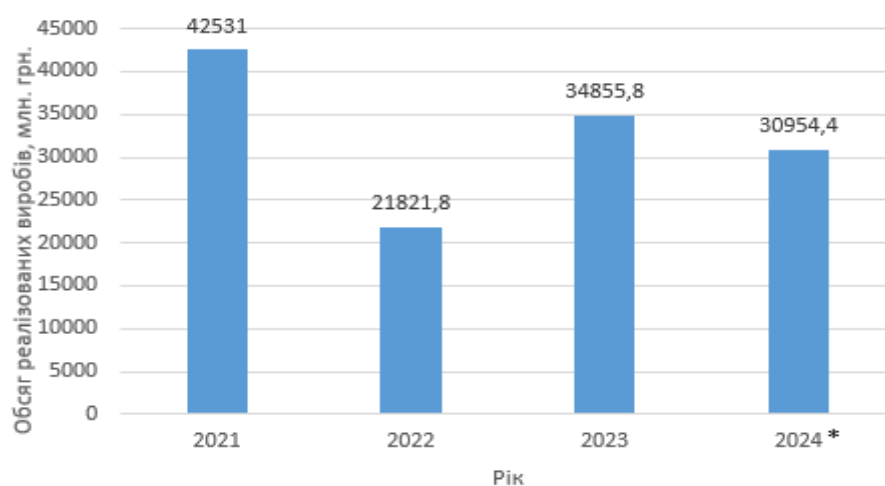


Рисунок 1.2 – Обсяг реалізованих виробів із бетону, гіпсу та цементу, млн. грн.

* - за даними Держстату, дані за 2024 рік представлені за період січень-вересень

У 2023 році ринок демонстрував поступове відновлення, однак на тлі продовження активних бойових дій та відсутності програм відновлення повернення виробництва до показників 2021 року є неможливим.

Ринок первинної нерухомості демонструє найкращі результати в західних областях. У відповідь на загрози воєнного часу з'явилися нові сегменти використання бетону для оборонних потреб: конструкції для захисту об'єктів критичної інфраструктури і модульні залізобетонні укриття, призначені для захисту людей під час повітряних тривоги та артилерійських

обстрілів, фортифікаційні об'єкти, будівельні матеріали для фортифікацій тощо.

До найбільших українських виробників бетону у 2024 році належали: Асоціація «Промислово-будівельна група «Ковальська», ТОВ «Гранд Бетон», ТОВ «Астор Інвест» ASTOR, ТОВ «МКС БЕТОН», ТОВ «ПАРКБУДТЕХ», ТОВ «ПОДІЛЛЯ БЕТОН СЕРВІС», ТОВ «Промбудцентр», CARROT, ПП «Смерека».

Щодо лідерів будівельного сектору то слід відмитити (рисунок 1.3), що у 2025 році основний фінансовий результат забезпечили п'ять компаній (серед яких «Автомагістраль-Південь» (м. Одеса) – 26.7% та Autostrada (м. Вінниця) – 21.9%), що спеціалізуються на дорожньому будівництві – 75% усіх надходжень (36,9 млрд грн) [3]. Ще чотири компанії працюють у житловому та нежитловому будівництві, генеруючи 20% доходу.

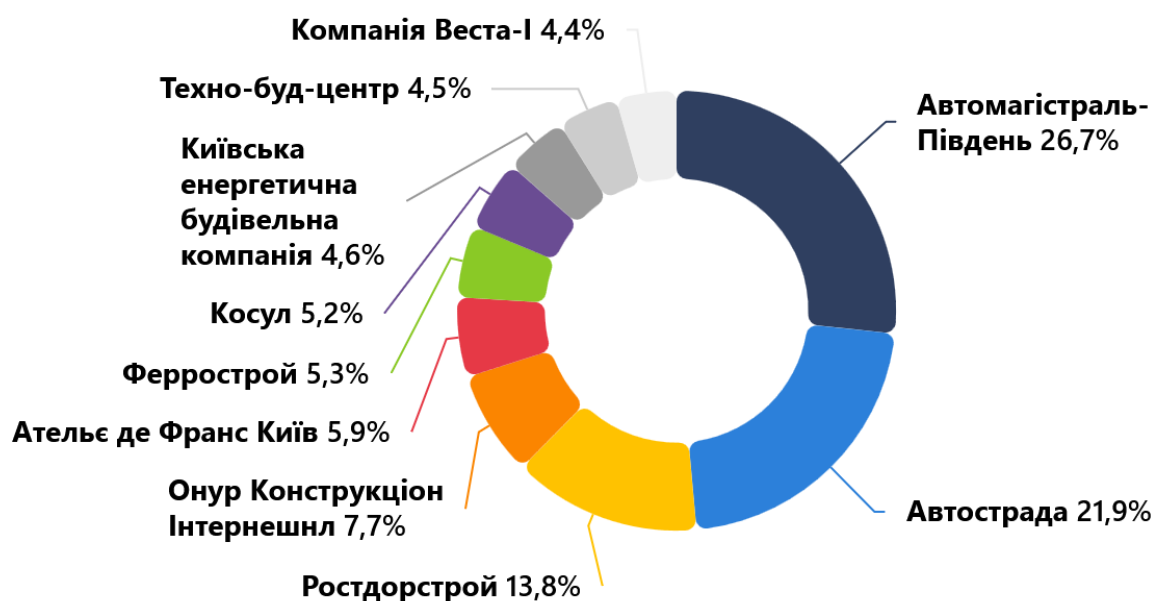


Рисунок 1.3 – ТОП 10 компаній у сфері будівництва (індекс Опендатабот (I-півріччя 2025 р.) [3]

Проекти нацпрограми «Відновлення та модернізація житла та інфраструктури регіонів» налічують понад 100 ініціатив [17]. Серед основних

напрямів будівництва, які розвиваються навіть під час війни, можна виділити такі:

- відновлення пошкоджених будівель і об'єктів інфраструктури;
- житлове будівництво, в тому числі будівництво житла для внутрішньо переміщених осіб;
- промислове будівництво і переоснащення підприємств, що стимулюється релокацією виробництв і змінами в логістиці;
- будівництво об'єктів цивільного захисту, військового і подвійного призначення, захист об'єктів інфраструктури.

Очікуваний попит на бетон на період відновлення складає 21-22 млн куб.м/рік, тому потреба в додаткових потужностях складає 9-10 млн куб.м/рік [15]. Виробництво бетону через високу вартість логістики має бути наближене до місця споживання, в радіусі до 100 км. Північні області України (Київщина, Чернігівщина, Сумщина) можуть бути відбудовані з використанням існуючих потужностей в Києві та Київській області (Асоціація «Промислово-будівельна група «Ковальська», ТОВ «Гранд Бетон», «Астор Інвест», CARROT та інші.). Для відбудови південних і східних областей необхідно побудувати нові бетонні потужності.

Наразі найбільшими драйверами попиту для бетону є інфраструктурне будівництво, зведення фортифікаційних та різноманітних військових захисних споруд, а також роботи з відбудови постраждалих від війни регіонів.

1.2 Цифрові двійники у виробництві та логістиці товарного бетону

Для задоволення вимог збільшення попиту на будівельні матеріали при реалізації проєктів відновлення в Україні необхідним та актуальним етапом розвитку бетонної промисловості є цифрова трансформація бізнес-процесів [18] на основі: розробки та застосування цифрових платформ [19]; розробки та застосування цифрових двійників [20]; здійснення переходу до кіберфізичних систем [21].

Можна виділити такі основні технологічні тренди у сфері цифрової трансформації бетонної промисловості:

1) масове використання інтелектуальних датчиків в обладнанні виробничих ліній, моніторингу транспорту при доставці бетону на будівельні майданчики, а також режимів застосування бетону у будівництві (технології індустріального Інтернету речей) [22];

2) перехід на розподілені ресурси («хмарні» технології») [23];

3) наскрізна автоматизація та інтеграція виробничих та управлінських процесів у єдину інформаційну систему;

4) використання всього обсягу даних, що збираються (структурованої та неструктурованої інформації) для формування аналітики (технології «великих» даних);

5) цифрове проектування та моделювання технологічних процесів, об'єктів, виробів на всьому життєвому циклі від ідеї до експлуатації (застосування інженерного програмного забезпечення);

6) застосування методів штучного інтелекту та машинного навчання для покращення процесів планування, управління та оптимізації в ланцюгу постачання готового бетону.

Поєднання віртуального та фізичного світу за допомогою технології Digital Twins дозволяє виробникам готових бетонних сумішей уникати проблем до того, як вони виникнуть, зменшити збійні ситуації в роботі на об'єктах клієнтів, запобігати простоям і ефективно планувати діяльність і графіки доставки за допомогою моделювання [24].

Поняття «цифровий двійник» Майкл Гривс вперше використав у 2011 році у роботі [25]. У 2014 році Майкл Гривс опублікував статтю, повністю присвячену цифровим двійникам у виробництві [26]. В цій статті автор зазначив, що основа концепції є три базові складові цифрового двійника: реальний продукт у реальному оточенні; віртуальний продукт у його віртуальному оточенні [27]; інформація та дані, що пов'язують фізичний та віртуальний продукт. В статті [28] Майкл Гривс знову звертається до

концепції цифрових двійників та уточнює поняття «фізичного двійника», та зазначає, що має на увазі «розумне» підключення до систем Інтернету речей.

Ключовими елементами цифрового двійника є система промислової автоматизації на базі Інтернету речей для отримання технологічних даних в реальному часі, динамічна імітаційна модель цифрового двійника виробництва та логістичного ланцюжка, розширена предиктивна аналітика для прийняття прогностичних рішень щодо виробництва, логістики та технічного обслуговування [32]. З моделлю та даними можна побудувати потужне цифрове програмне забезпечення-двійник для експериментів, аналізу та взаємодії. Цифровий двійник використовує дані моніторингу в реальному часі (за допомогою технологій промислового Інтернету речей) для динамічного оновлення моделі [33]. Цифровий двійник має імітувати фізичний актив з точки зору поведінки, але з додатковою перевагою створення та перевірки майбутніх прогнозів [34].

При чому, для виробничого циклу виготовлення та доставки готового бетону слід охопити відповідними засобами дистанційного моніторингу також автобетонозмішувачі, що забезпечить достовірними даними про те, що відбувається на кожному етапі логістики доставки бетону та розрахувати необхідні логістичні показники ефективності [35].

Крім того, маючи величезні обсяги історичних даних можна застосовувати методи машинного навчання, щоб аналізувати замовлення кожного окремого клієнта та визначати закономірності: коли та в який час клієнт підтвердив або скасував замовлення; який додатковий обсяг замовив клієнт; яка ймовірність скасування; яке було запізнення транспорту або затримки на завантаження або вивантаження. Загальна мета такого аналізу полягає в тому, щоб точно налаштувати планування виробництва та транспортування (попереднє планування) для майбутніх змін і днів: коли знадобиться більше вантажівок; де потрібно зменшити місткість автопарку; уникнути простою вантажівок і надмірних затримок через недостатню кількість ресурсів.

Розробка та застосування цифрових двійників базується на описі поведінки в різних умовах експлуатації реальних матеріалів, виробів, обладнання, технологічного процесу та кіберфізичних систем.

Цифровий двійник базується на комплексі взаємопов'язаних математичних моделей з високим рівнем адекватності реальним об'єктам і процесам. Крім того, підприємство представлено не набором розрізнених цифрових двійників, а всебічним моделюванням, що охоплює весь виробничий процес [36].

Причому для бетонних заводів важливо створювати цифровий двійник не тільки виробництва але і логістиці. Тому імітаційні моделі, що формують цифровий двійник, повинні враховувати інтеграцію даних з виробничої та транспортної системи в режимі реального часу (рисунок 1.4). Таким чином, сигнали від різних датчиків на виробництві та транспорті надходять та формують великі багатовимірні дані, що записуються до бази.

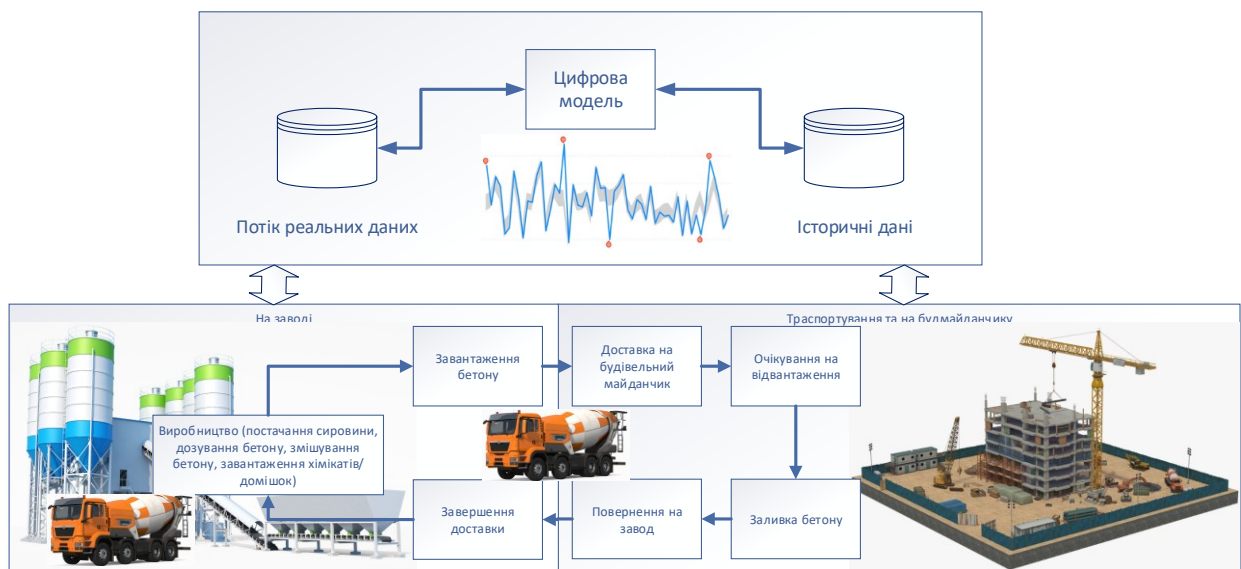


Рисунок 1.4 – Цифровий двійник у виробництві та логістиці бетонного заводу

Цифровий двійник (модель) будується на історичних даних, що пройшли очищення та обробку [37]. У режимі реального часу цифрова модель

аналізує дані, що надходять, і реєструє розбіжність реального і очікуваного значення.

Ключовим елементом технології цифрового двійнику в логістиці є централізація всіх підрозділів планування та диспетчеризації. Замість самостійного планування на місцевому рівні централізація розблокує синергію планування та управління для всієї мережі бетонних заводів та установок, складів та будівельних майданчиків.

Аналітика даних і машинне навчання відіграють ключову роль у вдосконаленні конкретних виробничих процесів [38]. Наприклад, розумні датчики можуть допомогти підрядникам на будівельних майданчиках, які хочуть отримати показники міцності бетону в режимі реального часу на робочому місці [39]. Це важлива інформація для них, оскільки різні будівельні операції, такі як видалення опалубки та додаткове натягування, не можуть бути розпочаті, якщо не буде досягнуто певної міцності бетону під час його схоплювання та твердіння протягом перших кількох днів після укладання [40].

Слід зазначити, що основним методом планування виробництва готової бетонної суміші є Just-in-Time (JIT), який використовується саме через швидкопсувність кінцевого продукту [41]. Термін життя товарного бетону не має перевищувати 2-3 години від моменту його виробництва на заводі до використання на будівельному майданчику, і це при умові його безперервного перемішування в міксерному барабані спеціальних транспортних засобів – автобетонозмішувачів [42].

Слід зазначити, що сьогодні багато компаній використовують мобільні або частково мобільні бетонозмішувальні установки [43]. Це економічно вигідне рішення, адже такі установки потребують менших капіталовкладень при купівлі, не вимагають великої кількості обслуговуючого персоналу і забезпечують високу якість продукції (рисунок 1.5).

У кінцеву вартість товарного бетону включено його виробництво та доставку. У межах міста розміщення бетонного заводу поблизу об'єкта іноді неможливе через обмежену площу будівельного майданчику. До того ж у

містах зазвичай є достатня кількість бетонних заводів, які забезпечують конкурентну ціну. У таких умовах замовники орієнтуються на оптимальне співвідношення «ціна/якість».



Рисунок 1.5 – Типи бетонних заводів

Якщо будівельний майданчик розташований далеко від міста, виникає велике логістичне плече, що збільшує витрати і час доставки, а це погіршує якість бетонної суміші та ускладнює будівництво [10]. У таких випадках аналізується доцільність встановлення бетонозмішувального заводу поблизу будівельного майданчика з урахуванням необхідного обсягу бетону для проєкту. Важливими факторами є інвестиції, наявність транспорту та інші логістичні аспекти.

На ринку бетону також спостерігається тенденція до укрупнення бізнесу [44]. Для підвищення стабільності компанії створюють групи, холдинги чи вертикально інтегровані структури, які об'єднують виробників цементу, бетону та підприємства суміжних галузей. Такий підхід дозволяє зміцнити позиції в регіоні та розширити географію поставок продукції.

Таким чином, сучасні умови виробництва бетону висувають низку викликів, пов'язаних із мобільністю виробничих потужностей, логістикою доставки та економічною доцільністю інфраструктурних рішень [45]. Мобільні та стаціонарно-мобільні бетонозмішувальні вузли дозволяють адаптувати виробництво до географічних змін попиту, але потребують

ретельного планування розташування і використання, щоб уникнути перевитрат і забезпечити якість продукції.

Водночас віддалені будівельні об'єкти вимагають зваженого рішення щодо розміщення вузлів, що враховує логістичні витрати, час доставки, та обсяги проекту. Окрім того, розвиток ринку бетону, зокрема створення великих інтегрованих компаній, посилює конкуренцію, стимулюючи оптимізацію виробничих і логістичних процесів [46].

Сам виробничий процес (рисунок 1.6) складається з постачання сировини, дозування бетону, змішування бетону, завантаження хімікатів/домішок [47] і, нарешті, розвантаження бетону на вантажівки для доставки на будівельний майданчик (рисунок 1.7).

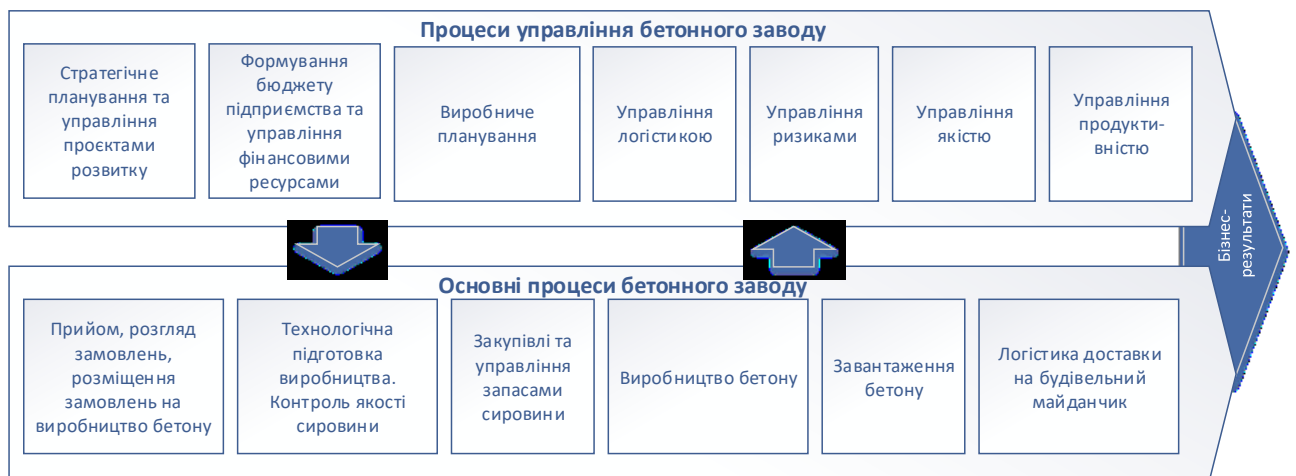


Рисунок 1.6 – Виробничі процеси та процеси управління бетонного заводу

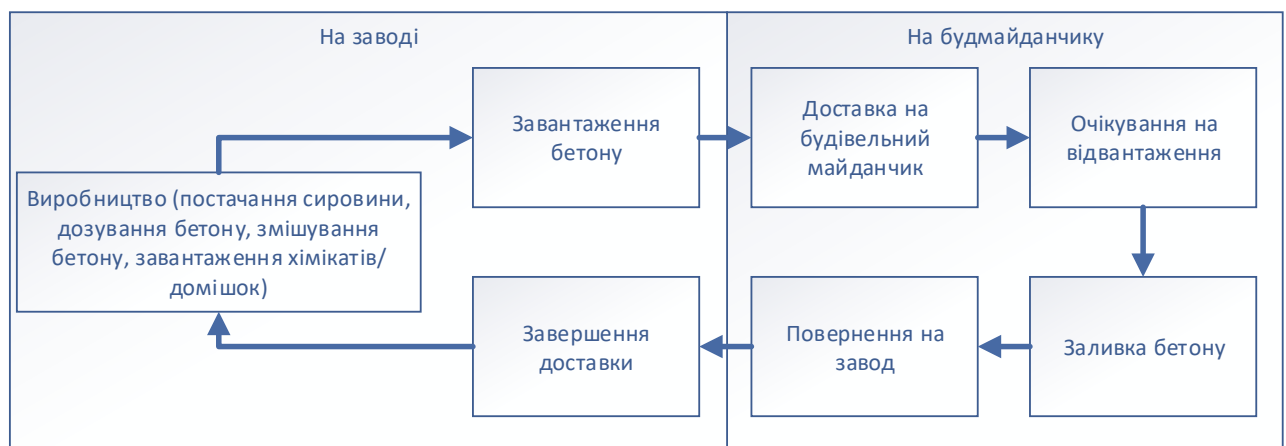


Рисунок 1.7 – Цикл виробництва та доставки бетону

Такий режим планування потенційно гарантує, що клієнт отримає продукцію вчасно, належної якості та в потрібній кількості, щоб зменшити втрати на місці, а також підвищити продуктивність виробничого процесу. Будь-яка незначна затримка у виробництві спричиняє затримки доставки, тому важливо застосувати метод реагування на ризики, щоб запобігти таким збоям у виробництві.

Таким чином, зменшення часу, коли не відбувається заміс суміші та завантаження її в вантажівки доставки, а також заливка у клієнта – це завжди вузьке місце в загальному процесі постачання бетону і воно дуже залежить від різних ризиків [48, 49]. На рисунку 1.8 показані основні напрямки та фактори ризику, що слід враховувати у бізнес-процесі вироблення та поставки готового бетону. Це може бути неефективне планування роботи бетонозмішувального устаткування та самої доставки, черги або помилки на завантаженні, довгі простой в очікуванні заливки на будівельних майданчиках, неузгодженість дій з клієнтом, запізнення транспорту на завантаження або вивантаження, неоптимальні маршрути доставки, відхилення від маршруту під час доставки тощо.



Рисунок 1.8 – Управління ризиками при виробництві готового бетону

Все це, в підсумку, призводить до порушення виробничих планів, що призводить до неповного використання продуктивності заводу. Стратегією

підвищення продуктивності для виробника бетону звісно може бути купівля та розгортання нових бетонозмішувального устаткування та транспорту для забезпечення збільшеного об'єму замовлень але це значні інвестиції та достатньо ризиковано, враховуючи динаміку ринку. Тому швидко та з мінімальними витратами підвищити загальну продуктивність підприємств з виготовлення готового бетону можливо саме завдяки впровадження сучасних інформаційних технологій за вимогами Industry 5.0 [50] та підвищенню продуктивності доставки. Дійсно, у бетонного заводу є потенціал для підвищення власної продуктивності за рахунок мінімізації простою в робочий час.

Будівельна індустрія вже бачить цінність в управлінні ризиками та підвищенні ефективності в тому, як вони виконують проекти з використанням технологій Industry 5.0 – цифрових двійників, промислового Інтернету речей та цифрового моделювання [51]. Таким чином, пропонується реалізація проектів розвитку підприємств з виготовлення готового бетону на базі цифрових двійників. Двома ключовими елементами цифрового двійника є динамічна імітаційна модель і дані, які відображають поточний стан реальної системи [52]. З моделлю та даними можна побудувати потужне цифрове програмне забезпечення-двійник для експериментів, аналізу та взаємодії [53]. Цифровий двійник використовує дані моніторингу в реальному часі (за допомогою технологій промислового Інтернету речей) для динамічного оновлення моделі. Для повного охоплення виробничого циклу виготовлення та доставки готового бетону важливо також забезпечити дистанційний моніторинг роботи автобетонозмішувачів. Це дозволить отримувати точні дані про перебіг кожного етапу логістичного процесу та здійснювати обґрунтовані розрахунки ключових логістичних показників ефективності.

Таким чином, впровадження проекту створення цифрового двійника на бетонному заводі вирішує такі задачі: моніторинг продуктивності виробничого процесу та логістики доставки бетону, прогнозна аналітика для визначення вузьких місць виробничих та логістичних процесів, скорочення

часу простою заводу та клієнта, предиктивне технічне обслуговування устаткування, оптимізація ресурсів технічного обслуговування та покращення працездатності та продуктивності активів. Якщо підприємство з виготовлення готового бетону починає автоматизувати процеси виробництва та організації доставки та робить їх прозорими, тоді одразу з'являється можливість впливати на більшість факторів циклу доставки і скорочувати час кожного етапу, що в свою чергу призводить до підвищення продуктивності.

1.3 Аналіз методів планування та моделювання процесів виробництва та логістики товарного бетону

Управління бетонними заводами з позицій логістичного підходу [54] потребує вирішення складних завдань, серед яких планування та оптимізація поставок, управління запасами сировини та формування потреб, складання розкладів роботи бетонозмішувальних установок, оптимізація автопарку міксерів та їх маршрутів руху та ін.

Слід відмітити, що невизначеність у виробництві та логістиці готового бетону виникає через низку зовнішніх і внутрішніх факторів [55]. До основних джерел належать:

- коливання попиту – будівельні проєкти можуть мати різні графіки, обсяги замовлень і вимоги до якості бетону, що ускладнює прогнозування;
- транспортні ризики – затори, погодні умови, військові загрози чи обмеження на дорогах можуть впливати на своєчасність доставки;
- залежність від сировини – перебої у постачанні цементу, піску або інших компонентів можуть впливати на виробничі графіки;
- мобільність виробничих потужностей – переміщення мобільних бетонозмішувальних вузлів потребує узгодження з прогнозованим попитом і логістикою, але не завжди можливо передбачити всі змінні.

Підходи до планування виробництва в умовах невизначеності можна умовно поділити на дві ключові категорії: адаптивні та прогностичні [56].

Адаптивні підходи, наприклад, динамічне перепланування, спрямовані на оперативне реагування на зміни у виробничих умовах. Вони дозволяють швидко реорганізувати ресурси та робочі процеси, зменшуючи негативні наслідки від непередбачуваних обставин [57].

Прогностичні підходи, навпаки, орієнтовані на врахування ймовірності виникнення стохастичних подій ще на етапі розробки базового плану [58]. Вони дозволяють створювати стійкіші розклади, що враховують можливі ризики та варіанти їхнього пом'якшення.

Зазначені фактори створюють додаткові труднощі у плануванні та управлінні виробництвом та логістикою готового бетону, що вимагає поєднання проактивних та реактивних підходів для забезпечення стійкості й ефективності виробничо-логістичних процесів.

Таким чином, процеси виробництва та логістики готового бетону характеризуються високим ступенем динамічності, залежністю від зовнішніх умов та ринку, а також жорсткими часовими обмеженнями на доставку матеріалу через його фізико-хімічні властивості [59]. Це вимагає впровадження ефективних методів планування та моделювання, здатних враховувати як виробничі, так і логістичні аспекти системи.

Проведемо аналіз основних підходів до моделювання та планування процесів виробництва та логістики готового бетону (таблиця 1.1). Для цих завдань використовують чотири ключові групи підходів:

1. Аналітичні методи. Ці методи базуються на використанні математичних формул для оцінки різних показників та включають класичні інструменти математичного моделювання й оптимізації. Найбільш розроблені та відомі методи оперативне-календарного планування [60], де використовується інструментарій методів СРМ, PERT [61, 62] та ін. Для завдань оптимізації виробничих та логістичних завдань при плануванні й управлінні бетонними підприємствами можуть бути використані методи лінійного, цілочислового та динамічного програмування [63, 64], а також моделі управління запасами [65], методи теорії масового обслуговування [66].

Ці методи дозволяють формалізувати завдання та отримати оптимальні або близькі до оптимальних рішення за відомих припущень.

Таблиця 1.1 – Порівняльна характеристика підходів до моделювання процесів виробництва та логістики готового бетону

| Підхід | Можливості | Обмеження |
|---------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Аналітичні методи | <ul style="list-style-type: none"> – забезпечують формальне планування (часове, об'ємне); – дають оптимальні рішення при відомих параметрах; – підходять для задач з чіткими обмеженнями | <ul style="list-style-type: none"> – складність у врахуванні динаміки та стохастики; – не враховують поведінкові фактори; – потребують спрощень для розв'язання |
| Інженерне моделювання | <ul style="list-style-type: none"> – візуалізація процесів (наприклад, через BPMN, IDEF0); – ідентифікація неефективних ділянок процесів; – використовується для опису бізнес-логіки | <ul style="list-style-type: none"> – немає прямої підтримки динаміки та часових характеристик; – не враховує стохастичні події та ресурси |
| Імітаційне моделювання | <ul style="list-style-type: none"> – враховує стохастичну, затримки, обмеження ресурсів тощо; – дає змогу аналізувати сценарії роботи в динаміці; – може враховувати економічні параметри й КРІ | <ul style="list-style-type: none"> – потребує значних зусиль на побудову моделі; – вимагає калібрування на основі реальних даних |
| Методи штучного інтелекту | <ul style="list-style-type: none"> – прогноз попиту, оптимізація графіків, адаптивне управління; – робота з великими обсягами даних; – навчання моделей на історичних даних | <ul style="list-style-type: none"> – високі вимоги до якості та обсягу даних; – складність інтерпретації рішень (чорний ящик); – не завжди гарантована оптимальність результату |

2. Інженерне моделювання. Може застосовуватись для побудови структурної схеми бізнес-процесів підприємства, зокрема виробництва й доставки бетону. Використовуються нотації типу BPMN [67] або IDEF0 [68], що дозволяють візуалізувати процеси, ідентифікувати вузькі місця та зони неефективності. Такий підхід зручний для аналізу бізнес-процесів, обґрунтування реінжинірингу й автоматизації але не дозволяє проводити динамічний аналіз чи прогнозувати наслідки змін у системі.

3. Імітаційне моделювання. Дозволяє враховувати стохастичну природу процесів (варіативність попиту, транспортні затримки, прості

техніки) та перевіряти поведінку системи в різних сценаріях [69, 70]. Імітаційні моделі, дозволяють поєднати виробництво, логістику [71], економічні та поведінкові аспекти в єдиній експериментальній моделі. Тому цей підхід є особливо корисним для тестування стратегій планування, оцінки рішень у динаміці, а також верифікації економічних показників.

Імітаційне моделювання є найбільш ефективним підходом для аналізу процесів виробництва та логістики готового бетону, оскільки воно враховує:

- випадковість та динамічність портфелю замовлень;
- різноманітність номенклатури та сценаріїв обслуговування;
- обмеженість ресурсів;
- складні моделі поведінки учасників процесу та взаємозв'язки між

етапами процесу.

На сьогоднішній день сформувалися і найбільш широко застосовуються три основні підходи: дискретно-подійне моделювання, моделі системної динаміки [72] та агентне моделювання [73].

4. Методи штучного інтелекту та машинного навчання. Сучасні системи управління виробництвом і логістикою дедалі частіше інтегрують інтелектуальні підходи для підвищення адаптивності та точності планування [74, 75].

Застосування методів штучного інтелекту може включати:

- прогнозування попиту за допомогою нейронних мереж і моделей часового ряду [76];
- оптимізацію розкладів доставок із використанням генетичних алгоритмів або навчання з підкріпленням (reinforcement learning) [77];
- класифікацію типових сценаріїв замовлень і маршрутизації для прийняття рішень у реальному часі;
- моніторинг параметрів якості бетону при його укладанні [78–80] та інші сценарії.

Інтеграція AI-підходів дозволяє створювати цифрові двійники виробничо-логістичних систем, що забезпечує значно вищу гнучкість і адаптивність до динаміки внутрішнього та зовнішнього середовища.

Проведемо детальний аналіз застосування цих підходів для завдань моделювання процесів виробництва та логістики готового бетону. Проблема доставки бетону – це оптимізаційна задача, яка досліджує оптимальне відправлення вантажівок, задовольняючи деякі обмеження, пов'язані з часом, попитом і доступністю ресурсів [81].

Більшість опублікованої літератури про виробництво готових бетонних сумішей присвячено математичному моделюванню та евристичним методам для зменшення впливу поломок технологічного обладнання, покращення операційних витрат та оптимізації розподілу продукції [55].

Дослідження проблем розподілу обмежених ресурсів та оптимізації вантажопотоків розпочиналися з двох класичних завдань комбінаторної оптимізації – завдання комівояжера (Traveling Salesman Problem, TSP) [82] та завдання маршрутизації транспорту (Vehicle Routing Problem, VRP) [83].

TSP немає сенсу для нашої задачі, оскільки бетонозмішувачі не виконують переміщень між клієнтами. VRP – добре відоме завдання цілочисельного програмування, що відноситься до класу NP-складних задач, для яких зазвичай достатньо шукати наближені рішення [84].

Зазвичай, у реальних завданнях оптимізації виникає множина додаткових обмежень і варіацій, найбільш важливі та актуальні для нашої задачі перераховані нижче: Capacitated VRP (CVRP) – кожен транспортний засіб має обмежену вантажопідйомність; VRP with Time Windows (VRPTW) – кожен замовник має бути обслужений у певне «часове вікно»; Multiple Depot VRP (MDVRP) – використовуються кілька депо для обслуговування клієнтів; Split Delivery VRP (SDVRP) – кожен клієнт може обслуговуватися одночасно декількома машинами.

Оскільки у транспортуванні готової бетонної суміші важливо ефективно задовольняти вимоги клієнтів та дотримуватися їхніх заданих часових вікон

для успішного виконання будівельних проектів то можна розглядати це, як задачу маршрутизації транспортних засобів з обмеженою пропускнуою здатністю з часовими вікнами (CVRPTW), модифіковану характеристиками інших VRP, таких як обмеження розділеної доставки та врахування кількох рейсів [85].

Адекватними математичними моделями завдань оптимального планування перевезень можуть бути відповідні завдання лінійного та динамічного програмування [86, 87] транспортного типу, на вирішення яких у задовільний час є універсальні методи – насамперед симплекс-метод та інші варіанти, що враховують специфіку завдань такого типу (різні ускладнені і видозмінені) [88].

Але у NP-складних задачах важко отримати оптимальне рішення в межах розумного часу виконання для проблем з великою кількістю елементів при використанні точних методів вирішення тому частіше покладаються на методи, що дають можливість отримати наближені рішення. Для цього можуть бути використані різні методи та програмне забезпечення оптимізації, наприклад, CPLEX Optimizer IBM ILOG та інші.

Процедура може бути додатково обмежена залежно від набору операційних та функціональних вимог, і це може бути реалізовано у вигляді різних жадібних алгоритмів [89].

Популярними є також евристичні алгоритми [90], метою яких є знаходження «майже оптимального» рішення протягом розумного періоду часу і до них відносяться: генетичні алгоритми, мурашиної колонії тощо. Математична модель на базі алгоритму мурашиної колонії для побудови маршрутів доставки готового бетону розглядається в роботі [91]. Проте часто дослідники зосереджуються на врахуванні тільки факторів транспортної системи, таких як відстань пробігу транспортного засобу, навантаження та швидкість [92, 93].

Модель екологічного споживання палива для вантажівок при розподілу бетону за допомогою вдосконаленого генетичного алгоритму було запропоновано в роботі [94].

В роботі [95] виконано інтеграцію методів машинного навчання та генетичних алгоритмів для оптимізації бетонних сумішей. Вдосконалений метод навчання з підкріпленням, що сформульований як задача прийняття рішень Маркова, для перевезення готової бетонної суміші представлений в роботі [96].

Найбільш якісні результати при аналізі динаміки процесів виробництва та розподілення бетону дають саме методи імітаційного моделювання, які дозволяють гнучко, повно та наочно відобразити процеси, що протікають у системі [97].

На сьогоднішній день сформувалися та найбільш широко застосовуються три основні підходи: дискретно-подійне моделювання, моделі системної динаміки та агентне моделювання. Більшість досліджень, пов'язаних із моделюванням доставки бетону, використовують інструментарій дискретно-подійного імітаційного моделювання.

Децентралізовані мультиагентні системи та імітаційне моделювання можуть бути використані для вирішення подібних завдань динамічного планування. В роботі [98] автори використовували мультиагентний підхід, як основу для децентралізованої координації, пов'язаної з механізмами координації на основі мурашок.

Вплив різних політик диспетчеризації на процес доставки бетону на базі дискретно-подійної імітаційної моделі розглядається в роботі [99]. Дискретно-подійний підхід до імітаційного моделювання процесів виробництва та транспортування бетону запропонований також в роботі [100]. Але порівняльні результати моделювання в системі Arena з реальними даними виглядають занадто штучними.

В статті [101] представлена імітаційна модель постачання та доставки готового бетону з трьох бетонних заводів на три будівельні майданчики для

визначення вартості та часу в логістиці. Нажаль модель, що розроблено у системі моделювання AnyLogic, не є гнучкою, тому що представлена жорсткою структурою блоків на базі дискретно-подієвого підходу тільки для визначеної кількості заводів та будівельних майданчиків.

В статті [102] розглядається питання проектування цифрового двійника для підприємства бетонної суміші, який використовується для прогнозування вузьких місць процесу, виявлення аномалії та прогнозування збоїв разом із додатковими можливостями моніторингу продуктивності виробничого процесу. Операційну модель цифрового двійника для виробництва тільки одного типу бетону було розроблено в системі моделювання AnyLogic, яка відбиває виробничу частину процесу, не торкаючись логістики, що значно обмежує ефективність від застосування для аналізу ризиків у промисловості бетонної суміші.

У дослідженні [103] розглядається створення імітаційної моделі аналізу використання енергії та викидів у навколишнє середовище. Розглядалися декілька сценаріїв, а саме: зміна продуктивності виробництва бетону; зміна відстані між заводом та будівельним майданчиком; варіація кількістю та швидкістю руху автобетонозмішувачів. Однак, розроблена модель постачання бетону спрямована на інфраструктуру тільки з одним будівельним майданчиком, тому має умовну користь для дослідження реальних завдань транспортування.

Деяка частина робіт, що присвячена виробництву готових бетонних сумішей спрямована на дослідження підвищення якості бетону та зниження витрат. В роботі [104] запропоновано модель прогнозування якості бетону, що засновано на використанні генетичного алгоритму для адаптивного вибору функцій на основі прогнозованої продуктивності при аналізі впливових факторів, а випадковий ліс використовувався для кореляції вибраних характеристик процесу з конкретними показниками якості бетону. У дослідженні [95] представлено методологію оптимізації бетонних сумішей шляхом інтеграції машинного навчання і генетичних алгоритмів. Моделі машинного навчання

використовуються для прогнозування міцності бетону на стиск, тоді як генетичні алгоритми оптимізують вартість суміші за умов обмежень якості.

Вирішення проблеми доставки готової бетонної суміші у вигляді мультиагентної системи з механізмами командної роботи та координації вантажівок запропоновано в статті [105]. Автори займаються питаннями децентралізованого динамічного планування розкладів доставки бетону. Середовище існування агентів-вантажівок виглядає, як умовний простір визначеного розміру, що відповідно ускладнює математичний апарат для розрахунку маршрутів і інших параметрів моделі та відповідно накладає багато припущень, що не дає можливість розглядати розроблену мультиагентну модель корисним інструментом при вирішенні реальних завдань диспетчеризації доставки бетону.

Регресійна математична модель прогнозування продуктивності укладання бетону на будівельному майданчику після його доставки автобетонозмішувачами з бетонного заводу розглядається в роботі [98]. Розглядається множина факторів, що впливають на ефективність процесу укладання бетону, наприклад, продуктивність бетонного заводу, кількість автобетонозмішувачів, що можуть працювати у циклі, відстань між будівельним майданчиком і бетонним заводом, кількість бетону, доставленого автобетонозмішувачами на будівельний майданчик, кількість робітників, залучених до укладання бетону тощо. Імітаційна модель, що використовує запропоновані авторами математичні залежності, була створена за допомогою програмного забезпечення моделювання AnyLogic. Але реалізація моделі, як то слід з роботи занадто умовна, з жорсткою структурою моделі, яка не використовує всіх переваг поєднання дискретно-подієвого та агентного підходів і розрахована на моделювання тільки для одного бетонного заводу та одного будівельного майданчику.

Побудова імітаційної моделі саме для мережі бетонних заводів розглядається в роботі [106]. На роботу бетонних заводів сильно впливає складний стохастичний характер процесів виробництва та доставки бетону

тому автори зосередились на дослідженні законів розподілу для того, щоб задавати час виконання виробничих операцій та транспортування. Цікавим є підхід авторів, що моделює бетонні заводи як такі, що спільно використовують вантажівки та передають замовлення на бетон, коли відбуваються позапланові зупинки на технічне обслуговування. Слід зазначити, що більшість публікацій, пов'язаних з плануванням часу в дорозі транспортних засобів, базуються на детермінованих методах, включаючи умовний час у дорозі для будь-якої даної відстані, посилаючись на норми міського транспорту. Автори намагаючись відійти від такого підходу запропонували використання матриці, яка визначає закони розподілу часу в дорозі відповідно до різних діапазонів відстані між виробництвом та об'єктом і часом доби. Однак, не зважаючи на це підхід залишається не досконалим тим більше, що сучасні засоби моделювання дозволяють підключати геоінформаційні системи та проводити моделювання на реальній транспортній інфраструктурі.

Розподіл готового бетону в деяких публікаціях розглядається як суто проблема маршрутизації транспортних засобів. В роботі [94] розглядається модель оптимізації споживання палива для автобетонозмішувачів мережі бетонних заводів за допомогою вдосконаленого генетичного алгоритму. Модель враховує вплив типу транспортного засобу, навантаження транспортного засобу, швидкість руху транспортного засобу та відстані для побудови маршрутів доставки бетону з метою мінімізації витрат палива. Імітаційну модель для вирішення завдання складання розкладу доставки готової бетонної суміші на будівельні майданчики розглядається в роботі [91], де автори застосували алгоритм оптимізації колонії мурашок.

Завдання моделювання логістики доставки готової бетонної суміші вирішується в роботі [107]. Але нажаль в роботі не визначені особливості моделі, використовувані політики постачання та не наведено результатів моделювання, що не дає змогу оцінити ступінь ефективності та корисності запропонованої моделі.

У роботі [86] пропонується метод оптимізації, заснований на змішаному цілочисельному лінійному програмуванні для планування маршрутів доставки готової бетонної суміші. Формули цільових функцій, що використовують автори публікацій з постановками задач лінійного програмування представляють максимізацію задоволення попиту, мінімальний загальний час у дорозі або відстань, мінімальні експлуатаційні витрати та мінімальний час простою як для вантажівок, так і для будівельних майданчиків. Однак деякі формулювання не відповідають складності реальної проблеми або ігнорують важливі аспекти проблеми, такі як часові вікна та часовий лаг між поставками. Таким чином, такі моделі зазвичай розробляються для академічних цілей, але не є корисними для реального промислового застосування.

Узагальнюючи результати аналізу (таблиця 1.2), можна зробити висновок, що більшість існуючих підходів орієнтовані або на оптимізацію окремих логістичних процесів доставки бетонної суміші, або на моделювання виробничої складової бетонного підприємства.

Значна частина моделей має обмежену гнучкість, використовує спрощені припущення щодо транспортної інфраструктури та недостатньо враховує стохастичний характер процесів.

Аналіз існуючих підходів та методів показує, що найбільш перспективними для задач виробництва та логістики готового бетону є інтегровані підходи, які поєднують методи оптимізації, імітаційного моделювання та геоінформаційні технології, а також забезпечують інтеграцію IoT-засобів моніторингу й підтримують створення цифрового двійника виробничо-логістичної системи мережі бетонних заводів. Це обумовлено необхідністю одночасного врахування стохастичності виробничих процесів, часових обмежень доставки, транспортної інфраструктури та динамічної взаємодії між учасниками системи.

Таблиця 1.2 – Основні підходи до моделювання та оптимізації процесів виробництва і логістики готового бетону

| Підхід / метод | Характеристика підходу | Переваги | Недоліки та обмеження | Застосування у задачах виробництва та логістики бетону |
|-----------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| Класичні задачі маршрутизації та оптимізації | | | | |
| TSP | Оптимізація маршруту одного транспортного засобу між множиною точок | Простота математичної постановки | Не враховує особливості доставки бетону та роботу декількох транспортних засобів | Практично не використовується для задач доставки бетону |
| VRP | Оптимізація маршрутів групи транспортних засобів | Формалізація задач маршрутизації | Висока обчислювальна складність | Базовий підхід для задач доставки бетонної суміші |
| CVRP | VRP з обмеженнями вантажопідйомності транспортних засобів | Врахування місткості автобетонозмішувачів | Не враховує часові обмеження | Планування завантаження та доставки бетону |
| VRPTW | VRP з часовими вікнами обслуговування | Врахування графіків будівельних майданчиків | NP-складність задачі | Один із найбільш релевантних підходів для доставки бетону |
| MDVRP | VRP з кількома депо | Врахування мережі бетонних заводів | Ускладнення математичної моделі | Логістика мережі бетонних заводів |
| SDVRP | Можливість розділеної доставки | Гнучкість постачання великих замовлень | Складність координації транспорту | Доставка великих обсягів бетону кількома машинами |
| Методи математичної оптимізації | | | | |
| Лінійне та динамічне програмування | Формалізація задач оптимізації через систему обмежень та цільових функцій | Отримання точних рішень для невеликих задач | Низька ефективність для великих NP-складних задач | Планування маршрутів та виробничих ресурсів |
| Евристичні та метаевристичні методи | | | | |
| Жадібні алгоритми | Побудова рішення за локально оптимальними правилами | Висока швидкість роботи | Рішення часто далекі від оптимальних | Оперативна диспетчеризація |

Продовження таблиці 1.2

| Підхід / метод | Характеристика підходу | Переваги | Недоліки та обмеження | Застосування у задачах виробництва та логістики бетону |
|-------------------------------|---------------------------------------------------------------|------------------------------------------|--------------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| Генетичні алгоритми | Евристична оптимізація на основі еволюційних механізмів | Отримання близьких до оптимальних рішень | Відсутність гарантії глобального оптимуму | Оптимізація маршрутів, витрат та складу бетонних сумішей |
| Алгоритм мурашиної колонії | Евристичний пошук маршрутів за аналогією з поведінкою мурашок | Ефективність у задачах маршрутизації | Висока залежність від параметрів алгоритму | Побудова маршрутів доставки бетону |
| Методи штучного інтелекту | | | | |
| Машинне навчання | Аналіз та прогнозування параметрів процесів | Робота зі складними залежностями | Необхідність великих обсягів даних | Прогнозування якості бетону та параметрів виробництва |
| Навчання з підкріпленням | Адаптивне прийняття рішень у динамічному середовищі | Можливість динамічного перепланування | Висока складність навчання | Інтелектуальна диспетчеризація доставки |
| Імітаційне моделювання | | | | |
| Дискретно-подійне моделювання | Моделювання послідовності виробничих та логістичних операцій | Детальне відображення процесів | Обмежена адаптивність моделей | Найбільш поширений підхід у задачах бетону |
| Системна динаміка | Моделювання потоків та агрегованих взаємозв'язків | Аналіз стратегічної динаміки системи | Низький рівень деталізації | Аналіз виробничих та ресурсних потоків |
| Агентне моделювання | Моделювання автономної поведінки учасників системи | Гнучкість та адаптивність | Складність реалізації та налаштування | Координація роботи заводів, транспорту та будмайданчиків |

1.4 Методи штучного інтелекту та машинного навчання у цифрових двійниках виробничо-логістичних систем готового бетону

Розвинені методи аналітики великих даних з використанням методів та засобів штучного інтелекту та машинного навчання є відмінною рисою Industrial 4.0 [108].

Реалізуючи переваги підключеного обладнання в рамках Інтернету речей та можливість швидкої реалізації інтелектуальних сценаріїв використання даних моніторингу, підприємства можуть впровадити алгоритми машинного навчання для вирішення цілого комплексу завдань для оцінки та прогнозування технологічного стану об'єкта управління.

Предиктивна аналітика сьогодні найпопулярніша. Застосування предиктивної аналітики для планування на промисловому підприємстві пов'язане з вирішенням наступних завдань:

- ідентифікації виробничих даних для аналізу;
- розробка функціональної архітектури для отримання аналітичних моделей;
- розробка адаптивної аналітичної моделі для процесу, використовуючи розроблену архітектуру даних.

Аналіз існуючих досліджень показав наступні напрями застосування методів та засобів штучного інтелекту (Artificial Intelligence, AI) та машинного навчання (Machine Learning, ML) у виробництві та логістики будівельних матеріалів:

1. Прогнозування попиту, тобто передбачення обсягу замовлень бетону на певний період, а також інтелектуальне управління запасами. В роботі [109] розглядаються питання прогнозування попиту в управлінні ланцюгами поставок на базі методів машинного навчання. Також можна вирішувати завдання підтримання оптимального рівня сировини (цемент, пісок, гравій, добавки) [110]. Роботу [111] присвячено побудові моделі машинного навчання, яка використовує історичні дані про технічне обслуговування та періодичні дані про закупівлі, пов'язані з будівельними матеріалами та обладнанням. Для вирішення цих завдань використовують методи наступні: часові ряди, моделі регресії для дерев рішень, випадковий ліс, градієнтний бустінг [112], нейронні мережі [113, 114].

2. Оптимізація розподілу маршрутів для пошуку найкращих маршрутів доставки бетону з урахуванням часових вікон, часу твердіння

бетону, трафіку та обмежень вантажівок. Для вирішення цих завдань використовують генетичні алгоритми, навчання з підкріпленням.

3. Аналіз ефективності логістики в реальному часі, де метою є оцінка відхилень маршрутів, запізнень, простоїв [74, 115]. Специфікою цих завдань безумовно є застосування технологій Інтернету речей для отримання даних з маршрутів транспорту.

4. Оцінка рентабельності замовлень, тобто в режимі реального часу визначати, наскільки прибуткове кожне нове замовлення [116]. Методи: регресійні моделі, дерева рішень.

5. Сегментація клієнтів та персоналізація, що передбачає виявлення груп клієнтів з різними характеристиками (частота замовлень, відстань, обсяг). Використовується неконтрольоване машинне навчання у вигляді методів кластеризації [117].

6. Прогнозна аналітика для стабільної якості виробничих процесів передбачає інтеграцію AI для моніторингу даних у режимі реального часу з датчиків, встановлених у бетонозмішувачах. Такі моделі в змозі прогнозувати зміни в суміші та автоматично коригувати пропорції інгредієнтів, забезпечуючи стабільну якість у всіх партіях. Також можливо використання систем технічного зору на конвеєрах [118] для контролю включення перероблених заповнювачів та промислових побічних продуктів при виробництві бетону.

7. Моніторинг якості бетону [119] при його укладанні на об'єктах. Вбудовані датчики в конструкціях з готового бетону можуть надавати дані про міцність, температуру та рівень вологості в режимі реального часу [120, 121]. Ця інформація може бути передана системам штучного інтелекту для постійної оптимізації якості [122].

Крім того слід зазначити можливість використання AI для навчання моделей на основі даних імітацій, що дозволяє автоматизувати пошук політик планування, які призводять до мінімальних витрат і максимуму прибутку.

1.5 Аналіз інформаційних технологій планування та управління у виробництві та логістиці бетону

Слід зазначити, що існує низка програмних рішень та інформаційних систем, які автоматизують процеси планування, моделювання, моніторингу та оптимізації логістики доставки бетону.

Такі системи, як правило, включають модулі для: планування графіків виробництва; маршрутизації доставки; управління автопарком бетонозмішувачів; обліку витрат на виробництво та логістику; прогнозування попиту; відстеження виконання замовлень у режимі реального часу. Певна частина систем має розширені можливості моделювання виробничих і логістичних процесів (імітаційне або дискретно-подійне моделювання), а також інструменти для аналітики та прийняття рішень.

На основі аналізу функціональних можливостей та сфери застосування існуючих програмних рішень, що використовуються у виробництві та постачанні готового бетону, доцільно виділити чотири основні класи систем (таблиця 1.3).

Перший клас систем – це системи автоматизації бетонних заводів, що забезпечують управління процесом виробництва бетону: контроль дозування, рецептур, продуктивності, обліку та, у деяких випадках, – базову логістику доставки. Але вони орієнтовані переважно на підвищення точності та ефективності технологічного процесу виробництва. До цих систем слід віднести: COMMANDbatch [123], BatchMaster [124], Jonel Archer [125] та ін.

Другий клас систем – інтегровані в корпоративні ERP-системи модулі для управління ланцюгами постачання, що дозволяють планувати виробництво, вести облік ресурсів, управляти запасами та фінансовими показниками. Але такі рішення охоплюють ширший контекст бізнес-процесів, ніж потрібно виробникам бетону та є складними у впровадженні. До цих систем слід віднести: SAP SCM, Oracle SCM та ін.

Таблиця 1.3 – Загальна характеристика існуючих рішень для планування та управління у виробництві та логістиці бетону

| Система | Фокус | Можливості | Обмеження |
|----------------------------|-----------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| COMMANDbatch | Автоматизація виробництва бетону | Управління рецептом, продуктивністю, інтеграція з ERP | Присутній модуль Dispatch але обмежене планування доставки |
| Jonel Archer | Система керування замішуванням бетону | Рецептурне управління, контроль якості, трекінг доставки, інтеграція з GPS | Обмежена масштабованість для великих мереж постачання Слабо виражені аналітичні функції |
| SAP SCM | ERP та управління ланцюгами постачання | Повна інтеграція із закупівлями, запасами, логістикою | Складність впровадження, висока вартість |
| Oracle SCM | ERP-рівень управління ланцюгом постачання | Потужне планування, управління запасами, замовленнями, інтеграція з фінансами | Складна в налаштуванні Потребує високих витрат на впровадження Обмежена деталізація для специфіки бетону |
| Trimble Concrete Logistics | Логістика доставки бетону | Планування маршрутів, GPS, ETA, інтеграція з виробництвом | Потребує даних від сумісного обладнання |
| BCMI | Замовлення і відстеження доставки | Мобільна аналітика, управління замовленнями, контроль доставки в реальному часі | Орієнтована на ринок США |
| ORTEC | Оптимізація логістики | AI-маршрутизація, вікна доставки, геозони | Не адаптована до специфіки бетону без доопрацювання |
| Arena | Імітаційне моделювання систем та процесів | Моделювання виробничо-логістичних систем Аналіз вузьких місць, сценарне тестування Використовує процесор SIMAN і мову моделювання | Орієнтована на дискретно-подійні моделі |
| FlexSim | Візуальне імітаційне моделювання систем та процесів | Потужна 3D-візуалізація, інтеграція з реальними даними, підтримка складної логіки | Орієнтована на більш на виробничі системи Менш гнучкий у поєднанні парадигм моделювання |
| AnyLogic | Імітаційне моделювання систем та процесів | Інтеграція різних підходів: комбінування дискретно-подійного, системної динаміки та агентного моделювання дозволяє створювати складніші моделі Динамічне моделювання, цифрові двійники, аналітика, сценарії | Висока вартість і потреба у спеціалізованій експертизі |

Третій клас систем – це системи логістики, планування маршрутів та моніторингу доставки в реальному часі. Вони призначені для управління транспортом, оптимізації маршрутів, контролю доставки в режимі реального часу, збору телеметрії тощо. Такі системи можуть інтегруватися з виробничими модулями або працювати автономно. До цих систем слід віднести: Trimble Concrete Logistics [126], BCMI (Material Now) [127], DispatchTrack [128], ORTEC [129] та ін.

Четвертий клас систем – платформи імітаційного моделювання для створення цифрових двійників виробничо-логістичних систем. Орієнтовані на дослідження, проектування та оптимізацію складних динамічних систем за допомогою цифрових моделей. Використовуються для аналізу сценаріїв функціонування виробничо-логістичної системи, оцінки ефективності, виявлення вузьких місць, перевірки різних режимів. До цих систем слід віднести: Arena [130], AnyLogic [131], FlexSim [132] та ін.

AnyLogic – універсальна платформа для імітаційного моделювання, що підтримує три основні підходи: дискретно-подійне, системну динаміку та агентне моделювання [72]. AnyLogic є потужним інструментом, що забезпечує універсальність і гнучкість у створенні імітаційних моделей. Її переваги:

- підтримка агентного підходу: дозволяє моделювати поведінку окремих агентів, що важливо для аналізу процесів у виробництві та логістиці бетону;
- інтеграція різних підходів: комбінування дискретно-подійного, системної динаміки та агентного моделювання дозволяє створювати складніші моделі;
- графічний інтерфейс: інтуїтивно зрозумілий інтерфейс спрощує процес моделювання;
- візуалізація: AnyLogic підтримує 2D та 3D візуалізацію, що дозволяє легко оцінювати модель у дії;
- гнучкість у використанні ресурсів: можливість врахування варіативності запитів, черг та інших ресурсів.

1.6 Висновки за розділом і постановка завдань дисертаційного дослідження

1. Проведений аналіз стану, проблем та методів управління та розвитку бетонних виробництв показав, що перед бетонними заводами стоїть завдання розробки ефективних механізмів планування і управління, які забезпечать: оптимальне розташування виробничих вузлів відповідно до попиту та логістичних обмежень; скоординовану логістику доставки для мінімізації витрат і дотримання якості продукції; гнучке управління виробництвом у контексті змін ринку та потреб проєктів розвитку. Причому комплексне планування та управління дозволить не лише ефективно вирішувати поточні завдання, але й формувати стратегію розвитку, адаптовану до вимог сучасного ринку будівельних матеріалів.

2. Проведений аналіз проблем та особливостей створення цифрових двійників у виробництві та логістиці бетонних заводів показав, що для бетонних заводів важливо створювати цифровий двійник не тільки виробництва але і логістиці, де слід охопити відповідними засобами дистанційного моніторингу також автобетонозмішувачі, що забезпечить достовірними даними про те, що відбувається на кожному етапі логістики доставки бетону та розрахувати необхідні логістичні показники ефективності.

3. Аналіз процесів управління та функціонування бетонних заводів показав, що найбільш ефективним методом дослідження динаміки управління, з урахуванням основних вимог логістики, є метод імітаційного моделювання на основі сучасних мультиагентних технологій, що дозволяє найбільш гнучко, повно та наочно відобразити процеси, що протікають у виробничо-логістичній системі.

4. Таким чином, **науково-прикладна проблема**, яка вирішується в дисертації – розробка моделей, методів та інформаційної технології цифрових

двійників для завдань планування та управління у виробництві та логістики бетонних заводів в умовах змінних ринкових вимог та обмежень.

5. **Наукова гіпотеза дослідження** ґрунтується на тому, що поєднання оптимізаційних моделей, імітаційного мультиагентного моделювання забезпечує глибокий рівень аналізу та обґрунтування рішень у сфері управління виробництвом і логістикою готового бетону.

6. Таким чином, **метою** досліджень є підвищення ефективності планування та управління виробництвом та доставкою бетону в умовах динаміки ринкових вимог, масштабної логістики, обмежень та розвитку виробничої системи.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі **завдання**:

- формування системного логістичного подання процесів управління підприємствами з виробництва та розподілення готового бетону;
- розробка моделі планування та оптимізації в логістичному ланцюгу постачання готового бетону;
- розробка моделі оптимізації інфраструктури виробничої та розподільчої мережі;
- розробка моделей машинного навчання для аналізу ефективності логістики готового бетону в реальному часі;
- розробка імітаційної моделі аналізу процесів виробництва та логістики готового бетону;
- розробка інформаційної технології планування та управління виробництвом та логістикою бетонних підприємств;
- проведення експериментів та впровадження результатів дослідження в практику управління асфальтобетонних підприємств.

7. Подальші дослідницькі завдання, їх взаємозв'язок, отримані результати та підрозділи роботи відображені на рисунку 1.9.

8. Основні результати, представлені в цьому розділі, опубліковані в [133], [134], [135], [136], [137].

Структурні етапи виконання дисертаційного дослідження

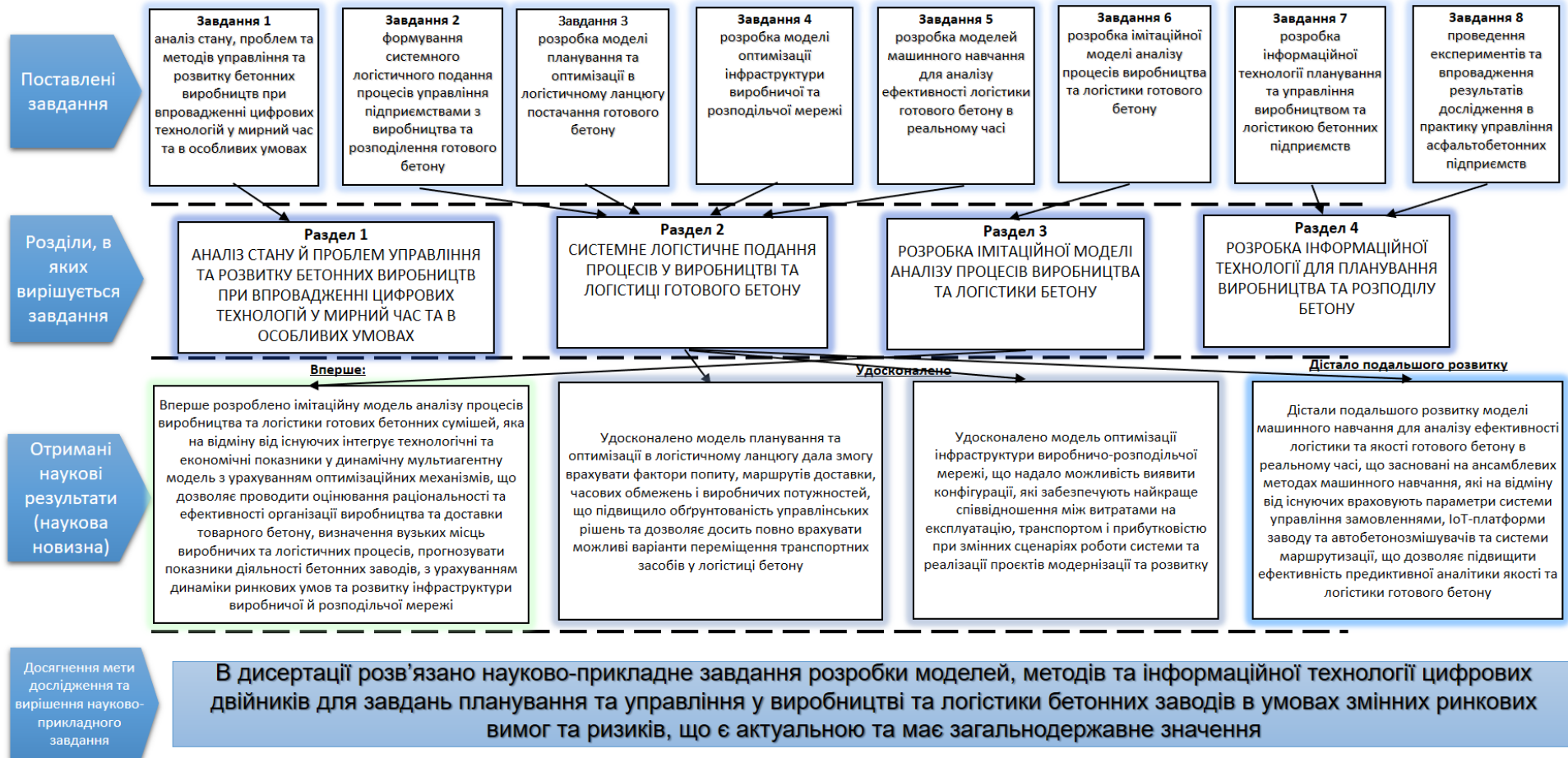


Рисунок 1.9 – Структурні етапи виконання дисертаційного дослідження

РОЗДІЛ 2. СИСТЕМНЕ ЛОГІСТИЧНЕ ПОДАННЯ ПРОЦЕСІВ У ВИРОБНИЦТВІ ТА ЛОГІСТИЦІ ГОТОВОГО БЕТОНУ

2.1 Формування системного логістичного подання процесів управління підприємствами з виробництва та розподілення готового бетону

Управління підприємствами, що займаються виробництвом і постачанням готового бетону, вимагає інтеграції стратегічного, тактичного та оперативного рівнів прийняття рішень. Це включає планування виробничих потужностей, розвиток збутової мережі та оптимізацію логістичних процесів. Системне логістичне подання дозволяє моделювати ці взаємозв'язані процеси, забезпечуючи ефективне управління ресурсами та задоволення попиту клієнтів [139].

Основними компонентами системного подання є наступні:

- прогнозування попиту та планування збуту: оцінка потенційної місткості ринку в кожному регіоні та визначення планових обсягів продажів з урахуванням функції ціноутворення;
- управління виробничими потужностями: аналіз поточної продуктивності бетонних заводів та можливостей її збільшення через модернізацію, враховуючи витрати та очікуваний приріст продуктивності;
- оптимізація логістики доставки: планування маршрутів бетоновозів з урахуванням обмежень на кількість транспортних засобів, часових вікон доставки та інше.

При моделюванні логістики бетону враховуватимемо:

- замовлення;
- ресурси (бетонні заводи, бетоновози);
- бізнес-правила та обмеження (хто кого забезпечує, кількісні квоти перевізників та постачальників, час поставки, календар та ін.)
- витрати (тарифи, штраф та санкції та ін.)

Підприємство може мати власний автопарк для перевезення бетону. Якщо існуючий автотранспортний парк недостатній задоволення попиту всіх своїх споживачів, то підприємство може використовувати послуги сторонньої компанії-перевізника, орендуючи в неї спецтранспорт. Оскільки бетон замовляється у великих кількостях, природно те, що обсяг замовлення кожного клієнта перевищує обсяг бетоновозу найменшої місткості.

Цілі підприємства полягають у наступному:

- задовольнити при менших витратах (мінімізація загальної вартості транспортування) щоденні замовлення всіх своїх клієнтів;
- оптимізувати використання автотранспорту.

Виробники бетону зазвичай мають регіональний розподіл (рисунок 2.1). Регіон – область, що включає множину клієнтів (будівельних майданчиків), набір транспортних засобів (бетонозмішувачів) власних або з АТП перевізника та один бетонний завод.

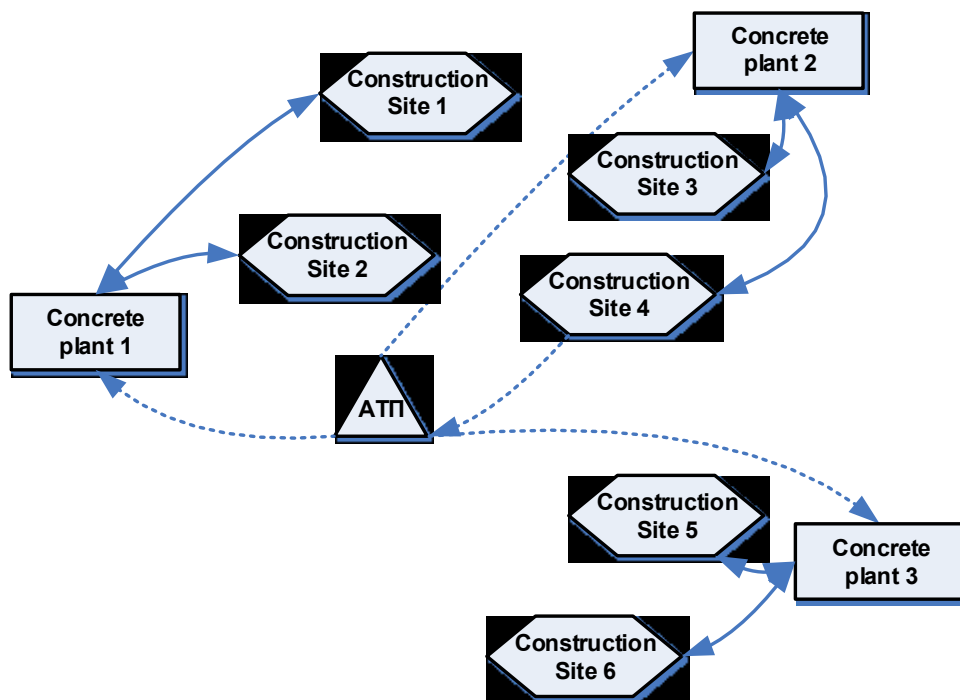


Рисунок 2.1 – Приклад регіонального подання мережі бетонних заводів та збутової мережі

Системне логістичне подання процесів управління підприємствами з виробництва та розподілу готового бетону забезпечує основу для розробки оптимізаційних та імітаційних моделей, які враховують взаємозв'язки між попитом, виробничими потужностями та логістичними обмеженнями. Інтеграція сучасних цифрових технологій таких, як Інтернет речей та Digital Twins сприяє підвищенню ефективності та адаптивності таких систем, що є критично важливим в умовах динамічного ринку та зростаючих вимог до якості та своєчасності постачання бетону.

2.2 Багаторівнева модель планування виробництва та логістики товарного бетону

Ключову роль в управлінні потоковими процесами в ланцюжку поставок готового бетону відіграють питання оптимізаційного планування поставок та продажів готового бетону на основі прогнозування попиту, впливу цінових рішень / цін розміщення по регіонах поставки, аналізу «план-факт» та ін. Метою оптимізаційного планування є максимізація різниці між сумарними доходами та витратами на виробництво та розподіл продукції. На виході отримуємо систему взаємопов'язаних планів. Узагальнена схема процесу планування при керуванні виробництвом та логістикою готового бетону представлена на рисунку 2.2.

Таке оптимізаційне планування виробництва та поставок товарного бетону має проводитися на основі прогнозування попиту, поточного стану підприємства та можливостей розвитку, асортиментної політики, впливу цінових рішень та ін. Багаторівнева модель планування (рисунок 2.3) передбачає проведення аналізу та прийняття управлінських рішень на всіх рівнях управління: стратегічному, тактичному та оперативному.

Прийняття ефективних управлінських рішень, що визначають стратегію та тактику функціонування та розвитку виробника бетону, можливе лише за

наявності гнучкої оптимізаційної системи, що враховує багатокритеріальність, динаміку та невизначеність.

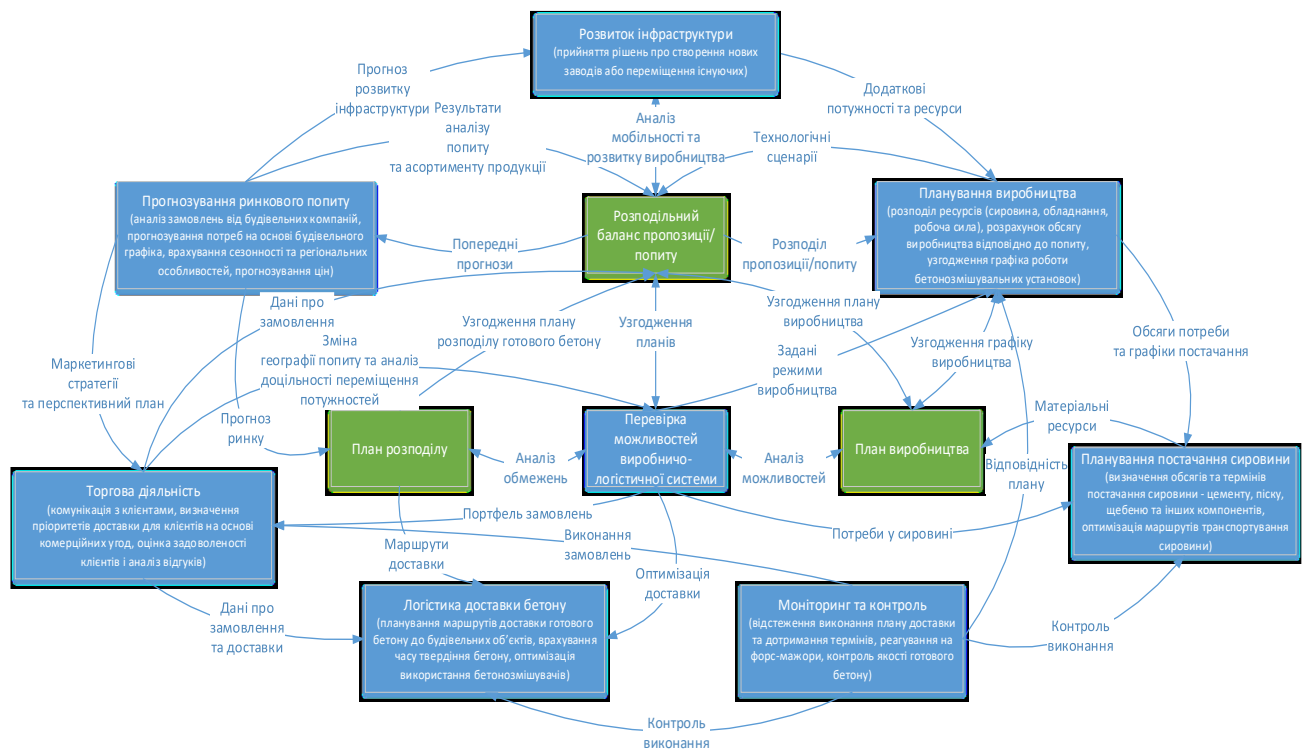


Рисунок 2.2 – Узагальнена схема процесу планування виробництва та логістики готового бетону

Вхідними даними для планування стають замовлення від будівельних компаній, дані про запаси та доступність сировини, потужності виробничих ліній та інші. Таким чином, коли замовлення на бетон надходять на завод, менеджери стикаються з труднощами у швидкому складанні належного графіка виробництва та доставки через необхідність врахування великої кількості факторів.

До таких факторів належать: обсяг, терміновість замовлення, особливо враховуючи безперервність доставки та заливки бетону на будівельному майданчику; якість та властивості бетону у замовленні, що може вимагати конкретних характеристик та потребувати регулювання рецептури виробництва або застосування нових сумішей; пріоритетність замовлень,

оскільки необхідно враховувати, які замовлення є критично важливими для завершення будівельних робіт; можливості виробничих потужностей та їх здатність оперативно виготовляти суміш, що вже залежить від поточного графіка роботи; транспортні ресурси – кількість доступних одиниць в власному автопарку, можливість залучення транспорту перевізників, маршрути доставки, відстань до об'єкта й дорожні умови, що впливає на розрахунок часу і витрат; логістичні обмеження, а саме синхронізація графіка доставки з графіком роботи будівельного майданчика, уникнення заторів або запізнь; наявні запаси, можливості та оптимізація постачання сировини.



Рисунок 2.3 – Багаторівнева модель планування виробництва та логістики готового бетону

Тому ефективно вирішення цих завдань вимагає впровадження систем планування, які здатні враховувати всі змінні, моделювати можливі сценарії та швидко адаптуватися до змін у режимі реального часу.

Формування розподільного балансу пропозиції/попиту виступає центральним елементом процесу планування, оскільки це потребує забезпечення ефективного використання виробничих ресурсів і задоволення потреб клієнтів через аналіз даних та моделювання з узгодженням графіків виробництва бетону, оптимізацією постачання сировини та маршрутів доставки готового бетону.

Важливу роль виконує блок моніторингу та контролю: відстеження процесу доставки та дотримання термінів; розрахунок показників ефективності; внесення змін у графіки за потреби та ін.

2.3 Концептуальні положення щодо створення цифрового двійника виробничо-логістичної системи бетонного заводу

У сучасних умовах підвищеної складності виробничо-логістичних процесів та обмеженості ресурсів цифрові двійники стають ключовим інструментом для управління виробництвом і транспортом. Цифровий двійник бетонного заводу визначається як інтегрована кіберфізична система, яка відтворює всі суттєві параметри виробничо-логістичної діяльності підприємства у віртуальному середовищі та забезпечує підтримку прийняття рішень на основі даних.

Концептуально цифровий двійник можна представити як реалізацію трьох взаємопов'язаних рівнів (рисунок 2.4):

1. Фізичний рівень – включає технологічне обладнання бетонного заводу, IoT-пристрої для моніторингу стану обладнання та транспортних засобів, GPS-трекери, датчики температури й вологості, системи контролю якості суміші тощо.

2. Інформаційний рівень – забезпечує збір, агрегацію та збереження даних від сенсорів та інших систем керування (SCADA, MES/EAM). Тут важливими є протоколи інтеграції (MQTT, REST API) та інтеграція з корпоративною базою даних компанії, що має мережу бетонних заводів.

3. Аналітико-моделюючий рівень – включає імітаційні моделі, моделі оптимізації та прогнозування, а також моделі машинного навчання, які дозволяють проводити сценарне планування, оцінювати ефективність виробництва та логістики, прогнозувати відмови обладнання та оптимізувати використання транспортного парку.

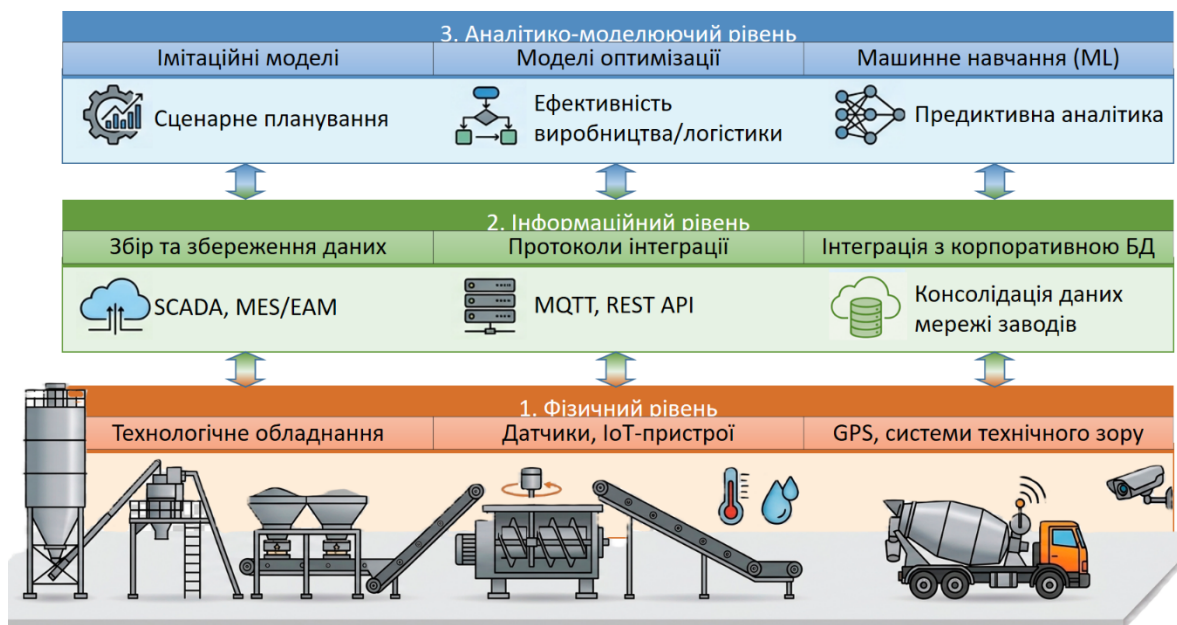


Рисунок 2.4 – Структурна схема цифрового двійника бетонного заводу

Важливим концептуальним положенням є інтеграція цифрового двійника із зовнішніми інформаційними системами підприємства: ERP (управління ресурсами і замовленнями), CRM (взаємодія з клієнтами), WMS (управління складськими запасами), TMS (моніторинг і оптимізація транспорту). Це забезпечує замкнутий цикл «замовлення – виробництво – доставка – зворотний зв'язок», де всі дані відображаються у цифровій моделі.

Тож, на бетонному заводі датчики Інтернету речей встановлені на критично важливому обладнанні для моніторингу таких параметрів, як

температура, вібрація, тиск, витрати та інші, у режимі реального часу. Ці датчики передають дані бездротовим способом до шлюзів, використовуючи надійні радіотехнології, наприклад LoRaWAN. Шлюзи безпечно надсилають дані на хмарну платформу, де вони організовуються та обробляються через мережевий рівень. Потім система надає практичну інформацію через зручну панель інструментів, дозволяючи операторам заводу виявляти проблеми на ранній стадії, планувати прогнозне обслуговування та зменшувати непередбачувані простої, одночасно підвищуючи загальну ефективність та безпеку.

Таким чином, концептуальна основа цифрового двійника виробничо-логістичної системи бетонного заводу полягає у створенні багаторівневої інтегрованої інформаційної платформи, яка здатна об'єднати дані фізичних процесів, управлінських систем і аналітичних моделей. Це створює передумови для підвищення ефективності управління, зниження витрат і реалізації стратегій відновлення інфраструктури в умовах обмежених ресурсів.

Розглянемо структуру кіберфізичної системи IoT бетонного заводу детальніше.

2.3.1 Фізичний рівень цифрового двійника бетонного заводу

Фізичний рівень являє собою комплекс сенсорів, виконавчих механізмів, контролерів та пристроїв збору даних, інтегрованих у виробниче обладнання бетонного заводу. Така структура формує кіберфізичну систему IoT, що забезпечує відображення реального стану виробничих процесів у цифровому середовищі.

Технологічні вузли бетонного заводу включають:

- силоси для цементу і добавок;
- систему дозування інертних матеріалів;
- водяні та хімічні дозатори;

- змішувач бетонної суміші;
- транспортні механізми (конвеєри, елеватори, клапани, шнеки);
- автоматизовану систему завантаження автобетонозмішувачів.

Відповідно, структура IoT передбачає:

1. Датчики (сенсори): вагові датчики у вузлах дозування цементу, заповнювачів і добавок; датчики рівня в силосах і бункерах; датчики вологості; витратоміри та датчики тиску у водяному та хімічному контурі; датчики температури суміші; датчики вібрації та струму для моніторингу стану електродвигунів; камери (комп'ютерний зір) для контролю якості завантаження.

На рисунку 2.5 приклад встановлення радарного датчику рівня у верхній частині цементних силосів, що дає можливість точного безконтактного вимірювання рівня або об'єму матеріалу в силосі. Вбудований радіомодуль періодично передає невеликі пакети даних про поточний рівень залишку через IoT-мережу на хмарну платформу.

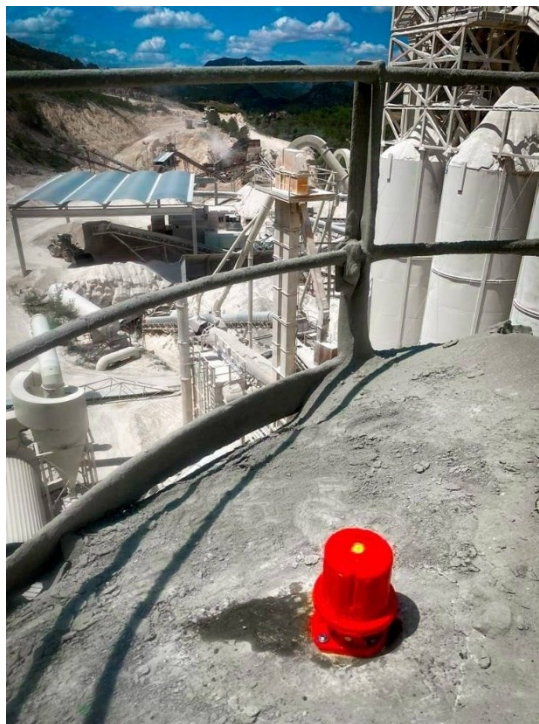


Рисунок 2.5 – Приклад встановлення радарного датчику рівня у верхній частині цементних силосів

2. Виконавчі пристрої: клапани і заслінки на лініях подачі матеріалів; дозуючі пристрої для води й добавок; електродвигуни конвеєрів і шнеків; приводи мішалок та заслінок змішувача; системи автоматичного завантаження автобетонозмішувачів.

3. Рівень керування: PLC-контролери для локального керування процесами; IoT-шлюзи для передачі даних у систему збору та збереження (через MQTT/OPC UA/REST API).

4. IoT для системи логістики: GPS-трекери на автобетонозмішувачах; датчики температури і вологості в барабані; датчики обертання барабана; бортові контролери з передачею телеметрії у TMS і цифровий двійник.

Узагальнено, фізичний рівень виконує дві ключові функції:

- збір даних про параметри виробництва, стан обладнання та транспортних засобів у режимі реального часу;
- виконання команд від вищих рівнів (MES/SCADA, а також цифровий двійник), що дозволяє автоматично регулювати виробничо-логістичні процеси.

У таблиці 2.1 представлена структура кіберфізичної системи IoT бетонного заводу.

2.3.2 Інформаційний рівень цифрового двійника бетонного заводу

Інформаційний рівень є проміжною ланкою між фізичною інфраструктурою виробництва (датчиками, контролерами, транспортом) та аналітико-моделюючим рівнем. Основна його функція – збір, обробка, збереження та передача даних з різних джерел у стандартизованому форматі для подальшої аналітики, моделювання та оптимізації.

До складу інформаційного рівня входять:

1. Проміжні компоненти збору даних: IoT-шлюзи для обробки телеметрії з датчиків у реальному часі; PLC-контролери для локальної обробки сигналів, виконання логіки управління технологічними процесами; SCADA-система, що

забезпечує моніторинг, диспетчеризація процесів, первинна візуалізація даних.

Таблиця 2.1 – Структура кіберфізичної системи IoT бетонного заводу

| Технологічний вузол | IoT сенсори | Виконавчі пристрої |
|----------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|
| Силоси для цементу та добавок | Датчики рівня (ультразвукові, радарні), вагові датчики | Шнеки, клапани подачі матеріалу |
| Бункери інертних матеріалів (пісок, щебінь) | Вагові датчики, датчики вологості | Заслінки, конвеєрні приводи |
| Система дозування | Вагові датчики, витратоміри води і добавок | Дозуючі клапани, насоси |
| Змішувач бетонної суміші | Датчики температури суміші, датчики вібрації, датчики струму двигуна | Приводи мішалки, заслінки на виході |
| Транспортні механізми (конвеєри, елеватори, шнеки) | Датчики швидкості, струму та вібрації | Електродвигуни, приводи заслінок |
| Зона завантаження автобетонозмішувачів | Камери контролю завантаження, датчики положення | Автоматизовані системи відкриття-закриття клапанів |
| Автобетонозмішувачі (логістика) | GPS-трекери, датчики температури і вологості в барабані, датчик обертів барабана, датчики пального | Бортові контролери з можливістю дистанційного керування режимами |
| Загальний моніторинг обладнання | Датчики стану (вібрації, температури, струму), IoT-шлюзи для агрегації даних | Системи сигналізації, аварійного відключення |

2. Механізми комунікації: MQTT/ AMQP/OPC UA: протоколи передачі даних із сенсорів до IoT-шлюзів і серверів збору; REST API для інтеграції із зовнішніми корпоративними системами (ERP, CRM, WMS, TMS).

3. Бази даних: технологічна база даних для збереження даних моніторингу та управління; база даних для даних рівня підприємства

(замовлення, рейси, клієнти); архів історичних даних для предиктивної аналітики.

4. Підсистеми інтеграції: MES/EAM для управління виробничими процесами та технічним обслуговуванням; ERP/CRM/WMS/TMS – корпоративні системи управління ресурсами, клієнтами, складом та транспортом; API-шлюзи цифрового двійника – двостороння взаємодія між аналітичними модулями і реальними процесами; Message Queue/Broker для розподілу потоків даних між модулями цифрового двійника.

Таким чином, інформаційний рівень забезпечує єдиний простір даних для взаємодії всіх елементів системи – від сенсорів до управлінських рішень.

2.3.3 Аналітико-моделюючий рівень цифрового двійника бетонного заводу

Його функції охоплюють моделювання, прогнозування, оптимізацію та підтримку прийняття рішень.

1. Модуль симуляції – імітаційні моделі процесів виробництва та логістики; відтворення сценаріїв зміни попиту, навантаження, простоїв, аварій; аналіз пропускної здатності, часів циклів і «вузьких місць» у системі.

2. Модуль оптимізації – моделі планування виробничих і транспортних ресурсів; оптимізація завантаження обладнання, черговості рейсів і маршрутів доставки; оцінка економічної ефективності (мінімізація витрат, максимізація прибутку).

3. Модуль прогнозування та машинного навчання – прогноз затримок доставки, часу циклу, споживання енергії; виявлення аномалій у роботі обладнання (predictive maintenance); класифікація та регресійні моделі для аналізу логістичних KPI; крім того, можна додати моделі глибокого навчання для розпізнавання візуальних параметрів (камера якості суміші, відео з виробничих ділянок).

4. Візуалізація та підтримка прийняття рішень – панелі моніторингу в режимі реального часу; інтерактивні 3D-моделі виробничо-логістичної мережі; рекомендації для операторів, диспетчерів та менеджерів.

2.4 Модель планування та оптимізації в логістичному ланцюгу постачання готового бетону

Ключову роль в управлінні потоковими процесами в ланцюжку поставок готового бетону грають питання оптимізаційного планування поставок і продажів бетону на основі прогнозування попиту, впливу цінових рішень / цін розміщення по регіонах поставки, аналізу план-факт та ін.

Метою оптимізаційного планування є максимізація різниці між сумарними доходами і витратами на розподіл бетону.

Приймемо, що клієнти регіону можуть обслуговуватися тільки бетонним заводом, прив'язаним до цього регіону.

Транспортні засоби можуть бути або власні, що належать бетонному заводу. Або зовнішні від перевізника – АТП. Кожний транспортний засіб може бути використаний у будь-якому регіоні. Він починає рух з АТП або заводу, до якого він приписаний, і має повернутися туди після відвідування останнього клієнта.

Деякі обмеження, які будуть використані у моделі:

- один продукт (з подальшим поширенням моделі на врахування множини видів готового бетону);
- кожен бетонозмішувач повинен виїхати з АТП порожнім до бетонного заводу для здійснення завантаження;
- кожен транспортний засіб має виїхати завантаженим з заводу та повернутися порожнім до заводу або до свого АТП;
- кожен транспортний засіб відвідує тільки одного клієнта одночасно.

Можливі варіанти переміщення транспортних засобів:

1. Початкове переміщення із АТП на бетонний завод. Воно є першим переміщенням бетоновозу з порожньою ємністю з АТП (до якого він прив'язаний) на бетонний завод для обслуговування будівельних майданчиків (які пов'язані з ним).

2. Поїздка в обидві сторони між заводом та будівельним майданчиком. Вона є певною кількістю циклів поїздки між заводом і будівельними майданчиками.

3. Переміщення від одного заводу до іншого через відвідини будівельного майданчика. Таким чином автомобіль залишає регіон, щоб більше не повертатися туди.

4. Остаточне переміщення від будівельного майданчика до АТП. Воно являє собою остаточне порожнє переміщення від останнього обслуженого будівельного майданчика в АТП, до якого транспортний засіб приписано.

Наведемо математичну модель розподілу бетону між рейсами транспортних засобів з АТП, які доставляють їх до будівельних майданчиків у регіонах обслуговування.

Позначимо:

- R – множина регіонів (регіон – один бетонний завод і пов'язані з ним клієнти);

- I_r – множина клієнтів у регіоні $r \in R$;

- V – множина всіх транспортних засобів (власних і зовнішніх);

- $V_{own} \subseteq V$ – власні транспортні засоби;

- $V_{ext} \subseteq V$ – зовнішні транспортні засоби (АТП);

- A_v – АТП, до якого прикріплений транспортний засіб v ;

- N_v – кількість доступних бетонозмішувачів на АТП;

- d_i – попит на бетон у i -го клієнта, m^3 ;

- Q_v – вантажопідйомність транспортного засобу v , m^3 ;

- c_{vij} – вартість обслуговування рейсу транспортним засобом v від заводу j до клієнта i ;
- c_{v0j} – вартість переміщення пустого бетонозмішувача v від АТП до заводу j ;
- c_{vi0} – вартість переміщення пустого бетонозмішувача v від останнього клієнта i до АТП;
- p_i – ціна продажу бетону клієнту i за одиницю об'єму, грн/м³;
- t_v – сумарний час роботи (переїзди, завантаження, доставка, повернення) транспортного засобу v протягом дня;
- t_{ij} – розрахунковий час доставки бетону клієнту i із заводу j ;
- T_i – максимальний допустимий час першої доставки до клієнта i ;
- Pn_i – штраф за кожне порушення терміну доставки до клієнта i ;
- T^{\max} – максимальна дозволена тривалість роботи транспортного засобу за день;
- M – велике число, яке набагато більше, ніж кількість маршрутів між АТП, бетонними заводами та клієнтами.

Змінні:

- $x_{vij} \in \{0,1\}$ – чи відвідує транспортний засіб v клієнта i з заводу j ;
- $y_{vi} \in \{0,1\}$ – чи здійснює транспортний засіб v початковий переїзд з АТП на завод j ;
- $y_{vr} \in \{0,1\}$ – чи в'їжджає транспортний засіб v у регіон r ;
- $z_v \in \{0,1\}$ – чи виходить транспортний засіб v із свого АТП (тобто активний);
- $z_{vi} \in \{0,1\}$ – чи повертається транспортний засіб v порожнім з клієнта i на АТП;

- $s_{vi} \in \{0,1\}$ – чи транспортний засіб v прострочив першу доставку до клієнта i .

Обмеження:

1. Транспортний засіб може залишити АТП не більше одного разу (тобто або використовується в маршруті, або ні, і тоді він обов'язково залишає АТП):

$$\sum_{r \in R} y_{vr} \leq z_v, z_v \leq 1, \forall v \in V. \quad (2.1)$$

2. Транспортний засіб може відвідати регіон не більше одного разу:

$$y_{vr} \leq 1, \forall v \in V, r \in R. \quad (2.2)$$

3. Задоволення попиту кожного клієнта:

$$\sum_{v \in V} Q_v \cdot x_{vij} \geq d_i, \forall i \in I_r, \forall r \in R. \quad (2.3)$$

4. Якщо транспортний засіб обслуговує хоча б одного клієнта з заводу j , він має виконати початковий переїзд із АТП на цей завод:

$$\sum_{i \in I, r \in R} x_{vij} \geq y_{vi}, \forall v \in V, \forall j \in R. \quad (2.4)$$

5. Якщо транспортний засіб здійснив доставку до клієнта i , можливе його повернення до АТП:

$$z_{vi} \geq \frac{1}{M} \sum_{j \in R} x_{vij}, \forall v \in V, i \in I_r. \quad (2.5)$$

6. Зв'язок між в'їздом у регіон і обслуговуванням клієнтів регіону (якщо транспортний засіб обслуговує хоча б одного клієнта з регіону):

$$\sum_{j \in R, i \in I_r} x_{vij} \leq M \cdot y_{vr}, \forall v \in V, \forall r. \quad (2.6)$$

7. Забезпечення виходу з регіону після в'їзду (якщо транспортний засіб в'їхав у регіон він має після цього або повернутися на АТП (порожнім з останнього клієнта), або перейти в інший регіон через клієнта):

$$y_{vr} \leq \sum_{i \in I_r} z_{vi} + \sum_{r' \neq r} y_{vr'}, \forall v \in V, \forall r. \quad (2.7)$$

8. Обмеження кількості доступних бетоновозів із АТП:

$$\sum_{j \in R} y_{vj} \leq N_v, \forall v \in V_{ext}. \quad (2.8)$$

9. Врахування штрафу за прострочення першої доставки:

$$s_{vi} \geq (t_{ij} - T_i) / M, \forall v \in V, i \in I_r. \quad (2.9)$$

10. Максимальна тривалість роботи транспортного засобу за день

$$t_v \leq T^{\max}, \forall v \in V. \quad (2.10)$$

Так, щоб перевезення за один рейс було тільки до одного клієнта враховано через те, що кожен x_{vij} визначає окремий рейс.

Термін окупності для доходів і витрат може бути різним (наприклад, дохід від продажу бетону отримується пізніше, ніж витрати на перевезення).

Щоб відобразити це в оптимізації ми вводимо коефіцієнти ваг: $\alpha > 0$ – коефіцієнт ваги для доходів; $\beta > 0$ – коефіцієнт ваги для витрат.

Тобто, якщо, доходи мають меншу вагу через ризик затримки платежів, ми можемо поставити $\alpha < 1$. Або якщо витрати важливіші (бо витрачаються відразу), то β можна поставити більше.

Цільова функція максимізувати різницю між доходом і витратами

$$\begin{aligned} \max & \left(\alpha \cdot \sum_{v \in V} \sum_{i \in I_r, j \in R} p_i \cdot Q_v \cdot x_{vij} - \right. \\ & - \beta \cdot \sum_{v \in V} \left(\sum_{i \in I_r, j \in R} c_{vij} \cdot x_{vij} + \sum_{j \in R} c_{v0j} \cdot y_{vj} + \right. \\ & \left. \left. + \sum_{i \in I_r, j \in R} c_{vi0} \cdot z_{vi} + \sum_{i \in I_r, j \in R} Pn_i \cdot s_{vi} \right) \right) \end{aligned} \quad (2.11)$$

Таким чином, це зважування доходів і витрат у цільовій функції за допомогою коефіцієнтів, які відображають цінність грошей у часі або відмінності в пріоритетах окупності.

2.5 Модель оптимізації інфраструктури виробничої та розподільчої мережі

Далі розглянемо модель з урахуванням розвитку збутової мережі.

Позначимо:

- S_r – прогноз потенційних продажів у регіоні r , м³;
- P_r – плановий обсяг продажів у регіоні r , м³;
- $\pi_r(P_r)$ – функція середньої ціни бетону в регіоні r як функція від обсягу продажів P_r ;
- E_r – базова продуктивність бетонного заводу в регіоні r за період, м³/період;

- ΔE_r – приріст продуктивності заводу в регіоні r у разі модернізації, м³;
- c_r^{pr} – витрати на реалізацію проекту розвитку заводу в регіоні r , тис.

грн.;

- B^{pr} – обмеження бюджету на реалізацію проектів розвитку заводів в регіонах, тис. грн.

Змінна:

- $k_r \in \{0,1\}$ – бінарна змінна: $k_r = 1$ – якщо проект модернізації в регіоні r реалізується в плановий період, $k_r = 0$ – інакше.

Основні обмеження:

1. Обмеження на можливі продажі (плановий обсяг продажів не може перевищувати потенційну ємність регіону):

$$0 \leq P_r \leq S_r, \forall r. \quad (2.12)$$

2. Обмеження по потужності заводу (не можна продавати більше, ніж дозволяє потужність заводу, із урахуванням модернізації):

$$P_r \leq E_r + \Delta E_r \cdot k_r, \forall r. \quad (2.13)$$

3. Обмеження за ресурсами на реалізацію проектів модернізації (не можна перевищувати бюджет на розвиток):

$$\sum_{j \in R} c_j^{pr} \cdot k_j \leq B^{pr}. \quad (2.14)$$

Цільова функція максимізувати виручку мінус інвестиційні витрати на модернізацію:

$$\max \left(\sum_r (\pi_r(P_r) \cdot P_r) - \sum_r (c_r^{pr} \cdot k_r) \right). \quad (2.15)$$

Побудуємо модель координації для ухвалення рішення щодо мережі заводів у регіоні (до цього ми вважали, що один завод обслуговує регіон). Ця модель дозволяє визначити, з якого заводу і в якому обсязі задовольнити попит конкретного замовлення, оптимізуючи витрати та враховуючи обмеження ресурсів і логістики.

Позначимо:

- J - множина бетонних заводів у регіоні;
- g_j - наявний обсяг сировини на заводі j , який можна використати для додаткового виробництва;
- θ - норма витрати сировини на виробництво одиниці бетону (за складовими – цемент, пісок, щебінь, домішки, вода);
- p_j – потужність заводу j (максимальний добовий обсяг виробництва);
- c_j – вартість одиниці бетону з заводу j (включно з вартістю виробництва);
- F_j – фіксовані витрати на запуск/модернізацію/активацію додаткового виробництва на заводі j ;
- t_{dj} – прогнозований час виготовлення бетону d_i для клієнту i з сировини на заводі j .

Змінні:

- $h_{ij} \in \{0, d_i\}$ – запланований обсяг постачання замовлення клієнта i з заводу j ;
- $l_j \in \{0, 1\}$ – чи активується додаткове виробництво бетону на заводі j ;
- $u_j \in \{0, 1\}$ – чи замовлення для клієнта i задовольняється повністю.

Обмеження:

1. Задоволення попиту:

$$\sum_{j \in J} h_{ij} \geq d_i \cdot u_i, \forall i \in I_r. \quad (2.16)$$

2. Обмеження постачання з кожного заводу:

$$\sum_{i \in I_r} h_{ij} \cdot \theta \leq g_j \cdot u_j, \forall j \in J. \quad (2.17)$$

3. Обмеження потужності заводів за добу:

$$\sum_{i \in I_r} h_{ij} \leq p_j, \forall j \in J. \quad (2.18)$$

4. Час доставки не повинен перевищувати допустимий термін:

$$h_{ij} > 0 \Rightarrow t_{ij} + t_{dj} \leq T_i, \forall i \in I_r, j \in J. \quad (2.19)$$

Цільова функція максимізувати виручку мінус інвестиційні витрати на модернізацію:

$$\min \left(\sum_{i \in I_r} \sum_{j \in J} h_{ij} \cdot (c_j + c_{ij}) + \sum_r (l_j \cdot F_j) \right). \quad (2.20)$$

Таким чином, ми розглянули комплекс оптимізаційних моделей, що описують динаміку характеристик ланок виробництва та доставки бетону з урахуванням впливу сценарних умов, обмежень та різних керуючих параметрів.

Наведені оптимізаційні моделі формують основу для визначення цільових функцій та обмежень поведінки агентів в імітаційній моделі

логістичної мережі постачання готового бетону. Кожен агент в нашій моделі діє згідно з локальними правилами, сформованими на базі відповідних частин оптимізаційної моделі.

Така модель дозволяє відмовитись від використання централізованих математичних методів оптимізації (цілочисельного програмування чи еволюційних алгоритмів), оскільки оптимальне або наближено оптимальне рішення досягається в процесі взаємодії агентів, що реагують на обмеження середовища, попит та доступні ресурси. Таким чином, імітаційне моделювання з вбудованою логікою, заснованою на оптимізаційних моделях, стає інструментом вирішення задач розподілу, планування і координації у динамічному логістичному середовищі.

2.6 Дослідження моделей машинного навчання для аналізу ефективності логістики готового бетону в реальному часі

2.6.1 Моделі машинного навчання для прогнозування ймовірності затримок в логістиці готового бетону

Одна з цілей побудови цифрового двійника нашої виробничо-логістичної системи забезпечити безперервний контроль за процесом доставки бетону та автоматичну оцінку ефективності логістики. Цифровий двійник має прогнозувати час прибуття автобетонозмішувача на основі поточного положення, швидкості, трафіку, виявляти відхилення від запланованих маршрутів, непередбачувані затримки, простої, та класифікувати причини таких порушень.

Для ефективної роботи таких моделей потрібна інтеграція з: GPS-трекерами (реальне положення, швидкість, маршрут); датчиками ІоТ на бетонозмішувачах (включення/вимкнення міксера, зупинки, температура тощо); плановими даними з системи керування (часи виїзду, маршрути, графіки доставки).

Враховуємо, що дані надходять із різних джерел:

- підсистема управління замовленнями / ERP;
- підсистема трекінгу GPS / IoT-платформа автобетозмішувачів;
- підсистема диспетчеризації.

Розглянемо дані з цих первинних систем, що є джерелами для консолідації їх для моделі машинного навчання. В таблиці 2.2 наведено фрагмент даних з підсистеми управління замовленнями. В таблиці 2.3 наведено дані з підсистеми трекінгу GPS / IoT-платформа автобетозмішувачів. В таблиці 2.4 наведено фрагмент даних з підсистема диспетчеризації. GeoJSON – відкритий формат, призначений для зберігання географічних структур даних, заснований на JSON .

Таблиця 2.2 – Фрагмент структури даних з підсистеми управління замовленнями

| Поле | Тип | Опис |
|-----------------|------------|-----------------------------------|
| order_id | string | Унікальний ID замовлення |
| plant_id | string | Завод, з якого відправлено бетон |
| client_address | string | Адреса об'єкта доставки |
| delivery_window | datetime[] | Інтервал допустимої доставки |
| order_volume_m3 | float | Обсяг замовлення в м ³ |

Таблиця 2.3 – Фрагмент структури даних з підсистеми трекінгу GPS / IoT-платформа автобетозмішувачів

| Поле | Тип | Опис |
|---------------------|----------|--------------------------|
| vehicle_id | string | ID автобетонозмішувача |
| timestamp | datetime | Час реєстрації точки GPS |
| latitude, longitude | float | Координати |
| speed_kmph | float | Швидкість |
| engine_status | bool | Увімкнений двигун чи ні |

Таблиця 2.4 – Фрагмент структури даних з підсистема диспетчеризації

| Поле | Тип | Опис |
|------------------------|----------|-------------------------|
| trip_id | string | ID поїздки |
| route_id | string | Внутрішній ID маршруту |
| planned_route_geometry | geoJSON | Геометрія маршруту |
| actual_route_geometry | geoJSON | Реально пройдений шлях |
| ETA_predicted | datetime | Очікуваний час прибуття |

| | | |
|------------|----------|------------------------|
| ETA actual | datetime | Фактичний час прибуття |
|------------|----------|------------------------|

Розглянемо структуру датасету для навчання ML-моделей на основі даних з первинних систем. Загалом консолідовані дані мають 18 ознак (рисунок 2.6), а цільовою змінною для машинного навчання виступала ознака «is_delayed», тобто прогнозування чи є ймовірність, що замовлення буде запізнене.

| # | Column | Non-Null Count | Dtype |
|----|----------------------------|----------------|----------------|
| 0 | order_id | 500 non-null | object |
| 1 | vehicle_id | 500 non-null | object |
| 2 | plant_id | 500 non-null | object |
| 3 | trip_id | 500 non-null | object |
| 4 | planned_departure_time | 500 non-null | datetime64[ns] |
| 5 | actual_departure_time | 500 non-null | datetime64[ns] |
| 6 | ETA_predicted | 500 non-null | datetime64[ns] |
| 7 | ETA_actual | 500 non-null | datetime64[ns] |
| 8 | route_length_km | 500 non-null | float64 |
| 9 | number_of_stops | 500 non-null | int64 |
| 10 | total_stop_time_min | 500 non-null | int64 |
| 11 | traffic_delay_estimate_min | 500 non-null | int64 |
| 12 | trip_type | 500 non-null | object |
| 13 | client_type | 500 non-null | object |
| 14 | concrete_volume_m3 | 500 non-null | float64 |
| 15 | weekday | 500 non-null | int64 |
| 16 | departure_hour | 500 non-null | int64 |
| 17 | delay_minutes | 500 non-null | float64 |
| 18 | is_delayed | 500 non-null | int64 |

Рисунок 2.6 – Датасет для навчання моделі прогнозування ймовірності затримки

Ми провели кореляційний аналіз скороченого набору даних після видалення ознак, що мають інформаційний характер (рисунок 2.7), на основі отриманої матриці кореляції можна зробити наступні висновки щодо взаємозв'язків між ознаками нашого датасету. Найсильніша кореляція спостерігається між `traffic_delay_estimate_min` та `is_delayed`, що визначає те, що чим більша оцінка системи диспетчеризації щодо затримки в русі, тим вища ймовірність, що замовлення буде запізнене. Також є помітна позитивна кореляція між `client_type` і `route_length_km`, що вказує на те, що певні типи клієнтів – а саме ті, хто займаються житловим будівництвом – отримують замовлення з більшою відстанню доставки, оскільки бетонний завод при обслуговуванні будівництва доріг зазвичай має плече до 30 км. Ознаки

client_type і traffic_delay_estimate_min також мають помітний зв'язок на рівні 0.5, що може свідчити про те, що доставка таким клієнтам частіше проходить через складні маршрути. Значення між trip_type та is_delayed на рівні 0.4 означає, що тип поїздки також впливає на ймовірність затримки, ймовірно, через особливості логістики різних видів маршрутів. Також видно помітну кореляцію між route_length_km та traffic_delay_estimate_min, тобто чим довший маршрут, тим більша ймовірність натрапити на затори. Інші залежності слабші, наприклад, departure_hour має незначну позитивну кореляцію з is_delayed, але вона близька до нуля, як і зв'язок weekday з іншими змінними. Це означає, що час доби та день тижня мають мінімальний або слабкий вплив на загальну картину запізнь. Водночас concrete_volume_m3 слабо, але все ж позитивно корелює з traffic_delay_estimate_min, що може вказувати на вплив великих обсягів на розвантаження або тривалість доставки.

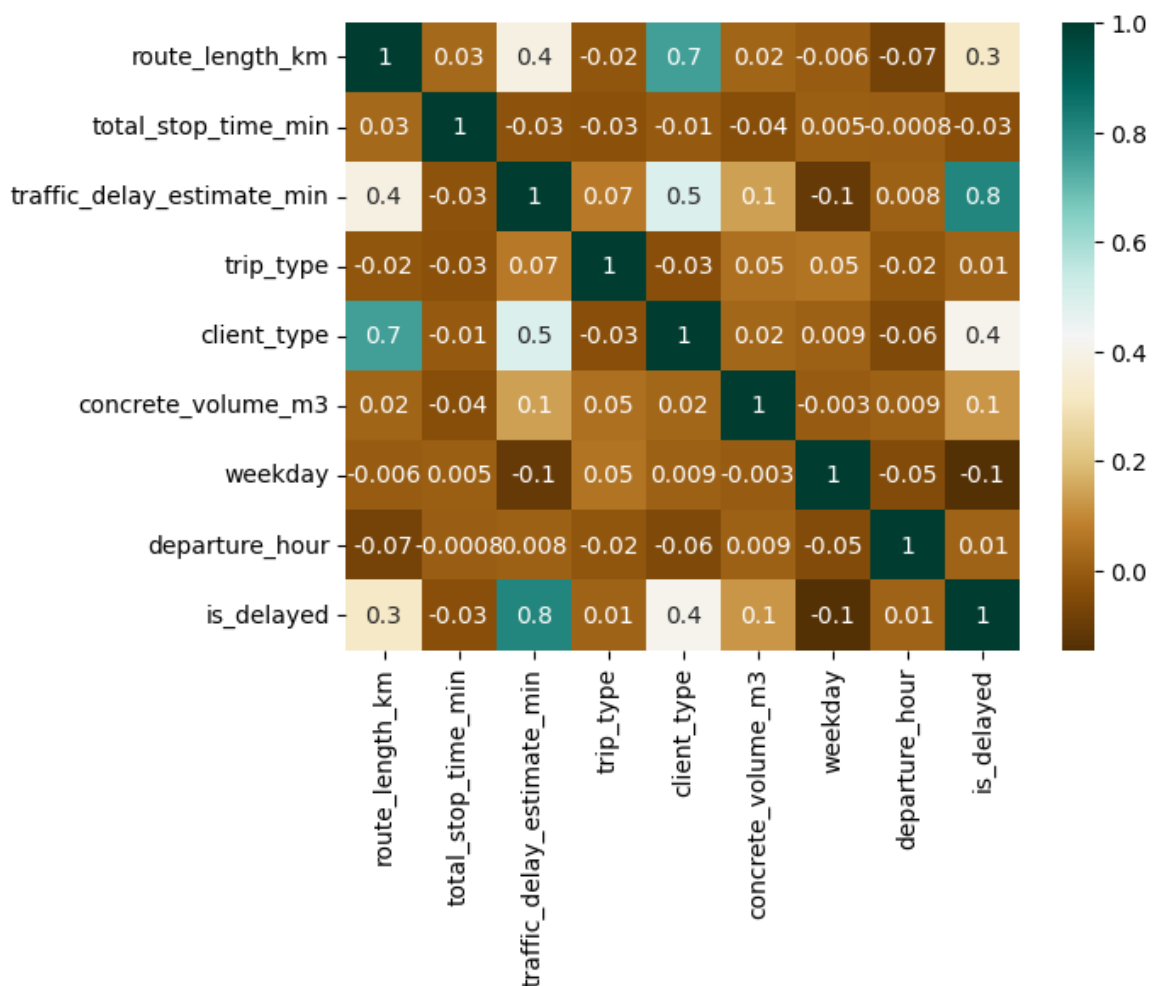


Рисунок 2.7 – Результати кореляційного аналізу факторів

Далі ми дослідили найпоширеніші алгоритми машинного навчання для прогнозування ймовірності затримки, серед яких дерева рішень, випадкові ліси та багатошаровий перцептрон (таблиця 2.5). Random Forest демонструє найкращу загальну якість за всіма метриками.

Таблиця 2.5 – Порівняльна характеристика моделей за метриками

| Модель | Клас | Precision | Recall | F-score | Accuracy |
|----------------|----------------|-----------|--------|---------|----------|
| Decision Tree | Немає затримки | 0.83 | 0.79 | 0.81 | 0.75 |
| | Є затримка | 0.58 | 0.64 | 0.61 | |
| Random Forest | Немає затримки | 0.90 | 0.88 | 0.89 | 0.86 |
| | Є затримка | 0.76 | 0.78 | 0.77 | |
| MLP Classifier | Немає затримки | 0.88 | 0.85 | 0.86 | 0.83 |
| | Є затримка | 0.71 | 0.74 | 0.72 | |

2.6.2 Моделі машинного навчання для контролю придатності бетону під час транспортування

В умовах інтенсивного будівництва та відновлення інфраструктури критично важливо забезпечити стабільну якість готового бетону в момент його укладання. Значна частина втрати оброблюваності відбувається не на заводі, а саме під час транспортування суміші до будівельного майданчика. Тривалість рейсу, температурний режим, інтенсивність перемішування у барабані, вібрації та стан дороги визначають реологічний стан бетону на момент розвантаження.

Традиційно контроль оброблюваності здійснюється окремими точковими вимірюваннями (випробування осідання конуса на заводі та на об'єкті), що не дає безперервної картини зміни властивостей суміші. У запропонованому підході реалізовано цифровий двійник процесу транспортування бетону, який в режимі близькому до реального часу оцінює придатність суміші до укладання, використовуючи дані від датчиків Інтернету речей, встановлених на автобетонозмішувачі, та моделі машинного навчання.

Цільова задача формулюється як бінарна класифікація: за даними телеметрії рейсу необхідно визначити, чи буде бетон придатним до укладання ($is_workable = 1$) чи непридатним ($is_workable = 0$) в момент розвантаження. Додатково оцінюється безперервна цільова змінна – прогнозована оброблюваність суміші (осідання конуса, мм) на момент прибуття.

Для реалізації цифрового двійника транспортування бетону розроблено кіберфізичну IoT-структуру, інтегровану з бортовою системою автобетонозмішувача. Вона включає:

- гіроскоп – вимірює кутову швидкість обертання барабана та кут нахилу, що відображає режим перемішування;
- акселерометр – фіксує лінійне прискорення та вібрації, зумовлені нерівностями дороги та маневрами транспортного засобу;
- датчик тиску у барабані – опосередковано характеризує в'язкість суміші та ступінь заповнення барабана;
- датчики температури – температура всередині барабана та/або навколишнього середовища, що впливає на швидкість втрати оброблюваності.

Бортовий контролер з модулем зв'язку (GSM/LTE) – агрегує дані з датчиків, виконує попередню фільтрацію та передає телеметрію на сервер (через MQTT/REST API) у систему цифрового двійника.

Таким чином формується безперервний часовий ряд вимірювань протягом усього рейсу, який синхронізується з інформацією про замовлення (тип суміші, початковий slump) та умовами експлуатації.

На основі зібраних телеметричних даних сформовано експериментальний датасет рейсів автобетонозмішувачів (таблиця 2.6). Кожен запис (рейс) містить:

1. Характеристики рейсу та суміші:

- тривалість поїздки, хв ($trip_duration_min$);
- тип суміші (клас рухливості, наприклад S2/S3/S4) (mix_type);
- початкова оброблюваність на заводі, мм ($slump_0_mm$);

- температура навколишнього середовища, °C (env_temp_C).

2. Агреговані сенсорні ознаки:

- середній тиск у барабані (pressure_avg);
- середня кутова швидкість обертання барабана (omega_avg);
- середнє модульне прискорення (accel_avg);
- середній кут нахилу барабана (tilt_avg);
- індекс перемішування (mixing_index), що характеризує сумарну інтенсивність обертання барабана за рейс;
- індекс вібрацій (vibration_index), що відображає рівень динамічних впливів від дорожніх умов.

Цільові змінні:

- оброблюваність бетону на момент прибуття на об'єкт, мм (slump_end_mm), виміряна стандартним методом осідання конуса;
- бінарна мітка придатності (is_workable), яка дорівнює 1, якщо slump_end_mm не менше заданого порогового значення (наприклад, 120 мм), та 0 – в іншому випадку.

Таблиця 2.6 – Датасет рейсів автобетонозмішувачів

| Поле | Тип даних | Опис |
|-------------------|--------------------|------------------------------------------------------------------|
| trip_duration_min | Числовий | Тривалість транспортування бетонної суміші, хв |
| mix_type | Категоріальний | Тип бетонної суміші (клас рухливості S2/S3/S4) |
| slump_0_mm | Числовий | Початкова оброблюваність бетонної суміші на заводі, мм |
| env_temp_C | Числовий | Температура навколишнього середовища під час транспортування, °C |
| pressure_avg | Числовий | Середній тиск у барабані автобетонозмішувача |
| omega_avg | Числовий | Середня кутова швидкість обертання барабана |
| accel_avg | Числовий | Середнє модульне прискорення під час руху |
| tilt_avg | Числовий | Середній кут нахилу барабана |
| mixing_index | Числовий | Інтегральний показник інтенсивності перемішування суміші |
| vibration_index | Числовий | Індекс вібрацій, що характеризує динамічні впливи дорожніх умов |
| slump_end_mm | Числовий (цільова) | Оброблюваність бетонної суміші на момент прибуття на об'єкт, мм |

| | | |
|-------------|--------------------|------------------------------------------------------------------|
| is_workable | Бінарний (цільова) | Ознака придатності бетонної суміші: 1 — придатна, 0 — непридатна |
|-------------|--------------------|------------------------------------------------------------------|

Частина ознак формується шляхом агрегації часових рядів (середні, максимуми, індекси), що робить датасет придатним як для класичних моделей, так і для послідовних нейромережових архітектур.

Попередній аналіз включав: оцінку розподілів тривалості рейсів, температури, початкової і кінцевої оброблюваності; аналіз балансу класів is_workable/not workable (частка придатних рейсів становила близько 60–70 %); побудову кореляційної матриці між основними ознаками.

Кореляційний аналіз показав (рисунок 2.8):

- помірну позитивну кореляцію між початковою та кінцевою оброблюваністю ($\text{corr}(\text{slump_0_mm}, \text{slump_end_mm})$ на рівні приблизно 0.7), що відповідає фізичній природі процесу;

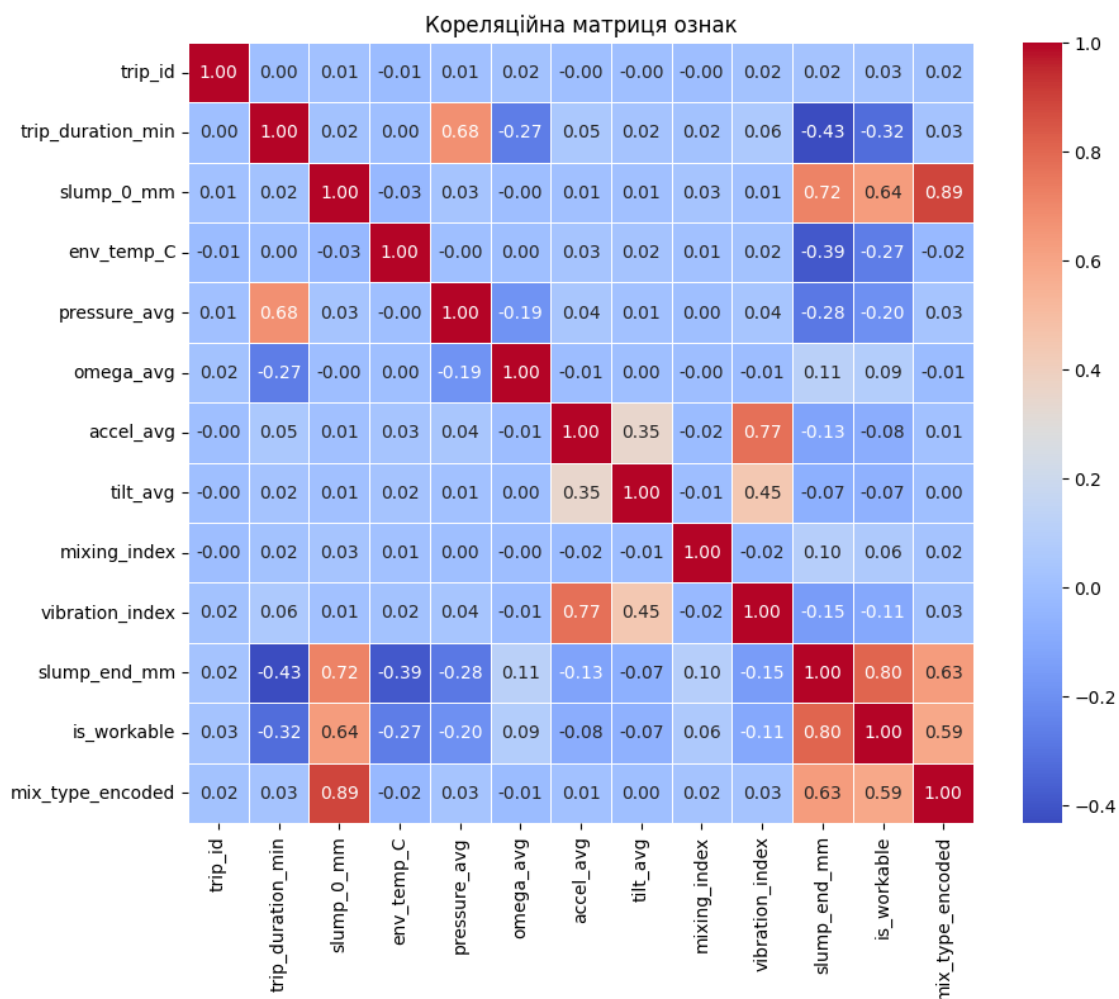


Рисунок 2.8 – Кореляційна матриця ознак моделі контролю придатності бетону під час транспортування

- зв'язок між тривалістю поїздки та середнім тиском у барабані ($\text{corr}(\text{trip_duration_min}, \text{pressure_avg})$ на рівні 0.7);
- сильну, але природну кореляцію між індексом вібрацій та середнім прискоренням ($\text{corr}(\text{vibration_index}, \text{accel_avg})$ на рівні 0.9);
- помітний вплив типу суміші (mix_type) на початкову оброблюваність, але без повної лінійної залежності.

При цьому цільова ознака is_workable помірно корелює з slump_end_mm та слабше – із тривалістю рейсу, температурою і параметрами перемішування, що підтверджує доцільність використання саме нелінійних моделей для прогнозування.

Для оцінки придатності бетону було розглянуто чотири типи моделей:

1. Random Forest – ансамбль дерев рішень як базова інтерпретована модель.
2. MLP (Multilayer Perceptron) – класична повнозв'язна нейронна мережа, що працює з агрегованими ознаками.
3. LSTM – рекурентна нейронна мережа з елементами Long Short-Term Memory, яка враховує часову структуру сенсорних даних.
4. Гібридна модель LSTM+MLP – поєднує LSTM-гілку для часових рядів і MLP-гілку для статичних ознак (тип суміші, початковий slump, зовнішні умови).

Дані було розділено на тренувальну і тестову вибірки у відношенні 80/20 зі збереженням пропорцій класів (*stratified split*). Для нейромережевих моделей числові ознаки попередньо нормувалися. Для MLP, LSTM і гібридної архітектури застосовано регуляризацію (*dropout*, зменшена кількість нейронів) та ранню зупинку (*EarlyStopping* за мінімумом валідаційної втрати) для запобігання перенавчанню.

LSTM та гібридна модель навчалися на псевдопослідовних даних фіксованої довжини (де для кожного рейсу сенсорні вектори дублювалися або

агрегувалися у часові вікна), що дозволяє враховувати динаміку параметрів протягом транспортування.

Порівняння результатів моделей машинного навчання для оцінювання придатності бетону представлено в таблиці 2.7, де 0 – клас «придатний», 1 – клас «непридатний».

Таблиця 2.7 – Порівняння результатів моделей машинного навчання для оцінювання придатності бетону

| Модель | Precision (0) | Recall (0) | F1 (0) | Precision (1) | Recall (1) | F1 (1) | Accuracy | AUC |
|-------------------|---------------|------------|--------|---------------|------------|--------|----------|-------|
| Random Forest | 0.882 | 0.911 | 0.897 | 0.925 | 0.900 | 0.912 | 0.905 | 0.967 |
| MLP | 0.897 | 0.904 | 0.901 | 0.920 | 0.915 | 0.918 | 0.910 | 0.978 |
| LSTM | 0.883 | 0.915 | 0.899 | 0.928 | 0.900 | 0.914 | 0.907 | 0.974 |
| Hybrid LSTM + MLP | 0.902 | 0.886 | 0.894 | 0.907 | 0.921 | 0.914 | 0.905 | 0.976 |

Random Forest (рисунок 2.9) виступає надійною базовою моделлю з високою точністю класифікації (0.905) та $AUC = 0.967$. Вона краще передбачає клас «придатний» (1) з високою точністю (0.925), однак дещо поступається в узагальненні динамічних ефектів, що очікувано для ансамблевих дерев, які працюють з агрегованими статистиками без часової пам'яті.

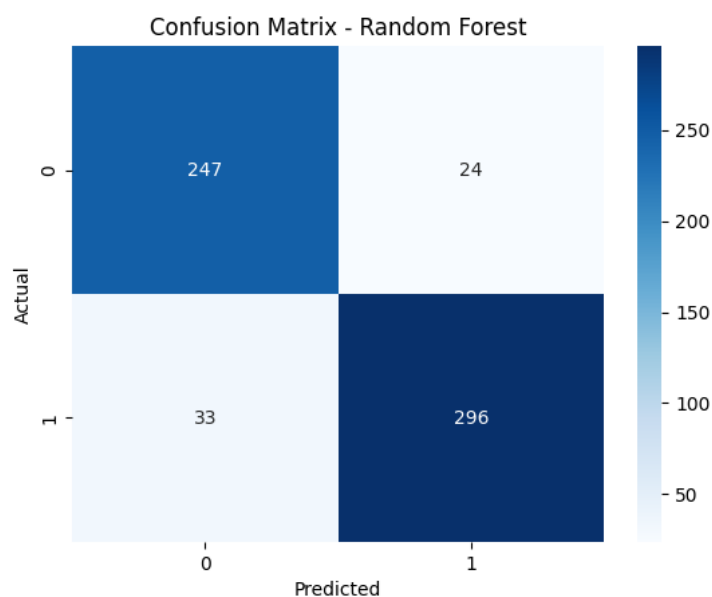


Рисунок 2.9 – Матриця помилок для моделі Random Forest

Для інтерпретації впливу вхідних параметрів на прийняття рішень у моделі Random Forest проведено аналіз важливості ознак (feature importance). На графіку видно, що найбільшу вагу мають характеристики, які безпосередньо пов'язані з початковими умовами замішування та умовами транспортування бетону (рисунок 2.10).

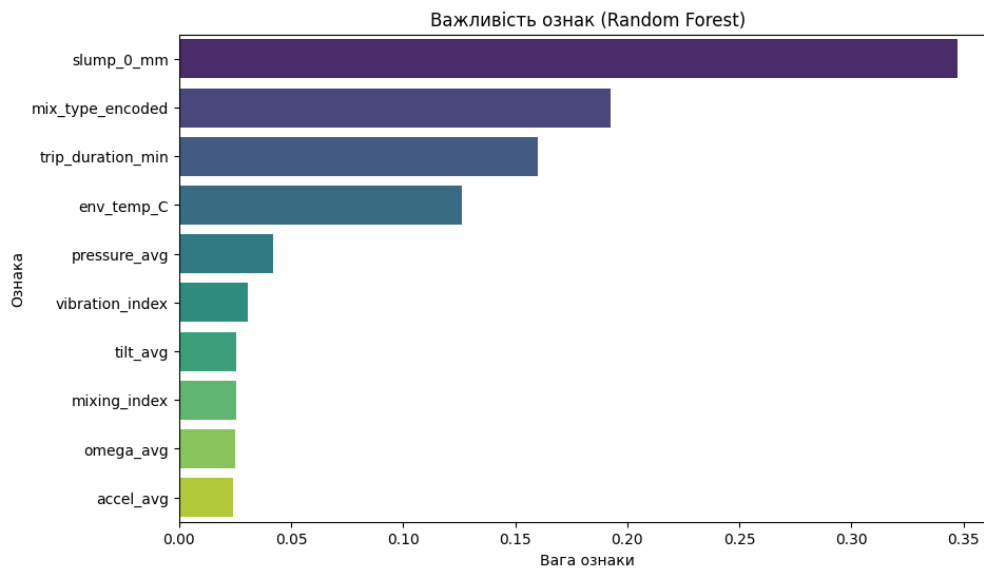


Рисунок 2.10 – Важливість ознак у моделі Random Forest

Основні результати щодо аналізу важливості ознак:

- `slump_0_mm` – найважливіша ознака (≈ 0.35). Початкова оброблюваність суміші на заводі є ключовим предиктором кінцевого стану. Це відповідає фізичній логіці процесу — суміш із вищим початковим показником має більший запас пластичності та довше зберігає придатність;
- `mix_type_encoded` – друга за значимістю ознака (≈ 0.19). Тип суміші (клас рухливості, співвідношення цемент / вода / добавки) визначає базову динаміку зміни реологічних властивостей під час транспортування;

- `trip_duration_min` – суттєвий фактор (≈ 0.16). Тривалість поїздки прямо впливає на втрату оброблюваності через часткове схоплення суміші та зміну температури. Це підтверджує важливість логістичної складової процесу;
- `env_temp_C` – значуща ознака середнього рівня (≈ 0.12). Температурний вплив визначає швидкість випаровування води та перебіг хімічних реакцій у цементній пасті;
- `pressure_avg`, `vibration_index`, `tilt_avg`, `mixing_index`, `omega_avg`, `accel_avg` мають менші, але ненульові ваги (≈ 0.02 – 0.05). Ці параметри відображають динаміку процесу транспортування: інтенсивність обертання барабана, рівень вібрацій і стабільність перемішування. Незважаючи на нижчу індивідуальну значущість, вони забезпечують додаткову чутливість моделі до особливостей маршруту, стану дороги та режиму роботи установки.

MLP показала найвищу загальну якість: $AUC = 0.978$ та $accuracy = 0.910$ (рисунок 2.11).

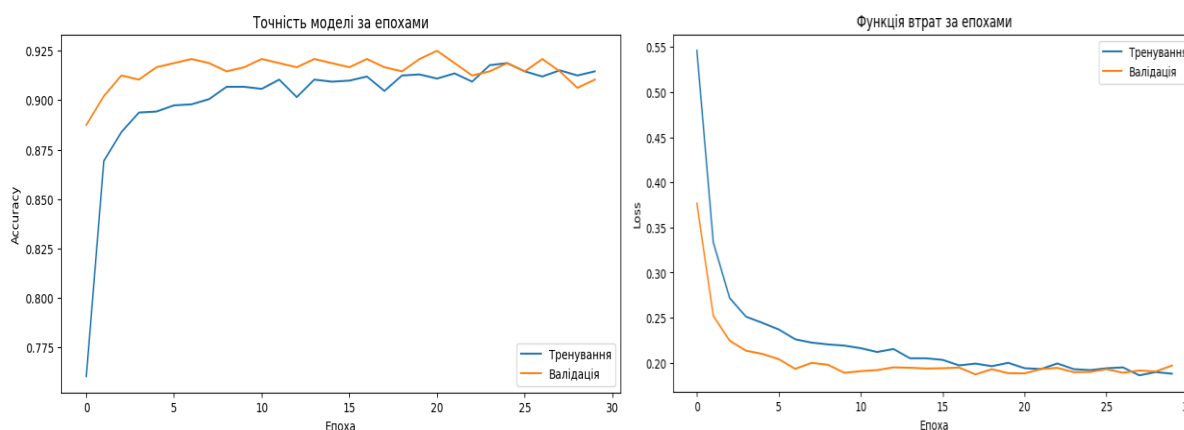


Рисунок 2.11 – Точність та втрати за епохами для моделі MLP

Модель MLP (рисунок 2.12) досягає оптимального балансу між `precision` і `recall` для обох класів, що вказує на стабільне узагальнення навіть без рекурентних механізмів. Вона виявилась найкращою для задачі, коли дані представлені у вигляді статичних векторів ознак.

LSTM демонструє високу здатність до виявлення залежностей у часі (рисунок 2.13), забезпечуючи $accuracy = 0.907$ та $AUC = 0.974$.

Модель LSTM краще ідентифікує клас «непридатний» (0) з $\text{recall} = 0.915$, що зменшує ризик помилок другого роду (пропуску деградації суміші). Це робить LSTM особливо придатною для інтеграції в системи онлайн-моніторингу, де важлива часово-залежна оцінка.

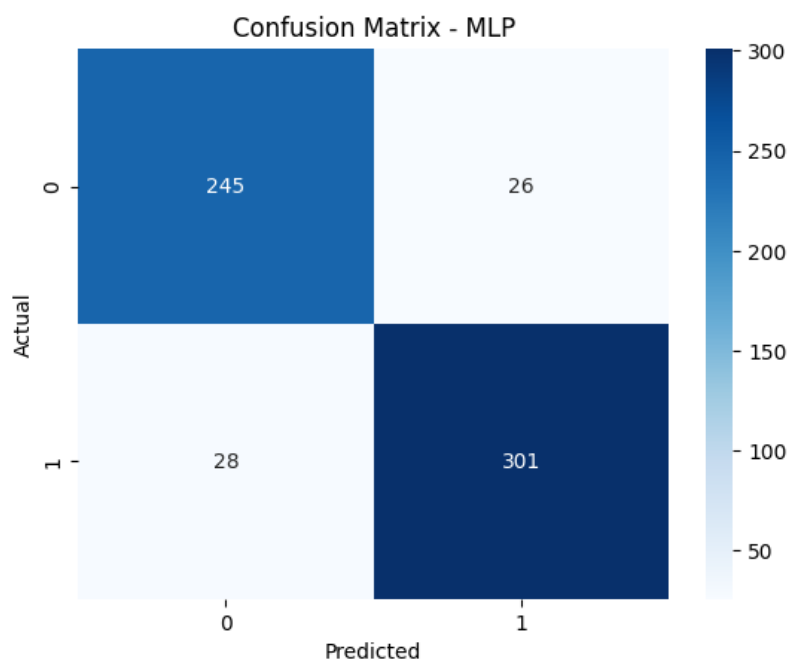


Рисунок 2.12 – Матриця помилок для моделі MLP

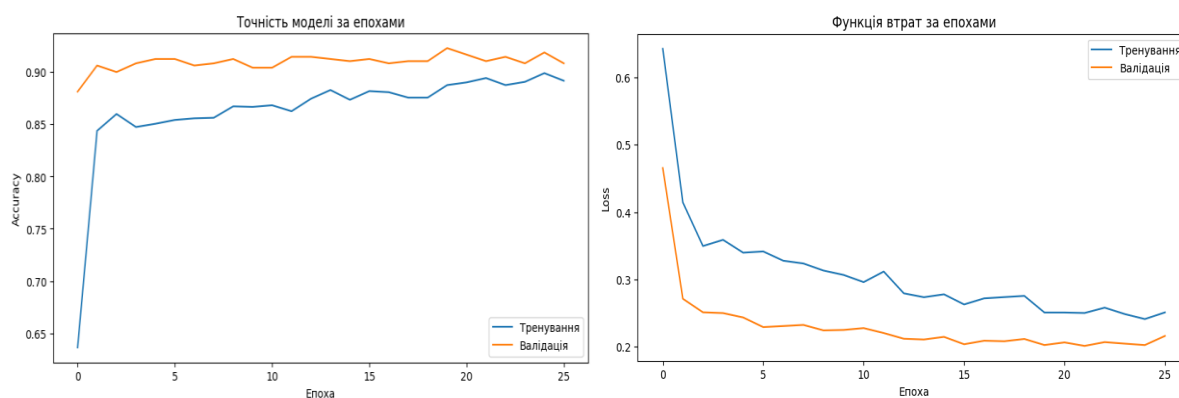


Рисунок 2.13 – Точність та втрати за епохами для моделі LSTM

У гібридній архітектурі LSTM + MLP часові параметри (pressure_avg , omega_avg , vibration_index , tilt_avg) обробляються послідовним блоком LSTM, який навчається вловлювати динаміку зміни стану суміші під час

транспортування. Паралельно MLP-гілка отримує статичні ознаки (`slump_0_mm`, `mix_type`, `env_temp_C`, `trip_duration_min`), що описують початкові умови та зовнішні фактори. Після цього обидва векторні представлення конкатенуються, утворюючи спільний ознаковий простір, який передається у фінальний класифікаційний шар. Така комбінація дає змогу врахувати як миттєвий стан системи, так і її часову еволюцію, що підвищує точність і стійкість прогнозу придатності бетону.

Гібридна LSTM + MLP (рисунк 2.14) поєднала сильні сторони обох підходів — часову динаміку та статичні ознаки середовища. Її $AUC = 0.976$ та $accuracy = 0.905$, а $recall = 0.921$ для класу «придатний» є найвищим серед усіх моделей.

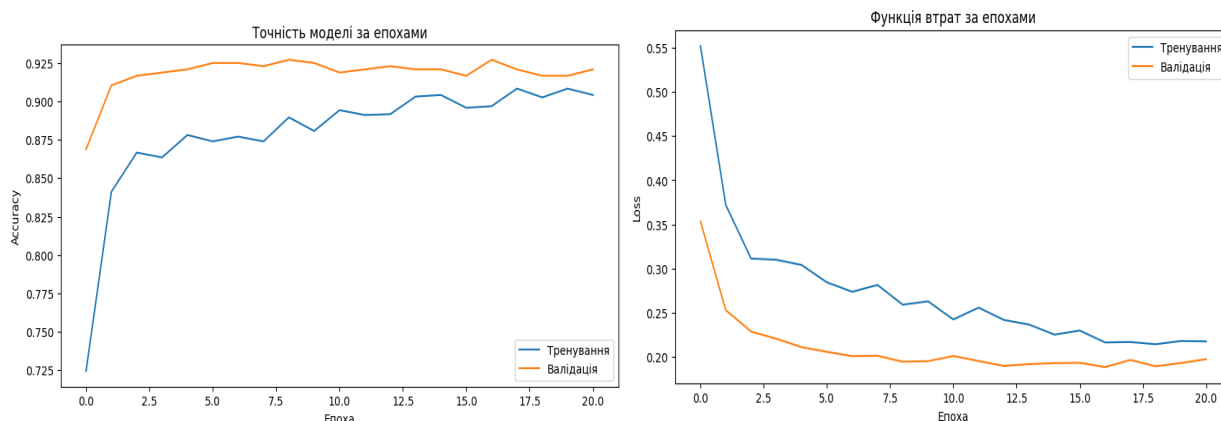


Рисунок 2.14 – Точність та втрати за епохами для моделі LSTM+MLP

Це критично для виробничо-логістичних систем, оскільки дозволяє мінімізувати хибні відмови від використання якісної суміші. Модель LSTM+MLP також демонструє стійкість до перенавчання, що видно зі стабільних валідаційних метрик на епохах навчання (рисунк 2.15).

Усі розглянуті моделі забезпечують $AUC > 0.96$, що свідчить про високу роздільну здатність (рисунк 2.16).

MLP досягає найкращого компромісу між точністю та узагальненням і може бути рекомендована як еталонна модель для задачі контролю придатності бетону. LSTM і Hybrid LSTM + MLP краще підходять для

реального часу і інтелектуальних систем моніторингу, де враховується часовий профіль сенсорних даних.

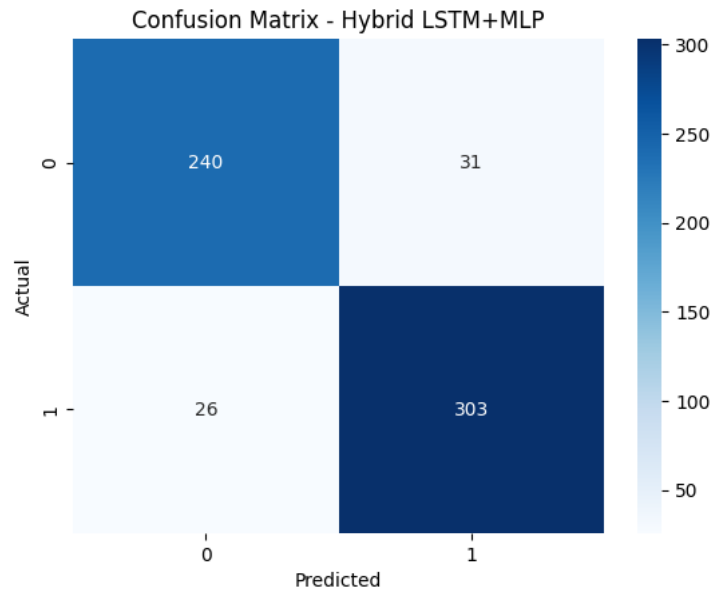


Рисунок 2.15 – Матриця помилок для моделі LSTM+MLP

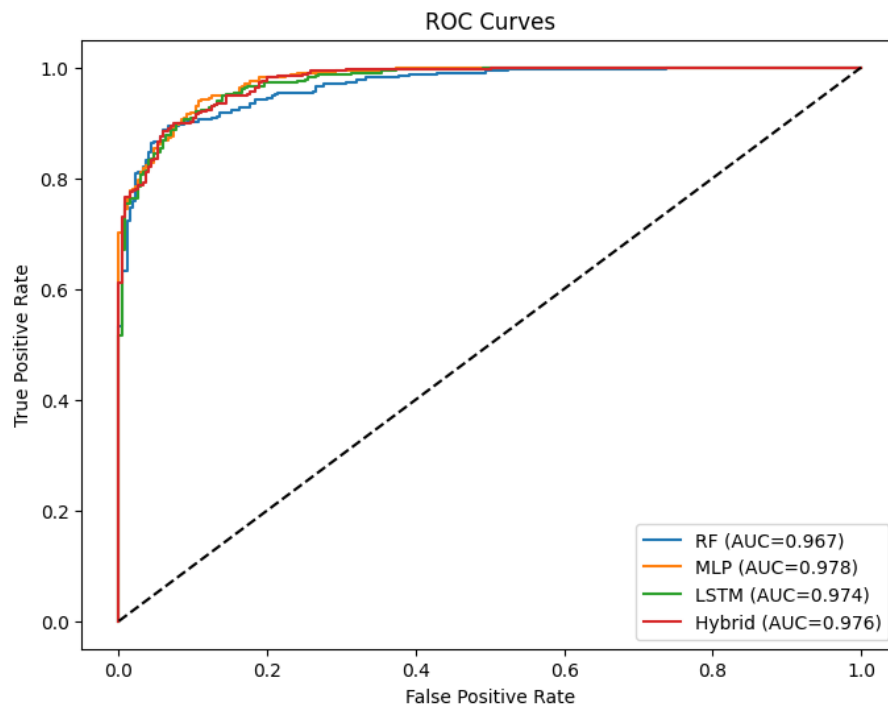


Рисунок 2.16 – ROC-криві для моделей

Гібридна архітектура є найбільш перспективною для розгортання в рамках цифрового двійника логістики бетону, оскільки поєднує аналітичну точність з часовим передбаченням деградаційних процесів.

Використання розробленої та навченої моделі забезпечує безперервну оцінку придатності бетону до транспортування протягом усього процесу доставки, підтримуючи проактивне забезпечення якості та прийняття рішень.

2.6.3 Моделі машинного навчання для контролю якості бетону на основі IoT-моніторингу виробництва

Запропонований підхід до контролю якості бетону під час транспортування може бути узагальнений на етап виробництва, де IoT-датчики розгортаються у бетонозмішувачах, камерах твердіння та випробувальному обладнанні. Безперервний моніторинг температури, вологості, осідання та розвитку міцності дозволяє формувати датасети для навчання моделей машинного навчання, які оцінюють якість бетону в режимі реального часу. Відхилення від заданих технологічних кривих та цільових специфікацій виявляються на ранніх стадіях, що забезпечує можливість оперативного коригування рецептури та режимів твердіння й гарантує стабільну якість продукції.

У межах цифрового двійника бетонного заводу розглядається задача оцінювання якості бетону під час виробництва та твердіння. На відміну від традиційної лабораторної схеми, де міцність і інші показники якості визначаються через 7–28 діб, пропонується використати дані від мережі IoT-датчиків, інтегрованих безпосередньо в технологічне обладнання:

- бетонозмішувачі – датчики температури суміші, моменту/струму електродвигунів (як індикатора в'язкості), швидкості обертання мішалки, вологості заповнювачів;
- камери для твердіння – датчики температури, відносної вологості, інколи концентрації CO₂ при спеціальних режимах;

- випробувальне обладнання та контрольні зразки – вбудовані датчики деформації, тиску, температури для оцінювання розвитку міцності в режимі реального часу;

- лабораторні випробування – результати випробувань кубів/призм на стиск у віці 1, 3, 7, 28 діб.

Дані з сенсорів у режимі реального часу надходять до системи збору через PLC та IoT-шлюзи і зберігаються в базах часових рядів та реляційних БД. Це забезпечує можливість побудови моделей машинного навчання для раннього прогнозу кінцевої міцності та оцінки відповідності партій заданим вимогам.

Один запис у датасеті відповідає одній партії бетону. Було запропоновано наступну структуру ознак:

1. Технологічні параметри рецептури:

- `cement_type` – тип цементу (наприклад, СЕМ I, СЕМ II, швидкотвердіючий);
- `w_c_ratio` – водоцементне відношення;
- `admixture_dosage` – дозування хімічних добавок (% від маси цементу);
- `agg_moisture` – вологість заповнювачів.

2. Параметри змішування:

- `mix_time_sec` – тривалість змішування;
- `mixer_speed` – середня швидкість мішалки;
- `mix_energy_idx` – індекс енерговитрат (інтеграл по моменту/струму двигуна).

3. Початкові показники бетонної суміші:

- `fresh_temp_C` – температура суміші при вивантаженні з мішалки;
- `slump_0_mm` – осідання конуса (або розтікання для самоущільнюючих сумішей);
- `air_content` – вміст повітря (%), якщо вимірюється.

4. Режим твердіння (за даними камер):

- `curing_temp_C` – середня температура в камері за першу добу;

- curing_RH – середня відносна вологість (%);
- curing_mode – тип режиму (нормальний, прискорений, паротвердіння).

5. Ранні показники розвитку міцності / зрілості:

- strength_8h_MPa – оцінена міцність або сигнал з датчиків у віці ~8 год;
- strength_24h_MPa – те саме для 24 год;

Цільові змінні:

- strength_28d_MPa – фактична міцність у віці 28 діб (для завдання регресія);
- meets_spec – бінарна мітка: 1 – партія відповідає заданому класу міцності і вимогам стандарту, 0 – ні (для завдання класифікації).

Такий датасет (таблиця 2.8) дозволяє розглядати дві задачі:

- прогноз кінцевої міцності на основі ранніх даних (регресія);
- оцінка відповідності партії специфікаціям вже в перші доби (класифікація).

Таблиця 2.8 – Датасет для контролю якості бетону на основі IoT-моніторингу виробництва

| Поле | Тип даних | Опис |
|------------------|----------------|---------------------------------------------------------------|
| cement_type | Категоріальний | Тип цементу (СЕМ I, СЕМ II, швидкотвердіючий тощо) |
| w_c_ratio | Числовий | Водоцементне відношення |
| admixture_dosage | Числовий | Дозування хімічних добавок, % від маси цементу |
| agg_moisture | Числовий | Вологість заповнювачів |
| mix_time_sec | Числовий | Тривалість змішування бетонної суміші, с |
| mixer_speed | Числовий | Середня швидкість обертання мішалки |
| mix_energy_idx | Числовий | Індекс енерговитрат змішування |
| fresh_temp_C | Числовий | Температура бетонної суміші після змішування, °C |
| slump_0_mm | Числовий | Осідання конуса бетонної суміші, мм |
| air_content | Числовий | Вміст повітря у суміші, % |
| curing_temp_C | Числовий | Середня температура твердіння за першу добу, °C |
| curing_RH | Числовий | Середня відносна вологість під час твердіння, % |
| curing_mode | Категоріальний | Тип режиму твердіння (нормальний, прискорений, паротвердіння) |
| strength_8h_MPa | Числовий | Оцінена міцність бетону через 8 год, МПа |
| strength_24h_MPa | Числовий | Оцінена міцність бетону через 24 год, МПа |

| | | |
|------------------|-----------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|
| strength_28d_MPa | Числовий (цільова) | Фактична міцність бетону через 28 діб, МПа |
| meets_spec | Бінарний (цільова) | Ознака відповідності бетону заданому класу міцності: 1 — відповідає, 0 — не відповідає |

Порівняння результатів моделей машинного навчання для оцінювання якості бетону представлено в таблиці 2.9.

Таблиця 2.9 – Порівняння результатів моделей машинного навчання для оцінювання якості бетону на виробництві

| Модель | Precision (0) | Recall (0) | F1 (0) | Precision (1) | Recall (1) | F1 (1) | Accuracy | AUC |
|-------------------|------------------|---------------|-----------|------------------|---------------|-----------|----------|-------|
| Random Forest | 0.938 | 0.967 | 0.952 | 0.948 | 0.905 | 0.926 | 0.942 | 0.989 |
| MLP | 0.938 | 0.975 | 0.956 | 0.960 | 0.905 | 0.932 | 0.947 | 0.989 |
| LSTM | 0.947 | 0.953 | 0.950 | 0.929 | 0.921 | 0.925 | 0.940 | 0.987 |
| Hybrid LSTM + MLP | 0.930 | 0.964 | 0.947 | 0.943 | 0.892 | 0.917 | 0.935 | 0.986 |

Всі моделі демонструють високу узгодженість і практичну придатність для задачі прогнозування відповідності партій бетону стандартним характеристикам у виробничих умовах (рисунок 2.17).

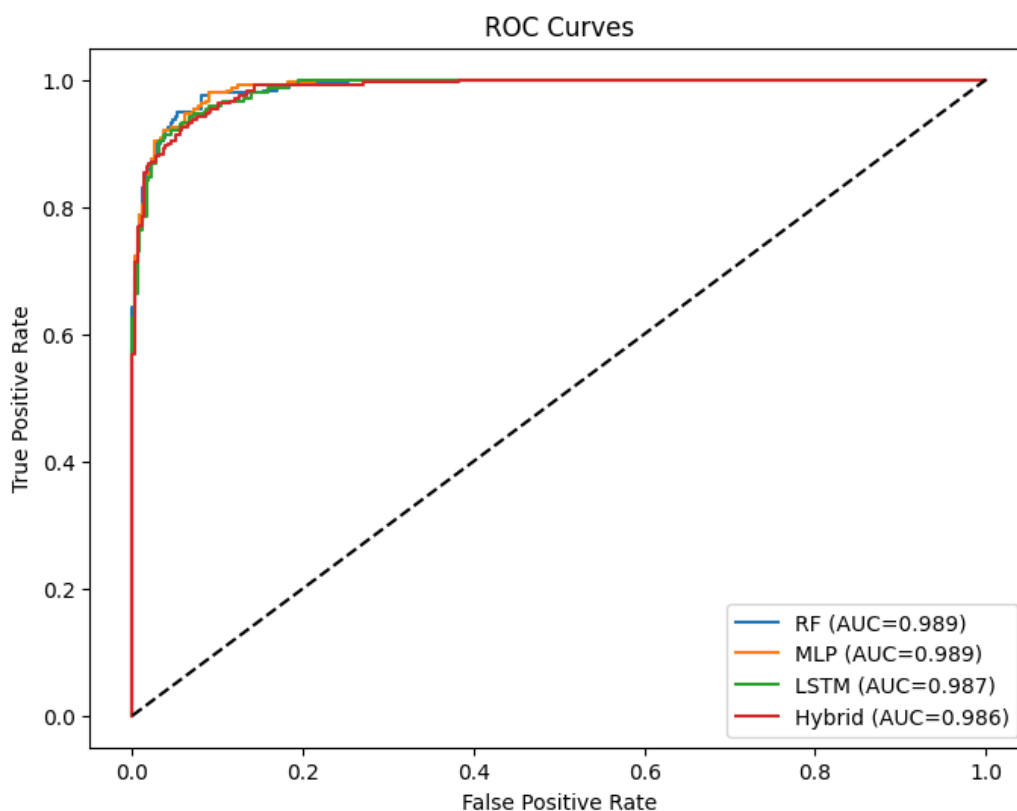


Рисунок 2.17 – ROC-криві для моделей

MLP показує найвищу загальну точність (0.947) та найкращу збалансованість між precision і recall. Це свідчить, що навіть базова багатошарова неймережа добре моделює нелінійні зв'язки у параметрах бетонної суміші.

Random Forest лише трохи поступається – він стабільно точний, інтерпретований, і демонструє найвищу AUC (0.9888). Це підтверджує, що для задачі контролю якості бетону на основі IoT-даних ансамблеві методи можуть бути достатньо потужними без складних глибоких архітектур.

Аналіз важливості ознак у моделі Random Forest (рисунок 2.18) показав, що найбільший вплив на кінцеву міцність бетону мають співвідношення вода/цемент (`w_c_ratio`), тип цементу (`cement_type`) та доза хімічної добавки (`admix_dosage`).

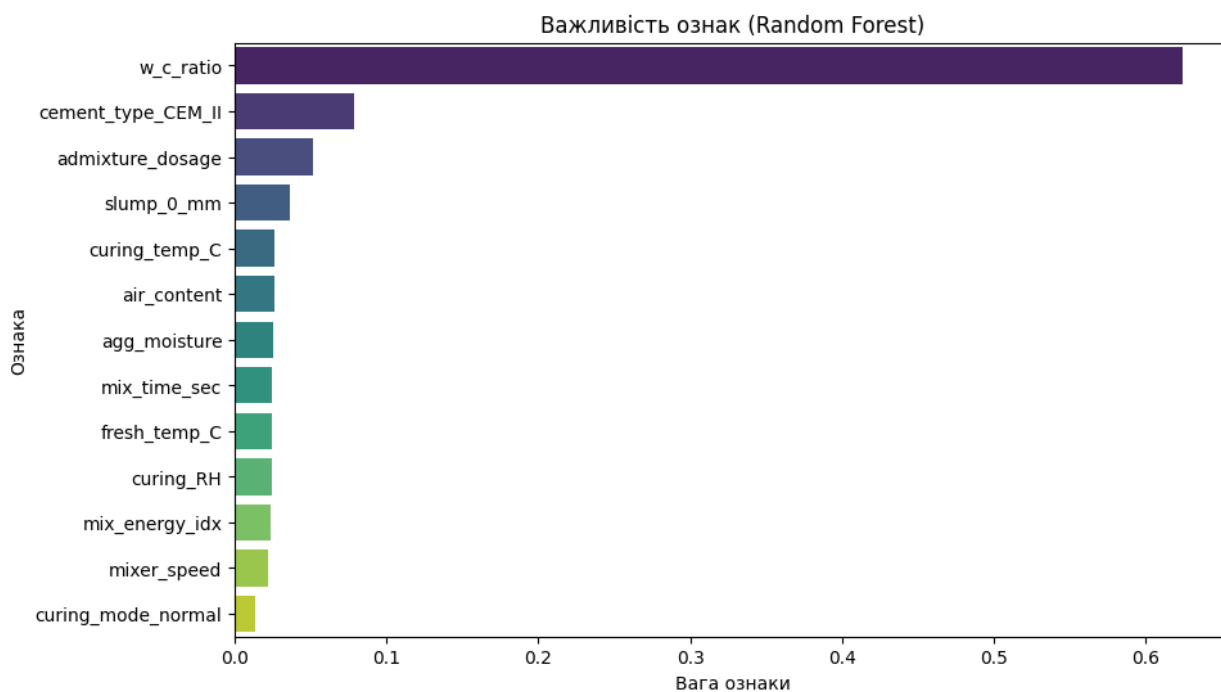


Рисунок 2.18 – Важливість ознак у моделі Random Forest

Ці параметри визначають структуру цементного каменю, швидкість гідратації та інтенсивність набору міцності в початкові періоди твердіння. Додатково суттєвий внесок мають умови твердіння – температура (`curing_temp_C`) і вологість (`curing_RH`), які впливають на активність гідратаційних процесів. Ознаки, пов'язані з технологічним процесом (час і швидкість змішування, енергія перемішування), мають менший, але стабільний вплив – вони визначають однорідність суміші та рівномірність розподілу компонентів.

LSTM (0.940 Accuracy, 0.987 AUC) не дає помітного приросту точності але її стабільність важлива – модель реагує на варіації температури, вологості чи складу під час «циклів змішування». Hybrid LSTM + MLP незначно поступається іншим (0.935 Accuracy), але демонструє хорошу узгодженість між ознаками різної природи – як «темпоральними» (умовно часовими), так і статичними.

Для прогнозування кінцевої міцності бетону через 28 днів (`strength_28d_MPa`) було побудовано чотири моделі – Random Forest,

багатошаровий перцептрон, LSTM, гібридна LSTM+MLP. Модель Random Forest продемонструвала високу точність прогнозу з показниками MAE = 1.77 МПа та $R^2 = 0.93$, що свідчить про здатність пояснити понад 93% варіації кінцевої міцності. Це вказує на ефективність ансамблевого підходу для задачі регресії з різномірними технологічними параметрами. Модель MLP також показала стабільну збіжність без перенавчання. Її результати — MAE = 2.10 МПа, RMSE \approx 2.64 МПа, що відповідає коефіцієнту детермінації близько $R^2 \approx 0.91$. Графіки зміни функції втрат і похибки (рисунок 2.19) на тренуванні та валідації демонструють поступове зниження похибки й узгодження кривих, що підтверджує гарну узагальнювальну здатність нейромережі.

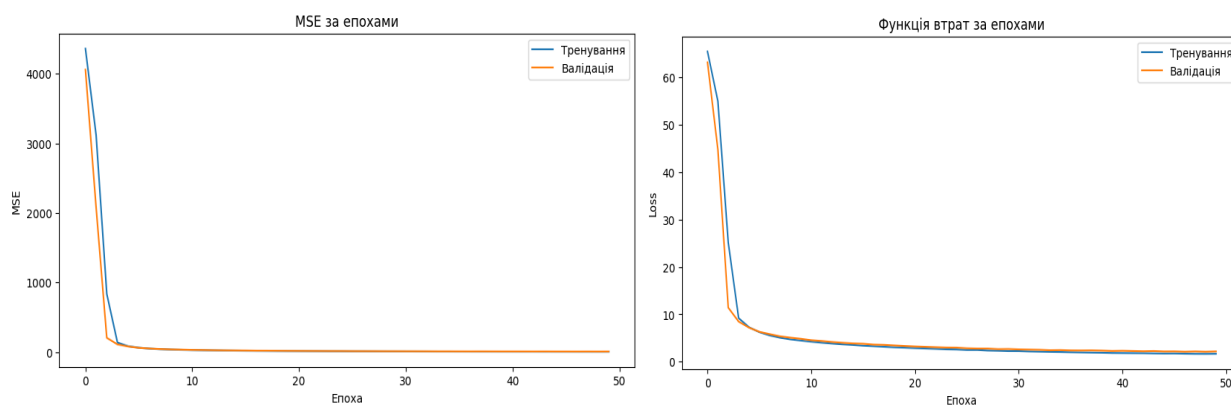


Рисунок 2.19 – Графіки зміни функції втрат і похибки

Модель LSTM, що використовує послідовне представлення даних, досягла MAE \approx 2.3 МПа, $R^2 \approx 0.90$. Ця архітектура добре захоплює нелінійні залежності між параметрами приготування та ранніми показниками міцності, проте в умовах статичних вхідних ознак перевага LSTM є помірною.

Гібридна архітектура LSTM+MLP продемонструвала результати, близькі до базових нейромережевих моделей – MAE \approx 2.1–2.2 МПа, $R^2 \approx 0.91$. Об'єднання рекурентних і повнозв'язних шарів дозволило збалансувати часовий та нелінійний аспекти прогнозу. Гібридна модель показала стабільну збіжність і добру узгодженість між тренувальними та валідаційними кривими.

У моделях MLP, LSTM та гібридній LSTM+MLP спостерігається аналогічна тенденція ваг ознак: мережа в першу чергу використовує `w_c_ratio` як основний індикатор міцності, а також параметри, що характеризують умови

твердіння та реологічні властивості суміші, що узгоджується з фізико-хімічними закономірностями процесів.

2.7 Висновки до розділу 2

1. Системне логістичне представлення процесів управління дозволило охопити всі ключові елементи функціонування підприємства з виробництва та доставки бетону, що сформувало основу для побудови комплексу оптимізаційних та імітаційної моделей.

2. Удосконалено модель планування та оптимізації в логістичному ланцюгу дала змогу врахувати фактори попиту, маршрутів доставки, часових обмежень і виробничих потужностей, що підвищило обґрунтованість управлінських рішень та дозволяє досить повно врахувати можливі варіанти переміщення транспортних засобів у логістиці бетону.

3. Удосконалено модель оптимізації інфраструктури виробничо-розподільчої мережі, що надало можливість виявити конфігурації, які забезпечують найкраще співвідношення між витратами на експлуатацію, транспортом і прибутковістю при змінних сценаріях роботи системи та реалізації проєктів модернізації та розвитку.

4. Дістали подальшого розвитку моделі машинного навчання для аналізу ефективності логістики та якості готового бетону в реальному часі, що засновані на ансамблевих методах машинного навчання, які на відміну від існуючих враховують параметри системи управління замовленнями, IoT-платформи заводу та автобетонозмішувачів та систем маршрутизації, що дозволяє підвищити ефективність предиктивної аналітики якості та логістики готового бетону.

5. Основні результати, представлені в цьому розділі, опубліковані в [140], [141], [142], [143], [144], [145].

РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА ІМІТАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ АНАЛІЗУ ПРОЦЕСІВ ВИРОБНИЦТВА ТА ЛОГІСТИКИ БЕТОНУ

3.1 Основні положення при імітаційному моделюванні процесів виробництва та логістики бетону

Щоб врахувати всі взаємозалежності, обмеження, динаміку і невизначеності, було створено імітаційну модель, яка охоплює всі процеси у виробництві та логістиці готових бетонних сумішей.

Імітаційна модель розроблена у середовищі AnyLogic [52, 146] та складається з компонент, кожен з яких відображає окремий елемент динаміки поведінки підприємства та інфраструктури розподілу бетону. При розробці моделі були враховані різні аспекти, що складають проблему доставки бетону:

1) замовлення надзвичайно непередбачувані та мінливі, оскільки багато замовлень відбувається в той же день, що потребувало моделювання інтенсивності надходження, як за план-графіком клієнта так і випадково;

2) виробник повинний здійснювати надмірне замовлення на близько 20%, щоб компенсувати непередбачуваність потоку клієнтських замовлень;

3) більшість замовлень вимагають синхронізованих поставок кількома вантажівками, що впливає на визначення ємності наявного автопарку;

4) час в дорозі між виробничим підприємством і будівельним майданчиком в нашій моделі визначається завдяки використанню геоінформаційної системи з реальною транспортною інфраструктурою. Кількість та місцезнаходження бетонних заводів та будівельних майданчиків задається в базі даних, що дозволяє моделювати мережу будь якого вигляду без необхідності внесення змін в модель;

5) тривалість робіт по заливці бетону на будівельному майданчику моделюється з урахуванням різних ресурсних налаштувань;

б) контролюється часовий проміжок, протягом якого клієнту потрібно доставити бетон та фіксуються статистика по замовленнях, де термін доставки порушений;

7) враховується тип бетону, який замовляють клієнти, що в свою чергу потребує таблиці рецептури приготування, для гнучкості передбачене завантаження цієї інформації з бази даних.

3.2 Імітаційна модель аналізу процесів виробництва та логістики готових бетонних сумішей

У розробленій імітаційній моделі (рисунок 3.1) за допомогою класу активних об'єктів (агентів) реалізовані: бетонний завод (ConcretePlant); замовлення (Order); будівельний майданчик (ConstructionSite); автобетонозмішувач (TruckMixer); постачальник сировини (Supplier); замовлення на сировину (MaterialOrder); вантажівка транспортування сировини (Vehicle).

Для підвищення рівня деталізації та забезпечення можливості візуального представлення технологічного процесу у 3D-середовищі структура агента ConcretePlant була розширена додатковими підлеглими агентами, що відображають основні елементи виробничої інфраструктури бетонного заводу. Зокрема, до складу агента бетонного заводу введено агенти AggregateBins, CementSilo, AdmixtureTank та ConcreteMixer, які відповідають за моделювання складів заповнювачів, силосів цементу, резервуарів для хімічних домішок та бетонозмішувального вузла відповідно. На поточному етапі дослідження ці агенти використовуються переважно для формування просторової структури цифрового двійника та тривимірної візуалізації роботи виробничого майданчика, що дозволяє відобразити рух техніки, завантаження матеріалів і процес приготування бетонної суміші у середовищі моделювання.

Разом із цим закладена архітектура моделі забезпечує можливість подальшого розвитку функціональності зазначених агентів. У перспективі

вони можуть бути доповнені власними параметрами продуктивності, ресурсними обмеженнями, режимами роботи, енергоспоживанням, показниками технічного стану та логікою поведінки, що дозволить перейти від узагальненого представлення бетонного заводу до більш детального моделювання окремих технологічних ділянок виробництва.

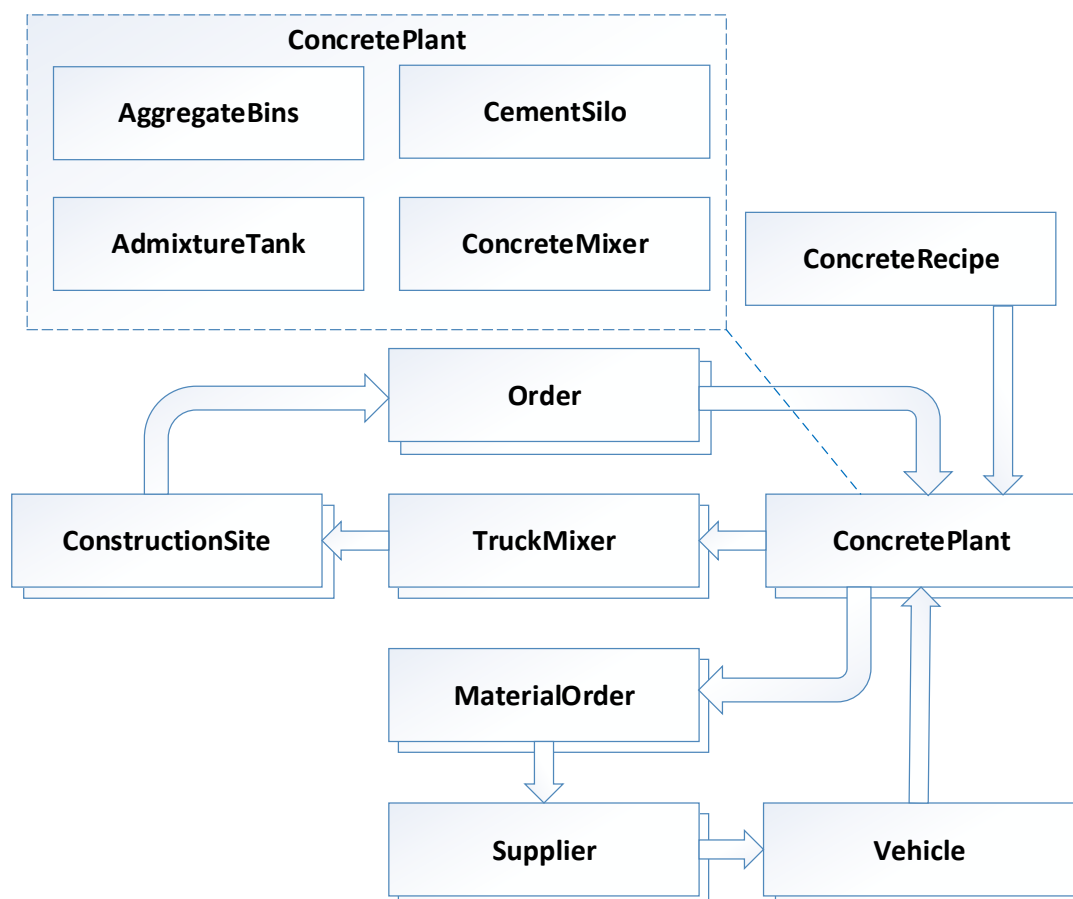


Рисунок 3.1 – Структура агентної імітаційної моделі аналізу процесів виробництва та логістики бетону

Окремим елементом структури моделі є агент ConcreteRecipe, який реалізує механізм зберігання та управління рецептурами бетонних сумішей. Даний агент містить параметри складу бетону, зокрема співвідношення цементу, води, заповнювачів і домішок, а також характеристики відповідного

класу або типу бетонної суміші. Використання агента ConcreteRecipe дозволяє враховувати сортність бетону при формуванні замовлень, розрахунку потреб у сировині та моделюванні виробничих процесів. Крім того, це створює основу для подальшого впровадження моделей машинного навчання та систем підтримки прийняття рішень, орієнтованих на прогнозування якості бетонної суміші та адаптивне керування рецептурою.

Таким чином, маємо популяцію в потрібній кількості всіх типів агентів. Кожен агент має свої змінні та математичну модель, що описує його поведінку. Наприклад, агент клієнт характеризується наступними параметрами: тип; кількість робочих місць; обсяг продажів; розмір завантаження; відстань до заводу; рівень обслуговування; кількість працівників для розвантажування тощо. Крім того, є можливість визначити кількість агентів, наприклад, розмір автопарку або кількість будівельних майданчиків.

Агент бетонного заводу представлений дискретно-подієвою моделлю виробничого процесу (дозування компонентів бетону згідно рецептури для замовлення продукту потрібного типу, змішування бетону, додавання хімікатів/домішок) та має свій автопарк вантажівок. Він характеризується продуктивністю виробництва бетону, розкладом роботи, розміром бункерів та ємностей для зберігання матеріалів, рівнем страхового запасу матеріалів, кількість автобетонозмішувачів тощо. Відповідно одночасно вирішується задача планування графіків постачання сировини (цемент, пісок, подрібнений камінь, вода, домішки).

Агент замовлення представляє інформацію про місце доставки бетону (будівельний майданчик), тип та необхідну кількість бетону для доставки, бажаний час початку (перша доставка). Крім того, агент замовлення має параметри для накопичення статистики, щодо життєвого циклу виконання замовлення та його статус.

Агент вантажівки характеризується своєю приналежністю до конкретного бетонного заводу, об'ємом барабану, швидкістю руху по дорогах, агентом замовлення, яке він виконує, а також параметри накопичення

статистики, а саме: час очікування завантаження, час завантаження, час транспортування до клієнту, час очікування розвантаження у клієнта, час розвантаження, час повернення до заводу, кількість поїздок тощо. Після завантаження вантажівка не може обслуговувати кілька будівельних майданчиків і має повернутися до заводу після доставки. Дані, що накопичуються в ході моделювання завжди дають можливість побачити стан, в якому знаходиться вантажівка, час очікування завантаження, час доставки бетону до клієнтів, час очікування розвантаження тощо.

Агент будівельного майданчику власне ініціює створення нового замовлення на доставку бетону зазначеного типу, обсягу та термінів доставки. Обслуговується будівельний майданчик найближчим до нього заводом. Агент реалізує дискретно-подієву модель, що описує операції, пов'язані з прийомом, розвантаженням вантажівок, укладкою бетону та додатковим обслуговуванням автобетозмішувачів (очищення).

На даний час моделюються ресурси у вигляді бетононасосів та працівників, розклад їх роботи, а також враховується тип розвантаження. За результатами моделювання накопичується статистика щодо виконання замовлень та фактичній доставці бетону, зайнятості ресурсів на розвантаженні, час очікування розвантаження, показники черги вантажівок на обслуговування тощо.

Наша модель по суті є поєднанням різних методів моделювання, дискретно-подієве моделювання використовується для опису виробничих процесів на заводі та процесу розвантаження автобетозмішувачів і укладання бетону на будівельному майданчику, системної динаміки для формування запасів матеріалів на бетонних заводах і агентного підходу, де заводи, будівельні майданчики, вантажівки та замовлення – це агенти з автономною поведінкою та можливістю масштабування у популяції необхідної кількості.

3.3.1 Агент бетонного заводу

Структура моделі агенту бетонного заводу представлена на рисунку 3.2. Бетонні заводи включають бетонозмішувальну установку, яка складається з витратних ємностей для вихідних матеріалів, дозаторів, бетонозмішувачів і різного допоміжного обладнання; склади основних компонентів бетонної суміші; внутрішньозаводські транспортні технологічні комунікації (конвеєри, цементопроводи, повітроводи та ін.).

Для приготування бетонних сумішей застосовують пересувні і стаціонарні бетонозмішувачі циклічної і безперервної дії. Бетонозмішувальні установки циклічної дії з періодично повторюваними технологічними операціями є кращим вибором для підприємств з продукцією багатьох марок.

| Датасети статистики | Агенти | Параметри виробництва | Базові параметри |
|-----------------------------|-----------------------|--------------------------------|------------------|
| datasetProducts | concreteRecipe | concreteAmount | name |
| waitingForProduct | aggregateBins | orderAmount | CurrentClient |
| transportationProduct | cementSilo1 | orderConcreteAmount | supplyThreshold |
| Історія замовлень та рейсів | mixer | orderMaterialCostPerCubicMeter | nVehicles |
| Last20Clients | truckMixer | averageWaitingTimeForProduct | CPOpens |
| Last20Trucks | admixtureTank1 | maxProduction | CPCloses |
| Функції | Графік роботи | dosingTime | totalUtilization |
| supplyScheme | schedule | mixingTime | plantColor |
| waitingTime | Потреби у закупівлі | Обсяги закупівель матеріалів | Запаси |
| onelfPositive | sandOrdering | sandStorageAmount | sandAmount |
| isEnoughForBatch | gravelOrdering | gravelStorageAmount | gravelAmount |
| Події | cementOrdering | cementSiloAmount | cementAmount |
| productionControl | additiveOrdering | additiveTankLiters | additiveLiters |
| updateParameters | waterOrdering | waterTankLiters | waterLiters |
| checkMaterialStock | restockThresholdRatio | | |
| | restockAmount | | |

Рисунок 3.2 – Змінні, параметри, функції та події агенту ConcretePlant

Структура ConcretePlant охоплює параметри виробництва, логіку постачання матеріалів, функції контролю запасів і події управління процесами (таблиця 3.1).

Це дозволяє відтворювати поведінку підприємства в динамічному середовищі, враховуючи зміну попиту, обмеження ресурсів і часові характеристики технологічних операцій.

Таблиця 3.1 – Структура агента ConcretePlant

| Категорія | Назва елемента | Опис |
|-----------------------|--------------------------------|----------------------------------------------------------|
| Датасети статистики | datasetProducts | Накопичення статистики щодо обсягів виробленої продукції |
| | waitingForProduct | Облік часу очікування продукції перед відвантаженням |
| | transportationProduct | Дані про транспортування продукції |
| Історія замовлень | Last20Clients | Останні клієнти для аналізу попиту |
| | Last20Trucks | Історія використання транспорту |
| Агенти (ресурси) | concreteRecipe | Рецептура бетонної суміші |
| | aggregateBins | Бункери для заповнювачів |
| | cementSilo1 | Силос цементу |
| | mixer | Змішувач |
| | truckMixer | Автобетонозмішувач |
| | admixtureTank1 | Резервуар добавок |
| | schedule | Графік роботи підприємства |
| Параметри виробництва | concreteAmount | Обсяг виробництва бетону |
| | orderAmount | Кількість замовлень |
| | orderConcreteAmount | Обсяг бетону в замовленнях |
| | orderMaterialCostPerCubicMeter | Вартість матеріалів на 1 м ³ |
| | averageWaitingTimeForProduct | Середній час очікування продукції |
| | maxProduction | Максимальна продуктивність |
| | dosingTime | Час дозування компонентів |
| | mixingTime | Час змішування |
| Базові параметри | name | Назва заводу |
| | CurrentClient | Поточний клієнт |
| | supplyThreshold | Порогове значення запасів |
| | nVehicles | Кількість транспортних засобів |
| | CPOpens | Відкриття виробничого процесу |
| | CPClose | Завершення виробничого процесу |
| | totalUtilization | Загальне завантаження системи |
| | plantColor | Візуальне відображення стану |

Продовження таблиці 3.1

| Категорія | Назва елемента | Опис |
|---------------------|-----------------------|----------------------------------|
| Потреби у закупівлі | sandOrdering | Потреба у піску |
| | gravelOrdering | Потреба у щебені |
| | cementOrdering | Потреба у цементі |
| | additiveOrdering | Потреба у добавках |
| | waterOrdering | Потреба у воді |
| | restockThresholdRatio | Поріг поповнення запасів |
| | restockAmount | Обсяг поповнення |
| Обсяги матеріалів | sandStorageAmount | Запаси піску |
| | gravelStorageAmount | Запаси щебеню |
| | cementSiloAmount | Запаси цементу |
| | additiveTankLiters | Обсяг добавок |
| | waterTankLiters | Обсяг води |
| Запаси (стан) | sandAmount | Поточний запас піску |
| | gravelAmount | Поточний запас щебеню |
| | cementAmount | Поточний запас цементу |
| | additiveLiters | Поточний запас добавок |
| | waterLiters | Поточний запас води |
| Функції | supplyScheme | Логіка постачання матеріалів |
| | waitingTime | Розрахунок часу очікування |
| | oneIfPositive | Допоміжна функція для перевірок |
| | isEnoughForBatch | Перевірка достатності матеріалів |
| Події | productionControl | Керування процесом виробництва |
| | updateParameters | Оновлення параметрів системи |
| | checkMaterialStock | Контроль рівня запасів |

В нашій моделі агент бетонного заводу представлений моделлю виробничого процесу (дозування компонентів бетону згідно рецептури для замовлення продукту потрібного типу, змішування бетону, додавання хімікатів/домішок) та має свій автопарк вантажівок.

Він характеризується продуктивністю виробництва бетону, розкладом роботи, розміром бункерів та ємностей для зберігання матеріалів, рівнем страхового запасу матеріалів, кількістю автобетонозмішувачів тощо. Відповідно одночасно вирішується задача планування графіків постачання сировини (цемент, пісок, подрібнений камінь, вода, домішки). Імітаційна модель агенту ConcretePlant представлена на рисунку 3.3.

Модель агенту ConcretePlant в свою чергу включає агентів: AggregateBins, CementSilo, AdmixtureTank та ConcreteMixer, що формують бетонний завод, відповідно з 3D зображень цих агентів формується загальна

візуалізація заводу та анімація відвантаження бетону автобетономішувачами (рисунок 3.4).

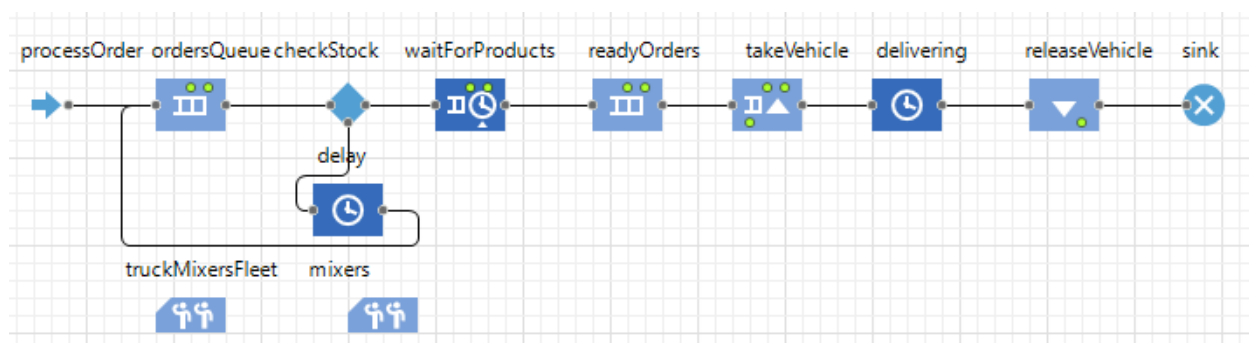


Рисунок 3.3 – Імітаційна модель агента ConcretePlant

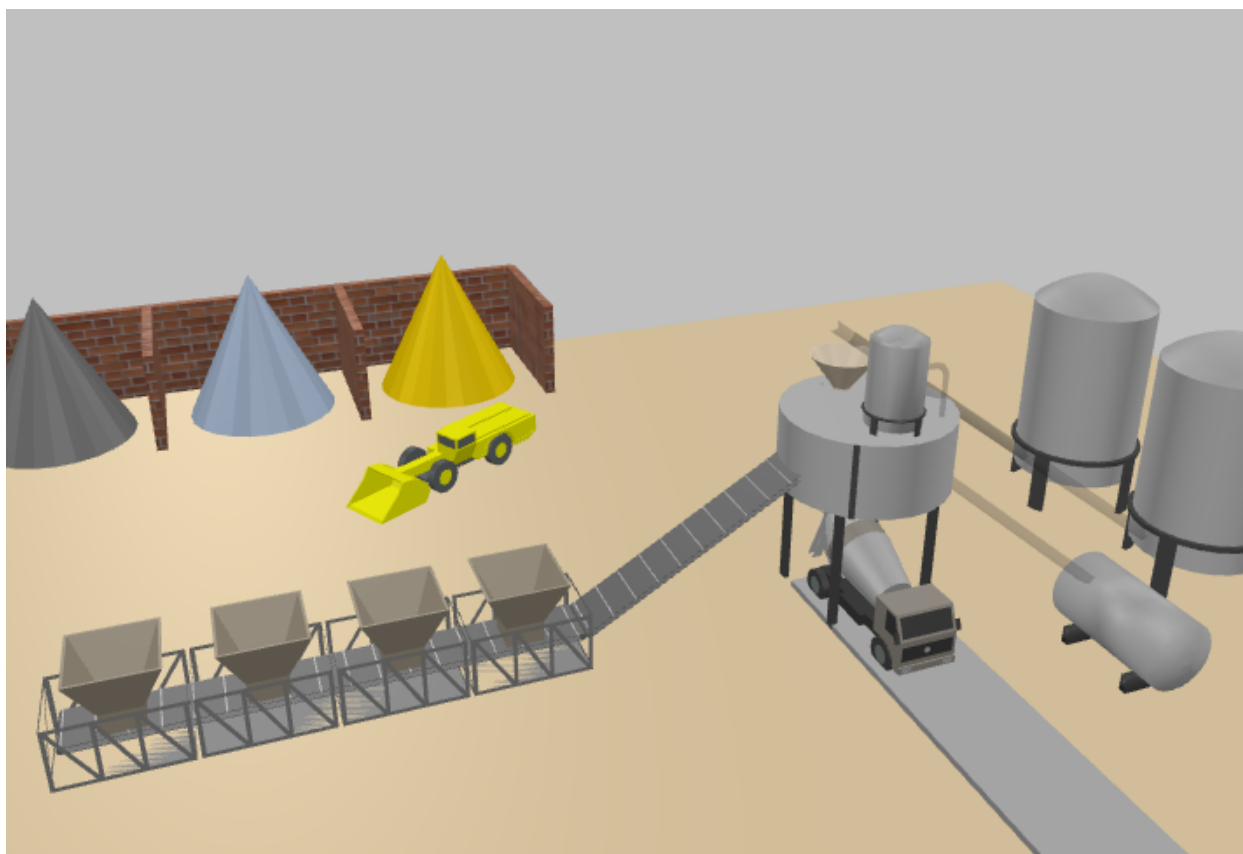


Рисунок 3.4 – 3D візуалізація агента ConcretePlant

3.3.2 Агент автобетономішувача

Структура параметрів та змінних агента `TruckMixer` представлена на рисунку 3.5.





















| Параметри для збору статистики | | Параметри вантажівки |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|
|  startWaitingForLoading |  atPlant |  order |
|  startDelivery |  inLoading |  capacity |
|  startWaitingForUnloading |  toClient |  center |
|  startReturn |  inUnloading | |
|  stateDataset |  toPlant | |
|  waitingForLoading |  tripsAmount | |
|  movingToClients |  timeToClient | |
|  waitingForUnloading |  timeToPlant | |
|  movingToPlant | | |

Рисунок 3.5 – Параметри та змінні агента TruckMixer

Агент TruckMixer включає параметри (таблиця 3.2) для збору статистики, змінні стану та показники ефективності виконання рейсів. Агент переходить між основними станами – очікування завантаження, завантаження, транспортування до клієнта, розвантаження та повернення на завод. Збір статистичних даних дозволяє оцінювати ефективність використання транспортних засобів, аналізувати затримки та оптимізувати маршрути доставки.

Розглянемо більш детально призначення цих параметрів та змінних:

- `center` – об’єкт типу `ConcretePlant`, який визначає приналежність транспортного засобу автопарку бетонного заводу;
- `order` – об’єкт типу `Order`, що описує поточне замовлення доставки, яке виконує вантажівка;
- змінні `startWaitingForLoading`, `startDelivery`, `startWaitingForUnloading`, `startReturn` використовується для фіксування часу початку очікування завантаження, доставки, розвантаження на будівельному майданчику та повернення;

- змінні `atPlant`, `inLoading`, `toClient`, `inUnloading`, `toPlant` використовуються для фіксації знаходження агента-вантажівки у відповідних станах;
- елементи `Histogram Data` використовуються для накопичення даних для візуалізації гістограм;
- елемент `StateDataset` використовується для відображення стану вантажівки на діаграмі Ганта.

Таблиця 3.2 – Структура агента `TruckMixer`

| Категорія | Назва елемента | Опис |
|--------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| Параметри для збору статистики | <code>startWaitingForLoading</code> | Час початку очікування завантаження на заводі |
| | <code>startDelivery</code> | Час початку доставки бетону |
| | <code>startWaitingForUnloading</code> | Час початку очікування розвантаження |
| | <code>startReturn</code> | Час початку повернення на завод |
| Датасети статистики | <code>stateDataset</code> | Загальний набір даних про стани автобетонозмішувача |
| | <code>waitingForLoading</code> | Дані про час очікування завантаження |
| | <code>movingToClients</code> | Дані про рух до клієнтів |
| | <code>waitingForUnloading</code> | Дані про час очікування розвантаження |
| Станові змінні (логістика) | <code>movingToPlant</code> | Дані про рух назад до заводу |
| | <code>atPlant</code> | Перебування на бетонному заводі |
| | <code>inLoading</code> | Процес завантаження |
| | <code>toClient</code> | Рух до клієнта |
| Показники роботи | <code>inUnloading</code> | Процес розвантаження |
| | <code>toPlant</code> | Рух назад до заводу |
| | <code>tripsAmount</code> | Кількість виконаних рейсів |
| | <code>timeToClient</code> | Час доставки до клієнта |
| Параметри вантажівки | <code>timeToPlant</code> | Час повернення на завод |
| | <code>order</code> | Замовлення, яке обслуговується |
| | <code>capacity</code> | Місткість автобетонозмішувача |
| | <code>center</code> | Логістичний центр (прив'язка до заводу) |

Поведінка агента задана діаграмою станів (рисунок 3.6). Перший стан `AtConcretePlant` є початковим станом наших автобетонозмішувачів (рисунок 3.7). Фіксуємо значення необхідних змінних, в якості дій при вході.

Наступний стан моделює завантаження, а перехід здійснюється при отриманні відповідного замовлення від клієнту (рисунок 3.8).

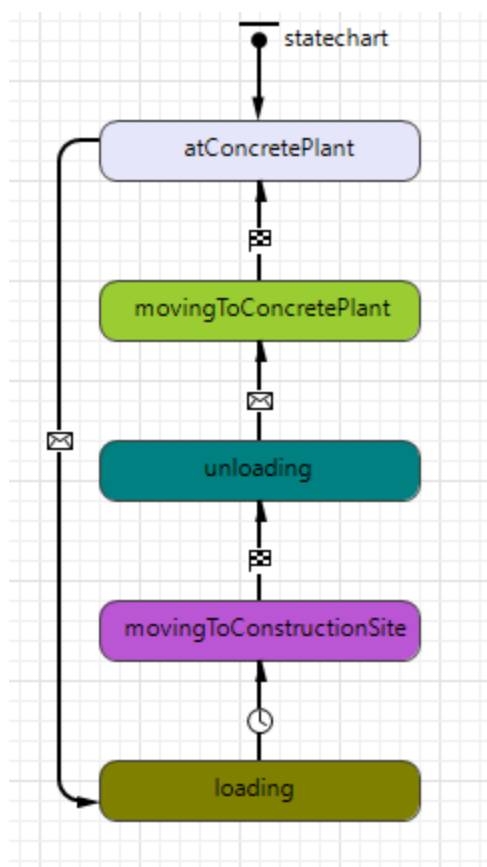


Рисунок 3.6 – Діаграма станів агента TruckMixer

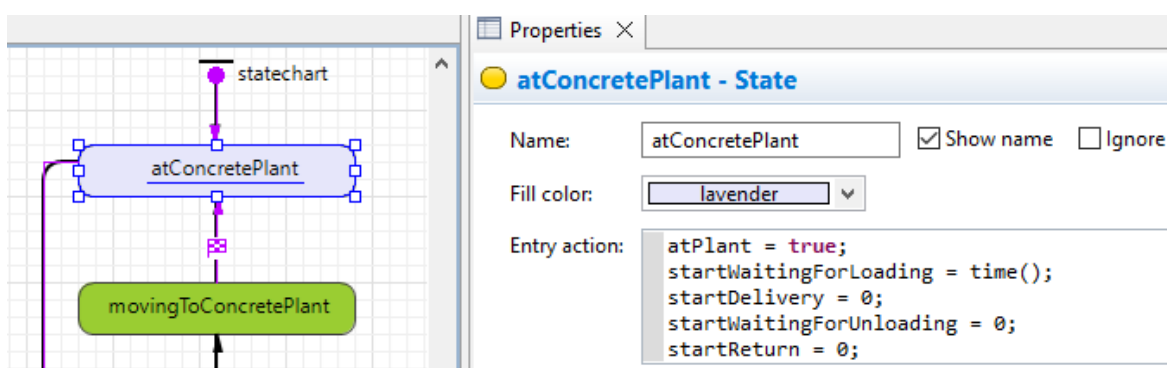


Рисунок 3.7 – Стан знаходження вантажівки на бетонному заводі

У стані Loading виконуємо дії пов'язані з встановленням необхідних змінних для накопичення статистики та подальшої візуалізації (рисунок 3.9).

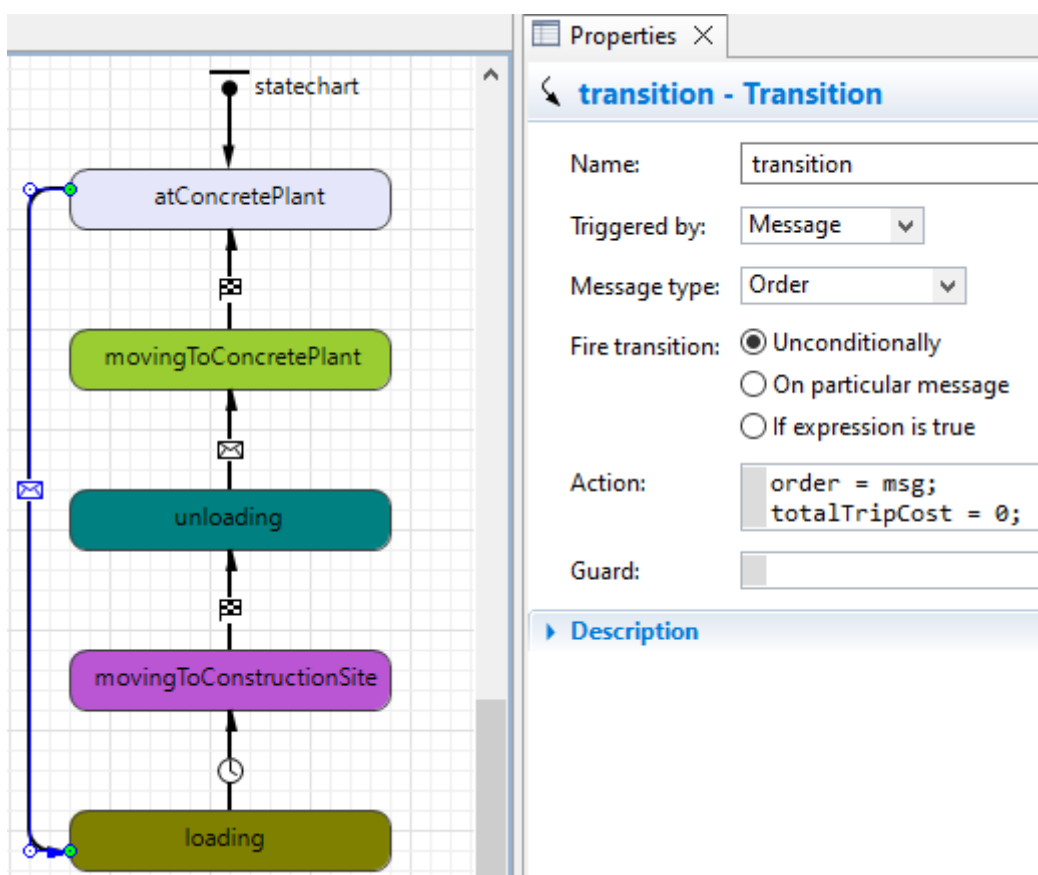


Рисунок 3.8 – Перехід у стан завантаження

Наступний стан `movingToConstructionSite` моделює рух вантажівки до будівельного майданчику.

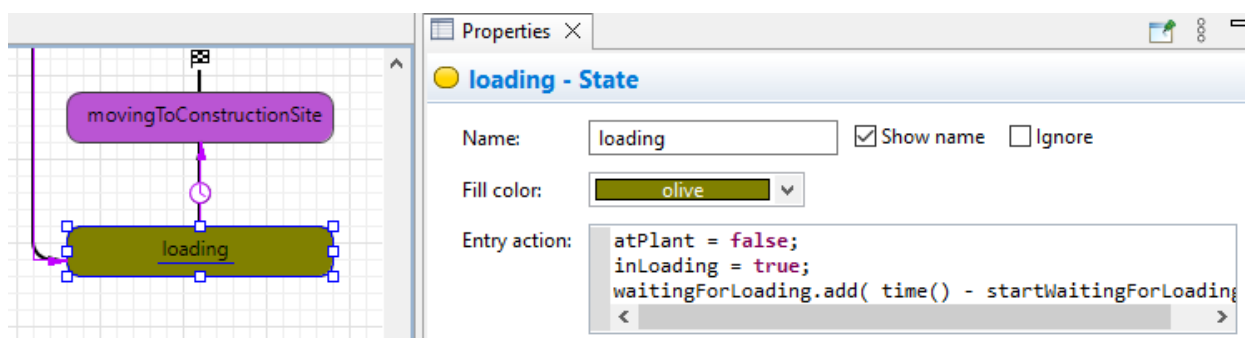


Рисунок 3.9 – Стан завантаження вантажівки

Дії, що виконуються у стані `movingToConstructionSite` пов'язані з встановленням змінних для розрахунку часових характеристик та збереження історії замовлень. Коли вантажівка досягає будівельного майданчику (цей момент виступає тригером для переходу), вона переходить до стану

очікування розвантаження (рисунок 3.10). На цьому етапі перевіряється, чи виконання замовлення вклалося у встановлений час `notLaterThan`. Далі керування передається агенту `ConstructionSite`, де відбувається обробка вантажівки та виконання дій, пов'язаних із розвантаженням.

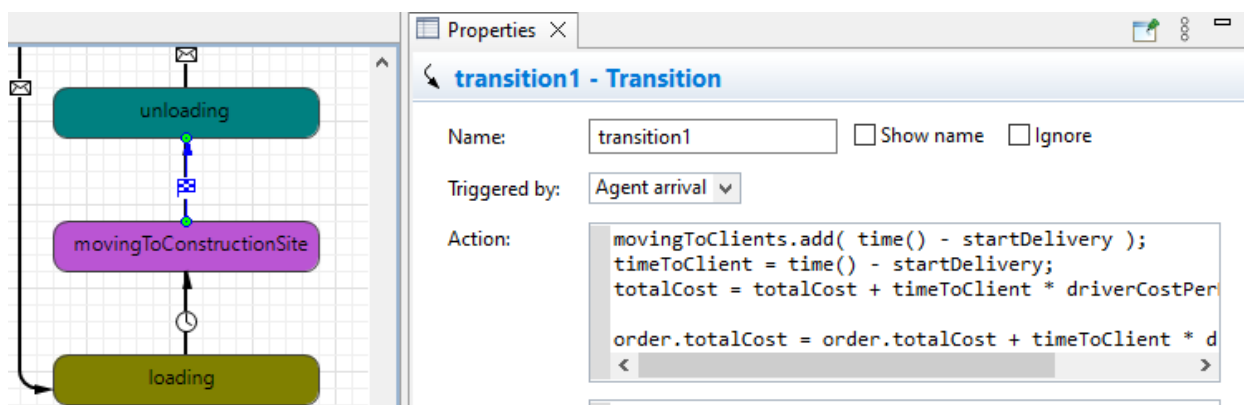


Рисунок 3.10 – Стан, що моделює рух вантажівки до будівельного майданчику

Після завершення процесу розвантаження керування повертається до діаграми станів вантажівки. У стані `Unloading` здійснюється візуалізація на анімації, яка відображає, що вантажівка порожня, та накопичується відповідна статистика (рисунок 3.11).

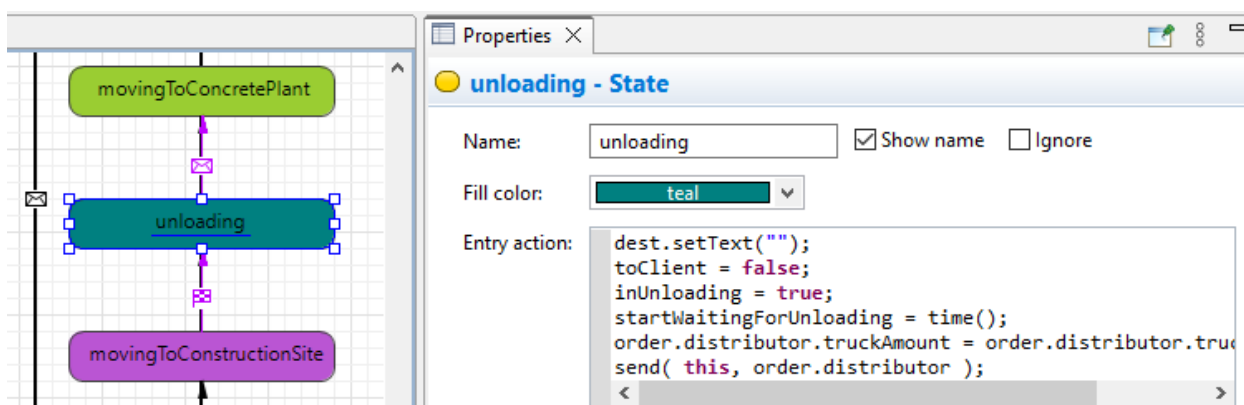


Рисунок 3.11 – Стан розвантаження вантажівки на будівельному майданчику

Коли на будівельному майданчику закінчилась розвантаження вантажівки діаграма станів отримує повідомлення «unloaded» (рисунок 3.12), що дає можливість зафіксувати часові характеристики та відправити вантажівку порожньою назад до свого бетонного заводу.

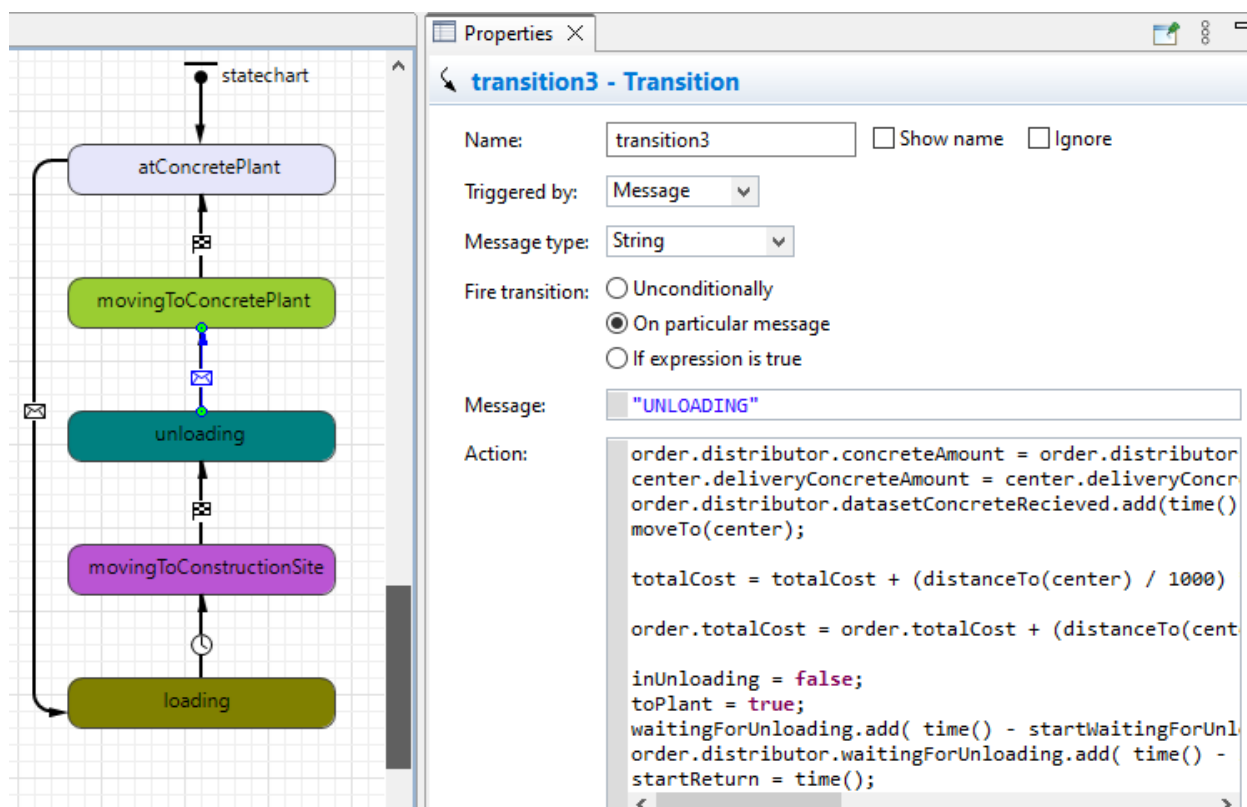


Рисунок 3.12 – Перехід до стану movingToConcretePlant

3.3.3 Агент будівельного майданчику

Структура параметрів та змінних агента ConstructionSite представлена на рисунку 3.13.

Агент ConstructionSite має наступні параметри та змінні:

- name – місцезнаходження;
- center – бетонний завод, що обслуговує даний будівельний майданчик (найближчий але можна задати іншу логіку вибору);
- demandsRate, demandsOver, demandsAmount – параметри замовлення;
- concreteAmount – обсяг доставленого бетону;

- `waitingForUnloading` – дані гістограми, що зберігаються для розподілу часу очікування розвантаження бетонозмішувачів.

Налаштовуємо періодичне замовлення бетону за допомогою події `generateDemand`. Додаємо моделювання процесу розвантаження транспортних засобів у вигляді процесної діаграми (рисунок 3.14).

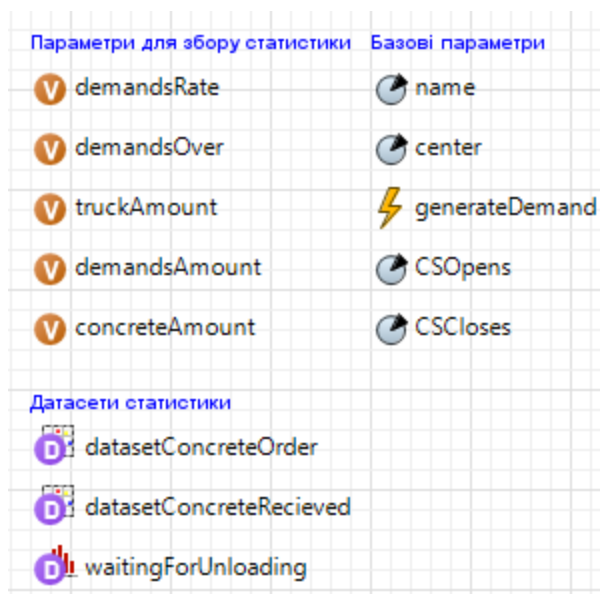


Рисунок 3.13 – Параметри та змінні агенту `ConstructionSite`

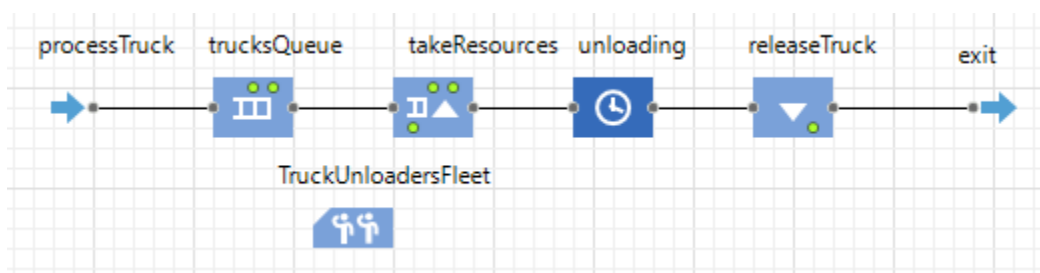


Рисунок 3.14 – Імітаційна модель агенту `ConstructionSite`

3.3 Розширення імітаційної моделі до управлінсько-економічного рівня

В п.3.2 ми надали опис техніко-операційної моделі виробництва та доставки бетону.

Зараз ми здійснили розширення початкової техніко-операційної моделі виробництва та доставки бетону до управлінсько-економічного рівня,

включивши ключові дохідні та витратні параметри. Це дозволило враховувати не лише логістику постачання, а й економічну ефективність діяльності підприємства, зокрема через такі показники, як виручка від реалізації, вартість транспортування, витрати на модернізацію та використання сировини тощо.

На цьому етапі ці параметри інтегруються у поведінку відповідних агентів у імітаційній моделі (таблиця 3.3).

Таблиця 3.3 – Управлінсько-економічні параметри імітаційної моделі

| Агент | Основні управлінсько-економічні параметри |
|------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ConcretePlant | productionCostPerCubicMeter – собівартість 1 м ³ бетону; pricePerCubicMeter – ціна реалізації; dailyFixedCost – постійні витрати; idleTruckCostPerHour – вартість простою власного транспорту; idleRentalTruckCostPerHour – вартість простою орендованого транспорту |
| ConstructionSite | penaltyPerHourDelay – штраф за прострочення; orderCancelCost – вартість скасування замовлення; prioritySurcharge – надбавка за терміновість; remoteDeliverySurcharge – надбавка за віддаленість; minimumOrderRevenue – мінімальний дохід за замовлення; waitingFeePerHour – плата за очікування |
| TruckMixer | fuelCostPerKm – вартість пального; fuelConsumptionPerKm – витрати пального; driverCostPerHour – оплата водія; maintenanceCostPer1000km – витрати на обслуговування; depreciationPerTrip – амортизація за рейс |
| Main | інтегральні КРІ системи: загальний дохід, витрати, прибуток, продуктивність системи, середній час доставки, статистика простоїв, показники ризиків та ефективності логістики |

Агенти ConcretePlant приймають рішення щодо обсягів виробництва, розрахунку вартості виробництва, враховуючи витрати на сировину та ресурси, поточну продуктивність та можливу модернізацію. Вони оцінюють доцільність розширення виробництва залежно від доступного бюджету, обсягів сировини, транспортних витрат та очікуваної виручки.

Для цього агент ConcretePlant має такі параметри:

- вартість виробництва 1 м³ бетону (productionCostPerCubicMeter),
враховує: сировину, електроенергію, амортизацію обладнання;

- базова ціна за м³ бетону (`pricePerCubicMeter`): окремо за видами бетону;
- витрати на утримання заводу (`dailyFixedCost`), враховує: охорона, персонал, енерговитрати, оренда;
- вартість утримання власного автопарку на заводі (`idleTruckCostPerHour`), що дозволяє моделі показувати економічну неефективність великого простою, допомагає знаходити «вузькі місця» та стимулює оптимізацію розкладів/маршрутів;
- вартість оренди вантажівок для перевезень (`idleRentalTruckCostPerHour`).

Результати, які накопичує агент `ConcretePlant`: загальний дохід по всіх замовленнях; середній дохід за м³; чистий прибуток, як різниця між доходом та витратами.

Агенти `ConstructionSite` замовники ініціюють попит на бетон (`Order`) із заданими часовими та об'ємними обмеженнями, що впливає на прибутковість окремих ланцюгів постачання.

Ці агенти отримують наступні параметри управлінсько-економічного рівня:

- штраф за прострочення першої доставки (`penaltyPerHourDelay`), що є стимулом іншим агентам до дотримання графіка;
- вартість відмови від замовлення (`orderCancelCost`), якщо бетон зіпсувався чи замовник відмовився;
- надбавка за терміновість (`prioritySurcharge`), що є додатковою платою, якщо доставку потрібно здійснити у вузьке вікно часу або раніше стандартного терміну;
- надбавка за віддаленість (`remoteDeliverySurcharge`), при доставці на великі відстані, що перевищують заданий поріг.
- мінімальний дохід за замовлення (`minimumOrderRevenue`), що вводиться для економічного сенсу доставки маленьких партій;
- плата за очікування на майданчику (`waitingFeePerHour`).

Агенти TruckMixer здійснюють вибір маршруту та постачальника з урахуванням транспортних витрат і строків виконання замовлень.

Агенти TruckMixer отримують наступні параметри управлінсько-економічного рівня:

- вартість пального (fuelCostPerKm);
- середнє споживання пального (fuelConsumptionPerKm);
- вартість оплати водія (driverCostPerHour);
- вартість обслуговування на 1000 км (maintenanceCostPer1000km);
- амортизаційна вартість за 1 поїздки (depreciationPerTrip).

Загальний розрахунок економічної ефективності моделюється через акумулювання виручки від виконаних замовлень та сукупних витрат, пов'язаних із виробництвом, логістикою та модернізацією.

Таким чином, модель дозволяє оцінити економічні наслідки управлінських рішень, що приймаються в умовах обмежених ресурсів і змінного попиту, забезпечуючи практичну основу для підтримки стратегічного та оперативного планування.

3.4 Розширення імітаційної моделі для врахування ризиків у виробництві та логістиці готового бетону

У процесі виробництва та доставки готового бетону значний вплив на ефективність функціонування системи мають фактори ризику, що здатні призводити до затримок виконання замовлень, зниження якості бетонної суміші, зростання витрат та погіршення показників прибутковості. Особливо актуальним врахування ризиків є для систем із мобільними бетонними заводами, складною транспортною логістикою та роботою в умовах нестабільної інфраструктури.

У запропонованій імітаційній моделі фактори ризику формалізуються як стохастичні події (таблиця 3.4), що змінюють параметри агентів Main, ConcretePlant, TruckMixer та ConstructionSite. Для кожного ризику задаються

ймовірність виникнення, тривалість дії та наслідки для виробничих, логістичних або економічних показників. Це дозволяє не лише відтворювати штатний режим роботи системи, а й досліджувати її поведінку за умов збоїв, затримок, дефіциту ресурсів або зміни зовнішнього середовища.

Таблиця 3.4 – Групи факторів, які враховуються в імітаційній моделі

| Група ризиків | Приклади | Як враховується в моделі |
|-------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|
| Виробничі ризики | поломка змішувача, зниження продуктивності, затримка дозування, нестача матеріалів | зміна maxProduction, збільшення mixingTime, затримка партії, зупинка заводу |
| Ресурсні ризики | нестача цементу, піску, щебеню, добавок, води | перевірка запасів, подія checkMaterialStock, затримка постачання матеріалів |
| Логістичні ризики | затори, перекриття доріг, зміна маршруту, аварії, нестача транспорту | збільшення часу маршруту, вибір альтернативного маршруту, зміна доступності TruckMixer |
| Ризики завантаження | черга на заводі, затримка оформлення документів, нерівномірне завантаження міксерів | збільшення часу очікування waitingForLoading, накопичення черги |
| Ризики на будмайданчику | неготовність до приймання бетону, черга на розвантаження, мала кількість працівників | збільшення waitingForUnloading, ризик втрати якості суміші |
| Якісні ризики | втрата оброблюваності, перевищення часу транспортування, температурний вплив | зменшення показника придатності, ризик браку або додаткових витрат |
| Економічні ризики | зростання вартості матеріалів, пального, простоїв | зміна cost-параметрів, зниження маржі, зміна точки на кривій прибутковості |
| Особливі умови | пошкодження інфраструктури, обмеження маршрутів, нестабільне енергопостачання | сценарні події, відключення вузлів, зменшення доступної потужності |

Таким чином, для врахування ризикових факторів у межах цифрового двійника виробничо-логістичної системи було розширено структуру агентів та механізми імітаційного моделювання. Реалізований підхід дозволяє враховувати випадкові події, що впливають на виробництво, транспортування, постачання сировини та процеси розвантаження бетонної суміші на будівельних майданчиках.

Для керування ризиковими сценаріями на рівні головного агента моделі Main введено набір параметрів імовірностей та затримок (таблиця 3.5).

Таблиця 3.5 – Параметри керування ризиковими сценаріями для агента Main

| Назва параметру | Опис |
|----------------------------|--------------------------------------------------------|
| trafficRiskProbability | імовірність логістичного ризику доставки |
| plantFailureProbability | імовірність виробничого ризику |
| materialDelayProbability | імовірність затримки постачання матеріалів |
| siteNotReadyProbability | імовірність неготовності будівельного майданчика |
| qualityLossProbability | імовірність ризику втрати якості |
| materialDeliveryDelayHours | додаткова затримка постачання матеріалів |
| trafficDelayHours | затримка транспортування |
| siteDelayHours | затримка розвантаження |
| productivityRiskMultiplier | коефіцієнт зниження продуктивності виробництва |
| riskDelayCostPerHour | економічні втрати від однієї години ризикової затримки |

Для забезпечення можливості інтерактивного сценарного аналізу зазначені параметри реалізовані у вигляді керованих елементів інтерфейсу, що дозволяє змінювати інтенсивність ризикових впливів під час виконання моделювання.

3.4.1 Врахування ризиків у агенті бетонного заводу

Для агента ConcretePlant реалізовано механізми моделювання виробничих ризиків та ризиків постачання сировини. До структури агента додано змінні, що зазначено у таблиці 3.6.

Виробничий ризик моделюється під час розрахунку часу виготовлення бетонної суміші. Базовий час виробництва визначається як:

$$T_{prod} = \left(\frac{P_{max}}{t_{dose} + t_{mix} \cdot V} \right) \cdot V, \quad (3.1)$$

де P_{max} – максимальна продуктивність заводу; t_{dose} – час дозування; t_{mix} – час змішування; V – об'єм замовлення.

Таблиця 3.6 – Параметри моделі ризиків для агента ConcretePlant

| Назва параметру | Опис |
|----------------------------|-----------------------------------------|
| productionRiskEvents | кількість виробничих ризикових подій |
| totalProductionRiskDelay | накопичена затримка виробництва |
| materialRiskCount | кількість ризиків постачання матеріалів |
| totalMaterialSupplyDelay | сумарна затримка постачання |
| materialSupplyRiskOccurred | ознака виникнення ризику постачання |

У разі виникнення виробничого ризику тривалість процесу збільшується:

$$T_{risk} = T_{prod} \cdot k_{risk}, \quad (3.2)$$

де k_{risk} – коефіцієнт зниження продуктивності виробництва.

3.4.2 Врахування ризиків постачання матеріалів

Ризики постачання враховуються у події `checkMaterialStock`, що виконує періодичний контроль рівня запасів цементу, піску, щебеню, води та домішок.

При формуванні заявки на поповнення запасів визначається можливість виникнення ризикової події:

$$R_{mat} = \begin{cases} 1, & rand() < P_{mat} \\ 0, & \text{інакше} \end{cases}, \quad (3.3)$$

де P_{mat} – імовірність затримки постачання.

У разі виникнення ризику час доставки матеріалів збільшується:

$$T_{risk}^{delivery} = T_{delivery} + T_{mat}^{delay}, \quad (3.4)$$

де T_{mat}^{delay} – додаткова затримка постачання.

3.4.3 Врахування ризиків доставки та втрати якості бетонної суміші

Для агента TruckMixer реалізовано механізми врахування логістичних ризиків доставки (заторів, обмеження швидкості, зміни маршруту, затримок на дорожній інфраструктурі) та ризиків втрати якості бетонної суміші під час транспортування.

До структури агента додано змінні, що знаходяться у таблиці 3.7.

Таблиця 3.7 – Параметри моделі ризиків для агента TruckMixer

| Назва параметру | Опис |
|----------------------|------------------------------------------------------------|
| trafficRiskCount | кількість логістичних ризикових подій |
| totalTrafficDelay | накопичена затримка транспортування |
| qualityRiskCount | кількість випадків ризику втрати якості |
| qualityRiskEvaluated | ознака виконання оцінювання ризику якості |
| qualityRiskOccurred | ознака виникнення ризику втрати якості |
| qualityRiskScore | інтегральний показник ризику втрати якості бетонної суміші |

Логістичний ризик моделюється як випадкова подія:

$$R_{traffic} = \begin{cases} 1, & rand() < P_{traffic} \\ 0, & \text{інакше} \end{cases}, \quad (3.5)$$

де $P_{traffic}$ – імовірність виникнення транспортного ризику.

У разі виникнення ризику час транспортування збільшується:

$$T_{risk}^{transport} = T_{transport} + T_{traffic}^{delay}, \quad (3.6)$$

де $T_{traffic}^{delay}$ – додаткова затримка логістики доставки.

Окрім транспортних затримок у моделі враховується ризик втрати якості бетонної суміші внаслідок: перевищення допустимого часу транспортування; тривалого очікування розвантаження; підвищеної температури навколишнього середовища; інтенсивного циклу перемішування; простоїв автобетонозмішувача.

Для оцінювання ризику втрати якості використовується інтегральний показник Q_{score} , що формується шляхом накопичення штрафних компонентів при перевищенні допустимих порогових значень параметрів

$$Q_{score} = w_1 I_{transport} + w_2 I_{wait} + w_3 I_{temp}, \quad (3.7)$$

де $I_{transport}$ – індикатор перевищення допустимого часу транспортування; I_{wait} – індикатор надмірного очікування розвантаження; I_{temp} – індикатор несприятливих температурних умов; w_i – вагові коефіцієнти впливу відповідних факторів (визначено експертами на рівні $w_1 = 0.4, w_2 = 0.3, w_3 = 0.3$).

Ризик втрати якості визначається за умовою:

$$R_{quality} = \begin{cases} 1, & rand() < Q_{score} \\ 0, & \text{інакше} \end{cases}. \quad (3.8)$$

У разі виникнення ризику: збільшується показник `qualityRiskCount`; знижується придатність бетонної суміші; зростають економічні втрати системи; погіршуються показники ефективності логістики.

Запропонований механізм дозволяє оцінювати вплив логістичних факторів на якість готового бетону в реальному часі та аналізувати взаємозв'язок між транспортними затримками, режимами доставки та ризиком втрати технологічних характеристик бетонної суміші.

3.4.4 Врахування ризиків на будівельному майданчику

Для агента `ConstructionSite` реалізовано механізми врахування ризиків, пов'язаних із процесами приймання та розвантаження бетонної суміші на будівельному майданчику. У моделі враховуються такі фактори ризику: неготовність будівельного майданчика до приймання бетону; зайнятість або відсутність розвантажувального обладнання; дефіцит персоналу; порушення організації робіт; одночасне прибуття декількох автобетонозмішувачів; затримки підготовки опалубки або арматурних робіт; несприятливі погодні умови.

До структури агента додано змінні, що зазначено у таблиці 3.8.

Таблиця 3.8 – Параметри моделі ризиків для агента `ConstructionSite`

| Назва параметру | Опис |
|-------------------------------|------------------------------------------------------|
| <code>siteRiskCount</code> | кількість ризикових подій на будівельному майданчику |
| <code>totalSiteDelay</code> | сумарна затримка, спричинена ризиками майданчика |
| <code>siteRiskOccurred</code> | ознака виникнення ризикової події |
| <code>unloadingDelay</code> | додатковий час затримки розвантаження |
| <code>siteRiskScore</code> | інтегральний показник ризику будівельного майданчика |

Для комплексної оцінки стану будівельного майданчика використовується інтегральний показник S_{score} :

$$S_{score} = w_1 I_{queue} + w_2 I_{busy} + w_3 I_{staff}, \quad (3.9)$$

де I_{queue} – рівень черги автобетонозмішувачів; I_{busy} – показник зайнятості розвантажувального обладнання; I_{staff} – показник доступності персоналу; w_i – вагові коефіцієнти впливу факторів (визначено експертами на рівні $w_1 = 0.4, w_2 = 0.3, w_3 = 0.3$).

У моделі інтегральний ризик формується шляхом накопичення штрафних компонентів при перевищенні допустимих значень часу очікування, завантаження майданчика та зайнятості ресурсів.

Ризикова подія на будівельному майданчику визначається за умовою:

$$R_{site} = \begin{cases} 1, & rand() < S_{score} \\ 0, & \text{інакше} \end{cases}. \quad (3.10)$$

У разі виникнення ризику час розвантаження збільшується:

$$T_{risk}^{unloading} = T_{unloading} + T_{site}^{delay}, \quad (3.11)$$

де T_{site}^{delay} – додаткова затримка розвантаження.

Таким чином у разі виникнення ризику: збільшується показник `siteRiskCount`; накопичується затримка `totalSiteDelay`; зростає час простою автобетонозмішувачів; збільшується загальний цикл доставки; підвищується ризик втрати якості бетонної суміші.

Запропонований підхід дозволяє враховувати вплив організаційних та технологічних факторів будівельного майданчика на ефективність функціонування виробничо-логістичної системи готового бетону та оцінювати стійкість системи до локальних порушень процесу бетонування.

3.4.5 КРІ оцінювання ризикостійкості системи

Для оцінювання ефективності функціонування системи в умовах ризику введено набір інтегральних КРІ (таблиця 3.9).

Таблиця 3.9 – КРІ оцінювання ризикостійкості системи

| Назва параметру | Опис |
|--------------------------|------------------------------------|
| totalRiskEvents | загальна кількість ризикових подій |
| totalRiskDelay | сумарна ризикова затримка |
| averageRiskDelayPerOrder | середня затримка на замовлення |
| riskCost | економічні втрати через ризики |
| riskAdjustedProfit | прибуток з урахуванням ризиків |
| resilienceIndex | індекс стійкості системи |

Розрахунок економічних втрат:

$$C_{risk} = T_{risk}^{sum} \cdot C_{hour}, \quad (3.12)$$

де T_{risk}^{sum} – сумарна затримка; C_{hour} – вартість однієї години затримки.

Прибуток з урахуванням ризиків:

$$Profit_{risk} = Profit - C_{risk}. \quad (3.13)$$

Індекс стійкості системи визначається як:

$$RI = 1 - w_1 D - w_2 Q - w_3 E, \quad (3.14)$$

де D – нормалізований показник затримок; Q – нормалізований показник ризиків якості; E – нормалізований показник кількості ризикових подій; w_i – вагові коефіцієнти впливу факторів, що визначено експертами на рівні $w_1 = 0.4, w_2 = 0.3, w_3 = 0.3$.

Запропонована модель врахування ризиків дозволяє виконувати комплексний сценарний аналіз функціонування виробничо-логістичної системи готового бетону, оцінювати вплив різних категорій ризиків на економічні та часові показники, а також досліджувати стійкість системи в умовах динамічних змін середовища функціонування.

Таким чином, запропонований підхід забезпечує інтеграцію імітаційного моделювання, економічного аналізу та ризик-орієнтованого управління в єдиному цифровому двійнику бетонного підприємства, що підвищує обґрунтованість планування та ефективність функціонування виробничо-логістичної системи.

На рисунку 3.15 показано інтегральну структуру розробленого підходу зі створення єдиного цифрового двійника бетонного підприємства для підтримки прийняття рішень, сценарного аналізу та оптимізації виробничо-логістичних процесів.



Рисунок 3.15 – Інтегральна структура розробленого підходу

Основою є імітаційна модель виробництва та логістики готового бетону, яка враховує стохастичність процесів, GIS-інфраструктуру та поведінку

агентів виробничо-логістичної системи. Другий рівень моделі пов'язаний із управлінсько-економічним розширенням. У моделі враховуються витрати, доходи, прибутковість, простої, транспортні витрати та інтегральні КРІ ефективності роботи підприємства. Третій рівень – це моделювання ризиків. У системі реалізовано врахування виробничих, ресурсних, логістичних, економічних та якісних ризиків, що дозволяє оцінювати стійкість функціонування системи в умовах невизначеності.

3.5 Висновки до розділу 3

1. Вперше розроблено імітаційну модель аналізу процесів виробництва та логістики готових бетонних сумішей, за допомогою якої можливе вирішення цілого ряду завдань, серед яких оцінка раціональності та ефективності організації виробництва та доставки товарного бетону, визначення вузьких місць виробничих та логістичних процесів, прогнозування показників діяльності бетонних заводів, з урахуванням зміни умов виробництва, формування даних для прийняття рішень щодо скорочення часу простою заводу та клієнта тощо.

2. Модель створено як поєднання різних методів моделювання, а саме: дискретне-подійне моделювання використовується для опису виробничих процесів на заводі та процесу розвантаження автобетонозмішувачів і укладання бетону на будівельному майданчику; системна динаміка – для формування запасів матеріалів на бетонних заводах; агентне моделювання, оскільки заводи, будівельні майданчики, вантажівки та замовлення – це агенти з автономною поведінкою та можливістю масштабування у популяції необхідної кількості.

3. Кожен агент має свої змінні та математичну модель, що описує його поведінку. Модель охоплює технологічні процеси на виробництві та логістиці готових бетонних сумішей: постачання сировини; дозування бетону; змішування бетону; завантаження хімікатів/домішок; формування черги

автобетонозмішувачів на бетонному заводі; завантаження в автобетонозмішувачі; виїзд на будівельний майданчик; черги автобетонозмішувачів на будівельному майданчику; розвантаження автобетонозмішувачів на будівельному майданчику; повернення автобетонозмішувачів на бетонний завод.

4. Імітаційна модель процесів виробництва і логістики дозволила відтворити реальні процеси з урахуванням розроблених оптимізаційних моделей, стохастичних факторів, динамічних змін попиту і обмежень ресурсів, що робить можливим тестування різних стратегій управління виробничо-логістичною системою підприємства.

5. Основні результати, представлені в цьому розділі, опубліковані [141], [147], [148].

РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА ІНФОРМАЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ДЛЯ ПЛАНУВАННЯ ВИРОБНИЦТВА ТА РОЗПОДІЛУ БЕТОНУ

4.1 Інформаційна технологія для планування виробництва та розподілу бетону

Схему інформаційної технології застосування цифрового двійника у виробництві та логістиці готового бетону показано на рисунку 4.1.

Фізичний рівень формує технологічне обладнання бетонних заводів (дозатори, змішувачі, транспортери, бункери тощо), сенсори та IoT-пристрої, PLC-контролери. Для автотранспорту (бетоновози, автобетонозмішувачі) також передбачається оснащення сенсорами та IoT-пристроями (температура, вологість, GPS тощо).

В якості інтерфейсів обміну даними: MQTT брокер – для обміну повідомленнями з IoT-пристроїв, сенсорів, контролерів (PLC, датчики, SCADA); REST API / WebSocket — для обміну з мобільними додатками, трекерами, зовнішніми платформами, системами транспортної логістики; OPC UA/Modbus TCP – для промислових систем управління, інтеграції SCADA.

IT-екосистема цифрового двійника передбачає зв'язок з різними інформаційними системами – ERP/CRM/WMS/TMS/MES/ SCADA.

SCADA – контроль і управління виробництвом у реальному часі, первинна обробка сигналів, контроль на місці, тривоги/сповіщення, передача даних у верхні рівні.

MES/EAM – планування графіків виробництва, передача статусів обладнання та подій цифровому двійнику, підтримка обліку обслуговування та експлуатаційних режимів, предиктивне обслуговування.

TMS (Transport Management System) – управління автопарком, моніторинг доставок, маршрути, відхилення, інтеграція з цифровим двійником, використання GPS-даних і телеметрії з транспорту для побудови цифрової логістичної моделі.

WMS (Warehouse Management System) – контроль стану запасів цементу, добавок тощо, координація поставчань з виробництвом.

CRM-система – зв'язок із замовниками, графіки поставок, пріоритети клієнтів, зворотній зв'язок від клієнтів (якість, затримки та ін.).

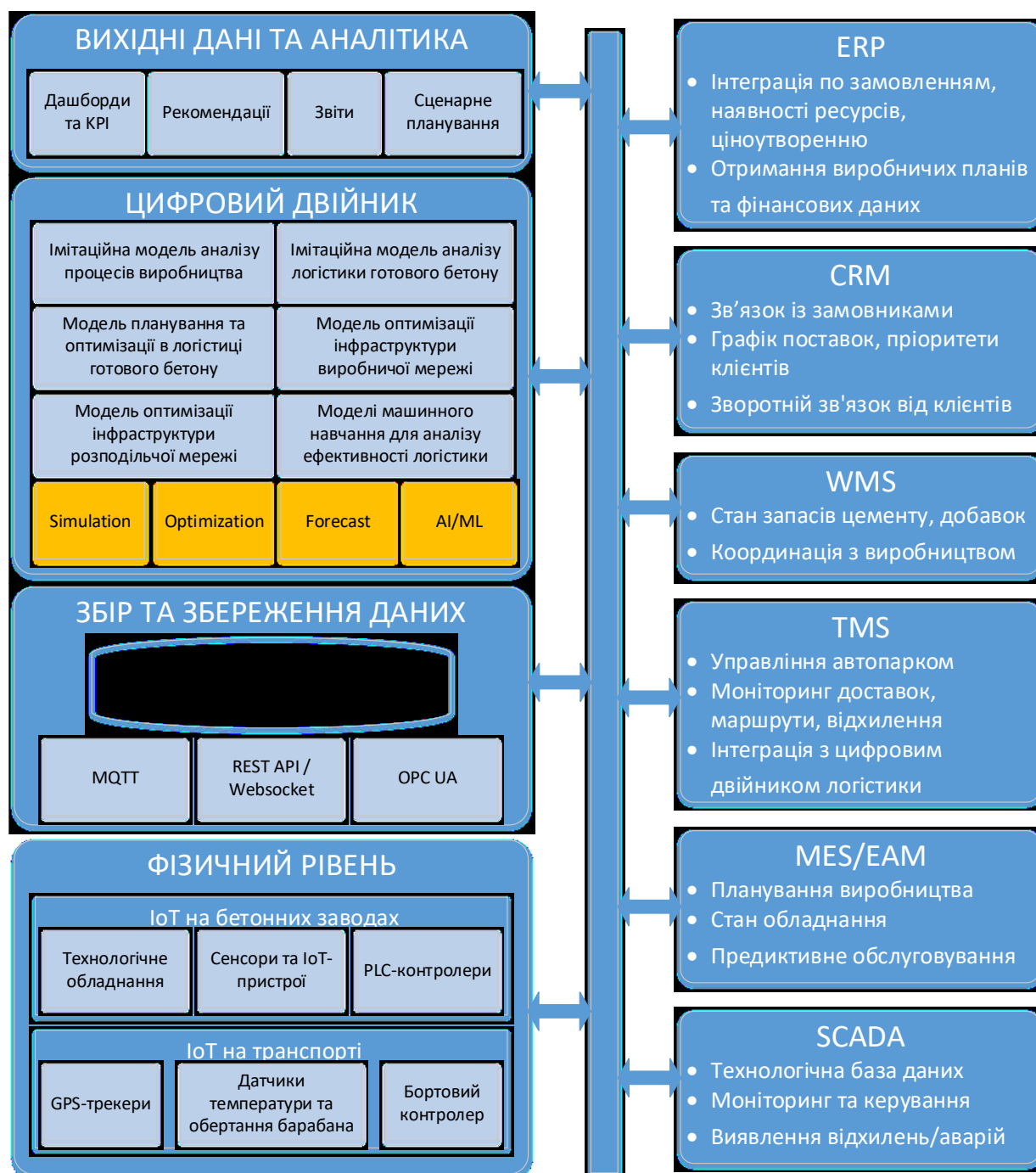


Рисунок 4.1 – Схема інформаційної технології цифрового двійнику для планування та управління виробництвом й логістикою бетонних підприємств

ERP-система – інтеграція по замовленням, наявності ресурсів, ціноутворенню, отримання виробничих планів та фінансових даних, планування інвестиційних витрат та проектів модернізації виробничої та розподільчої інфраструктури тощо.

В нашому цифровому двійнику передбачені моделі, що було розроблено в роботі: імітаційна модель аналізу процесів виробництва; імітаційна модель аналізу логістики готового бетону; модель планування та оптимізації в логістиці готового бетону; модель оптимізації інфраструктури виробничої мережі; модель оптимізації інфраструктури розподільчої мережі; моделі машинного навчання для аналізу ефективності логістики.

Вихідні дані та аналітика: дашборди та KPI; рекомендації від імітаційних моделей та моделей машинного навчання: оптимальні маршрути, розподіл ресурсів тощо; сценарне планування; звіти.

4.2 Приклад моделювання процесів виробництва та логістики товарного бетону

На рисунку 4.2 представлено модель після запуску. Агенти «живуть» у просторі геоінформаційної системи. Назви початкових місць виробничих потужностей та дистриб'юторів зчитуються з бази даних, для розглянутого прикладу місця розташування мережі бетонних заводів та будівельних майданчиків показані на рисунку 4.3. Пошукова система геоінформаційної системи використовується для пошуку місць на карті та розміщенні там агентів.

Вантажівки рухаються по реальних дорогах, а маршрути створюються, коли транспортні засоби починають рухатися по своїх напрямках. Біля кожного з бетонних заводів можна побачити гістограму обсягу виробленого бетону та кількісний показник вільних вантажівок. Біля будівельного майданчику бачимо кількісне значення доставленого за весь час бетону та піктограми вантажівок, що знаходяться на майданчику та очікують розвантаження.

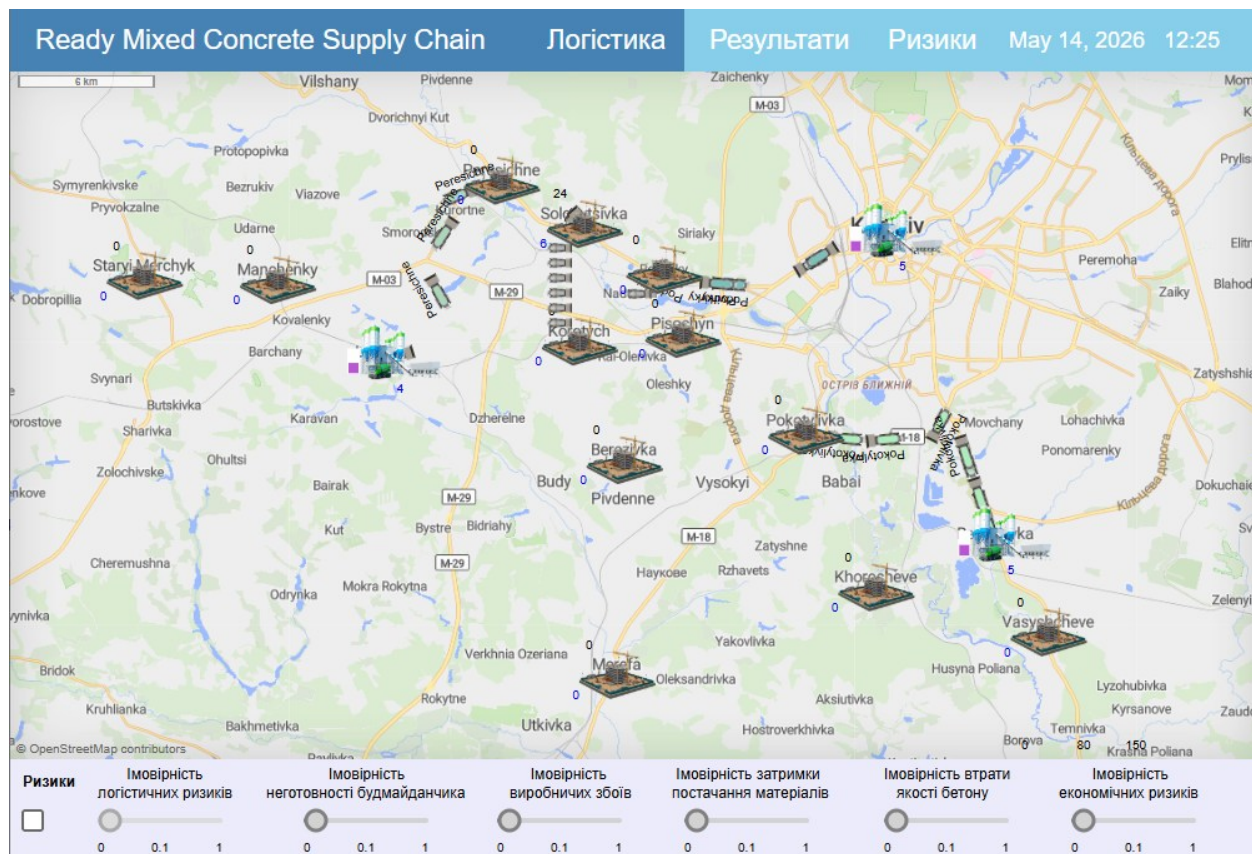


Рисунок 4.2 – Анімація моделювання доставки бетону у мережі бетонних заводів та будівельних майданчиків

Будівельні майданчики

| | city |
|----|-----------------|
| 1 | Pokotyivka |
| 2 | Pisochyn |
| 3 | Podvirky |
| 4 | Solonytsivka |
| 5 | Manchenky |
| 6 | Vasyshcheve |
| 7 | Staryi Merchyk |
| 8 | Merefa |
| 9 | Khorosheve |
| 10 | Berezivka, Харк |
| 11 | Peresichne |
| 12 | Korotych |

Мережа бетонних заводів

| | city |
|---|-------------|
| 1 | Kharkov |
| 2 | Bezliudivka |
| 3 | Liubotyn |

Рисунок 4.3 – Мережа бетонних заводів та будівельних майданчиків

Натисканням на об'єкти виробництва та будівництва здійснюється перехід до перегляду результатів моделювання. Модель анімовано, тому можна спостерігати за рухом вантажівок, які рухаються по реальній транспортній інфраструктурі, а не за якимось гіпотетичними маршрутами або умовно заданими відстанями, як представлено в більшості публікацій за даною тематикою.

В нашому прикладі модель імітує доставку бетону в Харківський області. Ланцюжок поставок включає три виробничі потужності та дванадцять будівельних майданчиків, які замовляють випадкові кількості продукту заданого типу кожні 1-2 дні. На кожному бетонному заводі є парк автобетонозмішувачів, кількість яких можна змінювати як на початку моделювання так і в процесі. Кожен бетонний завод використовує певну кількість автобетонозмішувачів з різними або однаковими об'ємами. Коли виробництво отримує замовлення від будівельного майданчику, воно перевіряє наявність залишків від поточних замовлень. Якщо необхідна кількість заданого типу доступна, завод надсилає завантажену вантажівку клієнту. В іншому випадку замовлення чекає у черзі, поки завод не створить достатню кількість продукту. Правило вибору місця для доставки бетону визначається за різними стратегіями, наприклад, відповідно до пріоритету місця, а потім відповідно до мінімального часу простою будівельного майданчика та мінімального часу простою автобетонозмішувача.

Процес виробництва визначений всіма технологічними операціями, що притаманні бетонним заводам з урахуванням наявних запасів матеріалів та продуктивності установки. Перед завантаженням бетону на кожній установці формується черга автобетонозмішувачів. Після того, як автобетонозмішувач завантажено, він залишає завод і прямує на вказаний будівельний майданчик. Коли автобетонозмішувач прибуває до клієнту, він приєднується до черги з пріоритетом типу FIFO, що гарантує, що перший прибулий автобетонозмішувач також буде першим розвантажений. Після того, як

автобетонозмішувач розвантажено, він залишає ділянку та повертається на свій завод.

Під час моделювання процес можна відобразити за допомогою різних представлень, таких як параметри та змінні, діаграми, графіки. На рисунку 4.4 представлений екран з результатами, що формуються для окремого бетонного заводу.

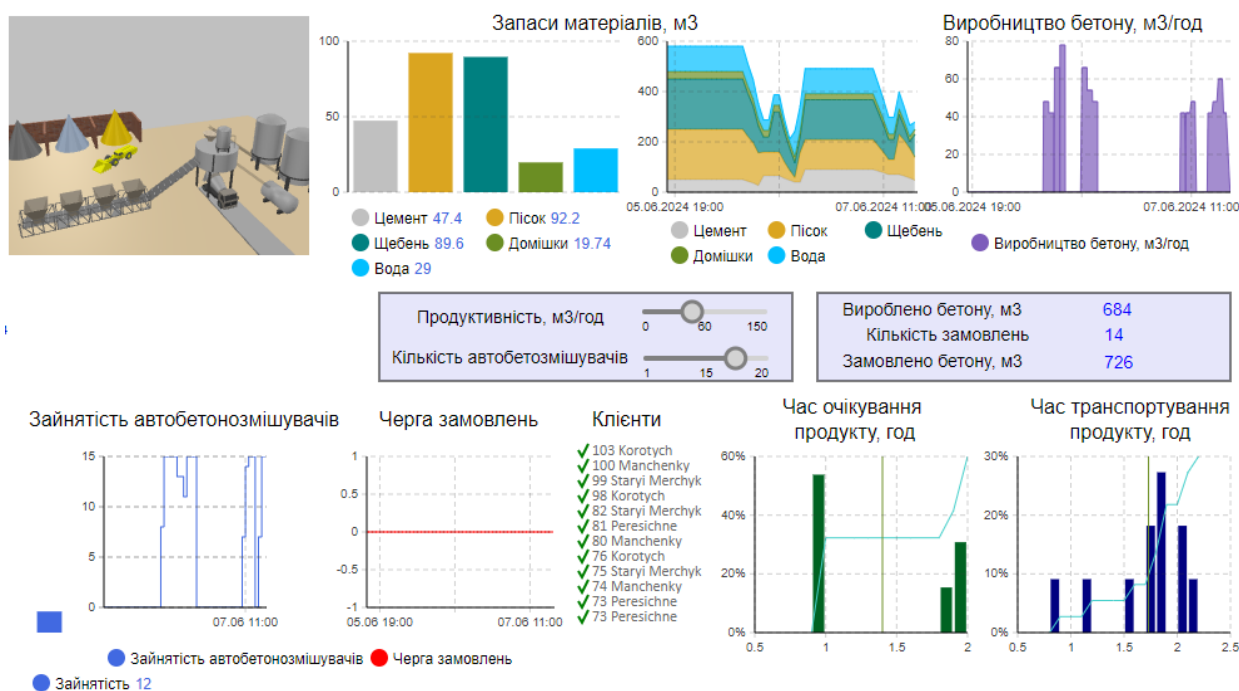


Рисунок 4.4 – Результати моделювання для бетонного заводу

Спостерігаючи за процесом моделювання можна побачити основні показники по замовленнях та виробництву, поточні запаси матеріалів та динаміку їх споживання та поставок, виробництво бетону у кількісних показниках та у динаміці виробництва/відвантаження, зайнятість автопарку автобетонозмішувачів, чергу замовлень від клієнтів, список відправлень вантажів клієнтам із зазначенням статусу (вчасно/із запізненням), гістограми розподілу часу очікування продукту та часу на транспортування. Крім того, додані елементи для варіювання параметрів продуктивності заводу та розміру автопарку вантажівок. Є 3D анімація відвантаження бетону з заводу.

На рисунку 4.5 представлена візуалізація результатів моделювання для одного з будівельних майданчиків. Спостерігаючи за процесом моделювання можна побачити основні показники та графіки по замовленням та доставці бетону, зайнятість розвантажувачів, гістограму розподілу часу очікування розвантаження, кількість автобетонозмішувачів, що знаходяться в очікуванні розвантаження.

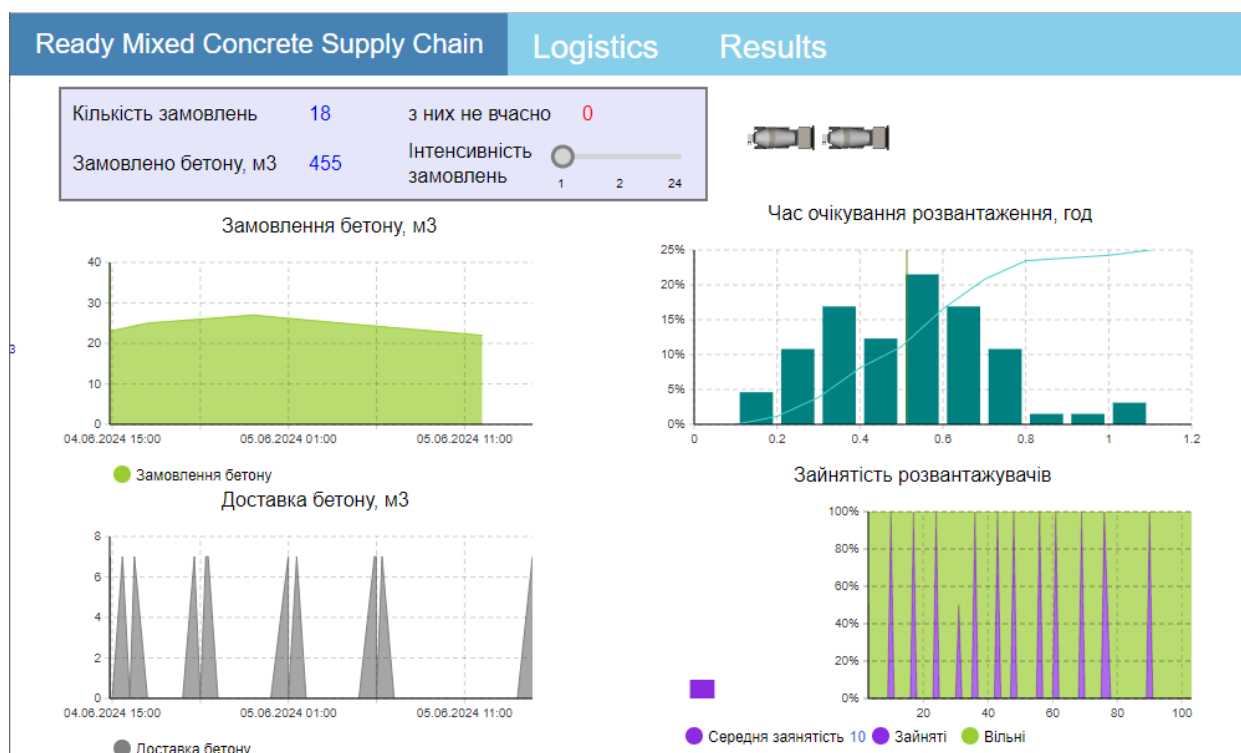


Рисунок 4.5 – Результати моделювання для будівельного майданчику

Під час моделювання можна проводити експерименти варіюючи інтенсивність замовлень від цього будівельного майданчику.

На рисунку 4.6 представлений екран з результатами для одного з автобетонозмішувачів. Спостерігаючи за процесом моделювання можна побачити діаграму станів вантажівки, діаграму Ганта із зазначенням термінів початку та закінчення операцій), гістограми часу очікування завантаження, розвантаження, доставки бетону клієнтам, повернення на завод. Також на рисунку можна побачити безпосередньо діаграму станів, що визначає поведінку агенту автобетонозмішувача.



Рисунок 4.6 – Результати моделювання для автобетонозмішувача

Діаграма включає наступні стани: на заводі, на завантаженні, на шляху до клієнту, очікування розвантаження на будівельному майданчику, повернення на завод. Для кожного з переходів між станами задані відповідні тригери, що пов'язані з отриманням повідомлень від інших агентів та частин моделі процесу. Через стохастичний характер процесу доставки та обслуговування вантажівок, тривалість конкретних частин процесу, будучи випадковими змінними, представлена їхніми розподілами ймовірностей.

На рисунку 4.7 представлені агреговані результати по всій мережі бетонних заводів, де можна побачити поточні показники щодо виробництва бетону, динаміку виробництва, зайнятість автопарку та час очікування продукту. Таким чином, під час моделювання підсумовуються обсяги виробленого бетону на всіх заводах, а також обсяги бетону, доставленого на об'єкти будівництва. Коли отримана сума дорівнює попиту на будівельному майданчику або потужності конкретного заводу, даний будівельний майданчик/завод тимчасово припиняє виробництво/доставку до появи нових замовлень.

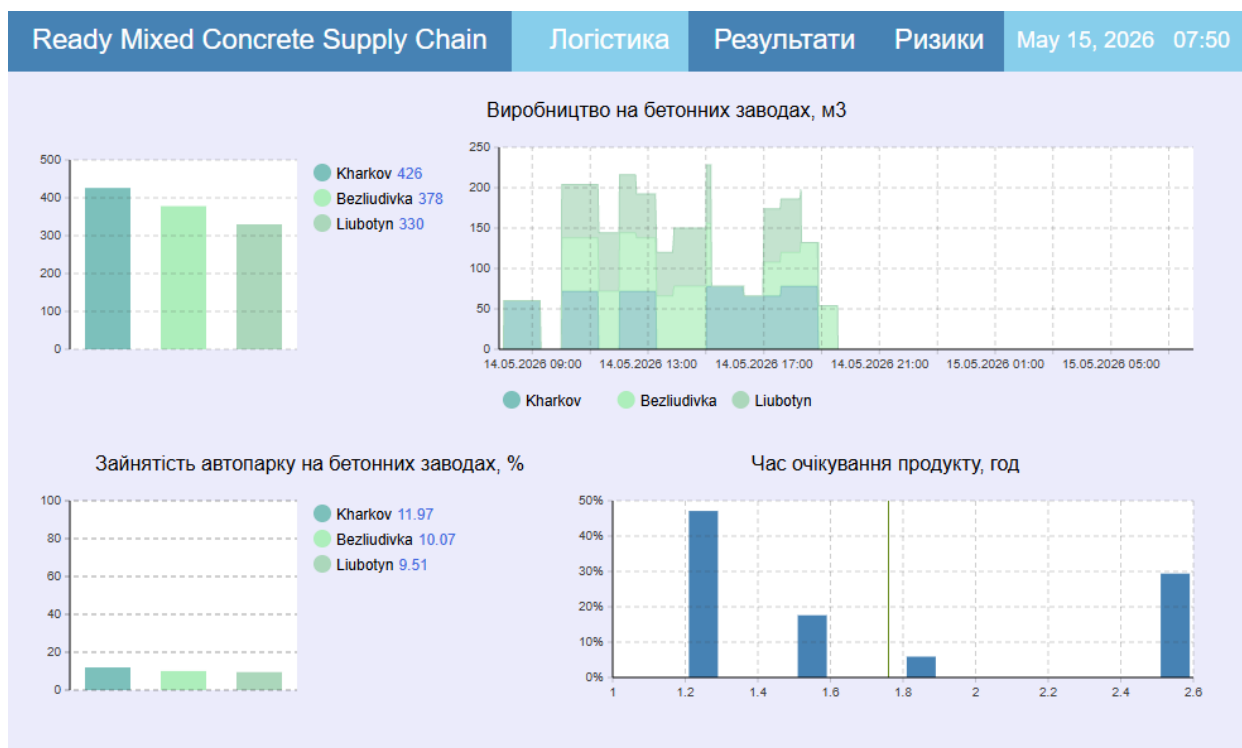


Рисунок 4.7 – Результати по мережі бетонних заводів

На рисунку 4.8 представлені дані маршрутів автобетонозмішувачів, де фіксуються всі часові параметри, що дає можливість в подальшому використати ці дані при формуванні графіків доставки.

Маршрути автобетонозмішувачів

| Пункт призначення | Початок очікування завантаження | Початок доставки | Початок очікування розвантаження | Початок повернення на завод | Час у дорозі до майданчику | Час у дорозі до заводу |
|-------------------|---------------------------------|------------------|----------------------------------|-----------------------------|----------------------------|------------------------|
| Korotych | 102.14 | 105.35 | 105.54 | 0.0 | 0.19 | 0.23 |
| Peresichne | 101.85 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.19 | 0.2 |
| Peresichne | 102.48 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.19 | 0.2 |
| Peresichne | 101.06 | 106.36 | 0.0 | 0.0 | 0.19 | 0.2 |
| Peresichne | 103.36 | 106.51 | 0.0 | 0.0 | 0.19 | 0.2 |
| Peresichne | 101.5 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.19 | 0.2 |
| Peresichne | 103.33 | 106.51 | 0.0 | 0.0 | 0.11 | 0.11 |
| Peresichne | 102.93 | 106.48 | 0.0 | 0.0 | 0.19 | 0.2 |
| Peresichne | 102.98 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.11 | 0.11 |
| Korotych | 103.4 | 105.68 | 105.88 | 0.0 | 0.19 | 0.23 |
| Korotych | 103.95 | 105.38 | 105.58 | 0.0 | 0.19 | 0.23 |
| Korotych | 103.2 | 105.15 | 105.34 | 106.44 | 0.19 | 0.23 |
| Manchenky | 104.45 | 107.0 | 107.11 | 0.0 | 0.11 | 0.23 |
| Korotych | 106.22 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.19 | 0.2 |
| Manchenky | 105.74 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.19 | 0.2 |

Рисунок 4.8 – Маршрути автобетонозмішувачів заводу та їх часові параметри

Для перевірки та верифікації розробленої імітаційної моделі було проведено експерименти. Перевірка моделі передбачає формальну перевірку

правильності її роботи з заданими даними, отриманими від експертів галузі. Результати моделі можуть бути більш чутливими до змін одних даних і менш чутливими до змін інших даних.

Формуються різні графіки, серед них лінійні графіки витрат, доходів та прибутку по днях (рисунок 4.9).

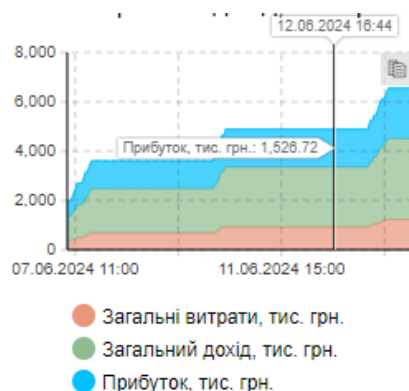


Рисунок 4.9 – Витрати, доходи та прибуток, тис. грн.

Для оцінки результатів наведемо розрахункові дані щодо визначення прибутку бетонного заводу на місяць (таблиця 4.1).

Таблиця 4.1 – Економічні параметри виробничо-логістичної системи підприємства

| Параметр | Значення |
|-----------------------------------------------------------------------|----------|
| Витрати | |
| Собівартість виробництва 1 м ³ , грн/м ³ | 800 |
| Вартість доставки за 1 км на 1 м ³ , грн/км/м ³ | 2.5 |
| Витрати на паливо за 1 рейс, грн | 250 |
| Оплата водію вантажівки за годину, грн/год | 150 |
| Обслуговування вантажівки за 1 км, грн/км | 1.5 |
| Щоденні фіксовані витрати заводу, грн | 10 000 |
| Доходи | |
| Ціна продажу 1 м ³ , грн/м ³ | 1 400 |
| Середня відстань доставки, км | 15 |
| Середній об'єм доставки, м ³ | 6 |
| Щоденний обсяг виробництва, м ³ | 300 |

1. Дохід у місяць

Дохід = продано m^3 × ціна = $300 m^3/\text{день} \times 30 \text{ днів} \times 1\,400 \text{ грн} = 12\,600\,000$
грн.

2. Витрати на виробництво

Витрати на виробництво = $300 \times 30 \times 800 = 7\,200\,000$ грн.

3. Витрати на доставку (на $1 m^3$)

Витрати на доставку = $15 \text{ км} \times 2.5 \text{ грн} = 37.5 \text{ грн}/m^3$

Витрати на доставку за місяць = $300 m^3 \times 30 \text{ днів} \times 37.5 \text{ грн} = 337\,500$ грн.

4. Витрати на пальне та обслуговування:

Витрати на пальне та обслуговування = $50 \text{ поїздок}/\text{день} \times 30 \text{ днів} \times (250 + 15 \times 6 \times 1.5) \text{ грн} = 1\,125\,000$ грн.

5. Зарплати водіїв:

Зарплати водіїв = $50 \text{ поїздок по } 1.5 \text{ год} = 75 \text{ год} \times 150 \times 30 = 337\,500$ грн.

6. Фіксовані витрати заводу:

Фіксовані витрати заводу = $10\,000 \text{ грн} \times 30 = 300\,000$ грн.

Таким чином, витрати за місяць $9\,300\,000$ грн.

Прибуток за місяць $3\,300\,000$ грн. при інтенсивному щоденному виробництві ($300 m^3/\text{день}$), що є реалістичним для середнього стаціонарного заводу. Це цілком співпадає з результатами, що отримано в процесі моделювання.

Співвідношення прибутку між ціною клієнта та продуктивністю логістики «останньої милі» визначається як крива прибутку готової суміші. Воно ілюструє компроміс між матеріальною маржею, показником ціни ($\text{грн}/m^3$), стандартизованим шляхом вилучення вартості сировини з ціни продукту, та продуктивністю логістики на останній милі ($m^3/\text{год}$). Характеристична крива представляє геометричне місце точок, необхідних для досягнення прибутку за визначений період. Такий графік має глибокий економіко-логістичний сенс і є гарним аналітичним інструментом, це графік, де по осі X – продуктивність логістики ($m^3/\text{год}$), по осі Y – маржа ($\text{грн}/m^3$).

Цей графік ілюструє компроміс: більша маржа зазвичай можлива при менших об'ємах (менше клієнтів поруч), а вища продуктивність – з клієнтами ближче, але з меншою ціною. Тут ми можемо бачити оптимум – ту точку, де прибуток найбільший.

Ми також додали контурні лінії однакового прибутку (10, 15 та 20 тис/год) – вони будуть гіперболічними.

Приклад кривої продуктивності, отриманий під час моделювання для одного із заводів наведений на рисунку 4.10.

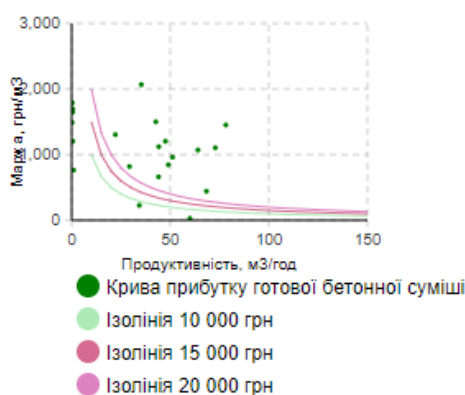


Рисунок 4.10 – Крива прибутковості для одного із заводів підприємства

Аналізуючи графік можна відмітити те, що поки немає очевидної лінійної залежності. Але є сценарії з високою маржею і високою продуктивністю, що дає максимальний прибуток. Є точки (замовлення) з низькою продуктивністю і високою маржею, і навпаки – це типова ознака того, що потрібно покращити логістику чи оптимізувати черги. Інші – з високою продуктивністю, але низькою маржею – вони дають помірний прибуток. Ізолінії чітко показують пороги прибутку. Наші точки (замовлення) в основному знаходяться вище ізоліній, що вказує на прибутковість. Чим вище точка на графіку (при тій же продуктивності), тим більша маржа.

Інтеграція оптимізаційних моделей поведінки агентів, економічних параметрів і аналітичних інструментів у модель підприємства з виробництва та доставки бетону суттєво підвищила її прикладну цінність та аналітичну

глибину. Завдяки оптимізації рішень агентів (щодо розподілу замовлень і логістики) модель дозволяє імітувати реалістичну взаємодію між учасниками системи в умовах обмежених ресурсів і змінного попиту. Введення економічних параметрів (собівартість, витрати на доставку, зарплати, амортизація тощо) дало змогу не лише враховувати фінансові аспекти діяльності, а й розраховувати ключові показники економічної ефективності. Додаткові аналітичні інструменти, зокрема крива прибутковості готової бетонної суміші, дали можливість візуалізувати компроміси між маржою та продуктивністю «останньої милі», ідентифікувати зони ефективної роботи та потенційних втрат.

Таким чином, модель трансформувалася з простої імітації виробничого процесу у стратегічний інструмент підтримки управлінських рішень, здатний оцінювати вплив змін у ринкових або операційних умовах на економічну доцільність діяльності виробника готового бетону.

Планування транспортних операцій по доставці готових бетонних сумішей вимагає вибору оптимального або майже оптимального рішення для максимізації економічних вигод. Зрозуміло, що найкоротший шлях до підвищення ефективності управління логістикою бетонного заводу веде до найбільш економічного та екологічно чистого вибору за рахунок споживання мінімальної кількості палива та зменшення викидів для автобетонозмішувачів.

Були сформовані різні сценарії для встановлення оптимальних вимог до параметрів функціонування елементів системи. Ця потреба визначається запланованим обсягом на певний день і рівнем відповідності доставки замовлень. Проведений аналіз чутливості деяких змінних, а саме: інтенсивності надходження замовлень, продуктивності заводу, відправлених об'ємів і доступних автобетонозмішувачів, щоб побачити вплив на відповідність поставок бетону. Ці результати дозволили оцінити кількість автозмішувачів, необхідних для виконання замовлень, і коефіцієнт використання потужностей виробничих установок відповідно до певного рівня обслуговування.

На рисунку 4.11 наведено результати оптимізації за максимізацією коефіцієнту використання автобетонозмішувачів. Варіювались та відповідно були обмеженнями такі параметри: продуктивність бетонних заводів, кількість автобетонозмішувачів, час очікування продукту.

Ready-Mixed Concrete Supply Chain: Optimization

| | Current | Best |
|-----------------------|---------|-----------|
| Iterations completed: | 198 | 100 |
| Replications: | 6 | 10 |
| Objective: ↑ | 0.747 | 0.847 |
| Parameters | | Copy best |
| productivity | 96 | 48 |
| nVehicles | 9 | 9 |
| totalUtilization | 0.263 | 0.847 |
| averageWaitingTime | 0.293 | 0.293 |

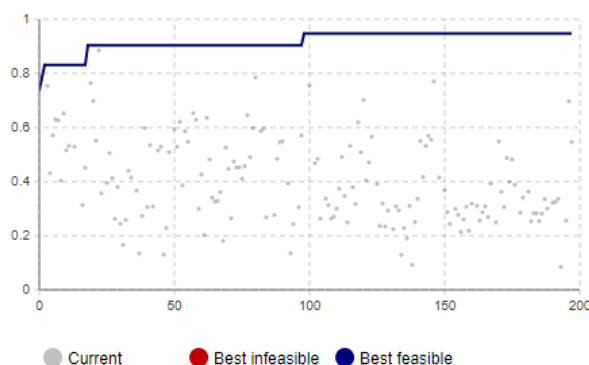


Рисунок 4.11 – Результати оптимізації за максимізацією коефіцієнта використання автобетонозмішувачів

Результати демонструють досягання значення зайнятості автобетонозмішувачів на рівні 85% при використанні 9 автобетозмішувачів, продуктивності заводу 48 м³/год та середнім часом очікування автобетонозмішувачами продукту відповідно заданої інтенсивності замовлень 0.3 год.

На рисунку 4.12 наведено результати оптимізації за мінімізацією час очікування автобетонозмішувачами продукту. Варіювались та відповідно були обмеженнями такі параметри: продуктивність бетонних заводів,

кількість автобетонозмішувачів, коефіцієнт використання автобетонозмішувачів.

Ready-Mixed Concrete Supply Chain : Optimization

| | Current | Best |
|-----------------------|---------|-----------|
| Iterations completed: | 101 | 101 |
| Replications: | 6 | 10 |
| Objective: ↑ | 0.137 | 0.048 |
| Parameters | | Copy best |
| productivity | 46 | 73 |
| nVehicles | 10 | 12 |
| totalUtilization | 0.993 | 0.643 |
| averageWaitingTime | 0.087 | 0.048 |

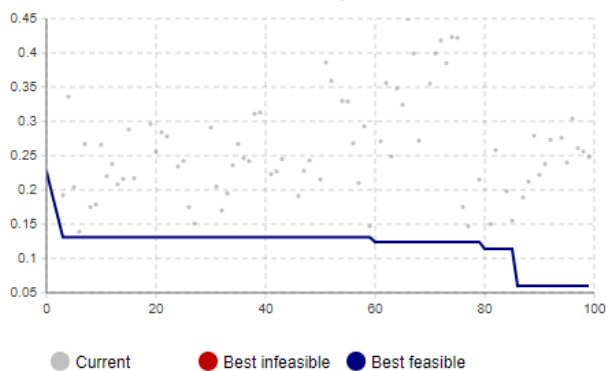


Рисунок 4.12 – Результати оптимізації за мінімізацією часу очікування автобетонозмішувачами продукту

Результати демонструють досягання значення мінімізацією часу очікування автобетонозмішувачами продукту на рівні приблизно 5 хвилин при використанні 12 автобетонозмішувачів, продуктивності заводу 73 м³/год та коефіцієнтом використання автобетонозмішувачів 64%.

Розроблена у прикладі імітаційна модель намагається оптимізувати процес одночасного постачання готової бетонної суміші до дванадцяти будівельних майданчиків від трьох бетонних заводів шляхом мінімізації часу (і відповідно вартості) простою автобетонозмішувачів та часу (і відповідно вартості) простою бетонних насосів на будівельному майданчику. Для цього

були застосовані різні комбінації розглянутих параметрів моделювання, а потім перевірені отримані результати експериментів.

Запропонована імітаційна модель може бути корисною на етапі планування та дозволяють точніше прогнозувати тривалість та режими робіт під час виконання виробничих операцій на бетонних заводах та доставки продукції споживачам і, таким чином, корисно впливати на прийняття рішень, прогнозування ходу робіт та краще управління процесами виробництва та логістики, з метою підвищення продуктивності, скорочення простоїв та зниження витрат.

Сформовані оптимізаційні та імітаційна модель можуть бути корисним інструментом, який допоможе менеджерам, диспетчерам та інженерам бетонних заводів та будівельних майданчиків спланувати виконання робіт.

Модель змогла оцінити варіанти системи з точки зору необхідних капіталовкладень (придбання та утримання автопарку) з ефективним використанням ресурсів, підтримуючи високий рівень обслуговування, що представляє додаткову цінність для клієнтів.

Рівні обслуговування різняться залежно від кількості доступних автобетонозмішувачів і визначеного обсягу відправки.

Важливо підкреслити, що в міру підвищення рівня обслуговування кожен додатковий автобетонозмішувач, включений у систему, забезпечує незначне збільшення показника відповідності доставки але значно коштує, що є виправданим при достатньо постійному попиту на продукцію, що на превеликий жаль поки, що є нерівномірним по території України.

4.3 Результати моделювання факторів ризику при виробництві та логістиці бетону

Метою цих експериментів було оцінювання впливу окремих категорій ризиків на часові та економічні показники; аналіз стійкості системи при комбінованому впливі ризикових факторів; визначення найбільш критичних

типів ризиків; дослідження поведінки системи в умовах зростання інтенсивності ризикових подій.

На першому етапі проведено моделювання базового сценарію без урахування ризикових факторів. Для всіх типів ризиків встановлено нульові значення імовірностей.

На рисунку 4.13 наведено результати моделювання базового сценарію. У базовому режимі система демонструє: відсутність ризикових подій; нульові ризикові затримки; максимальний індекс стійкості системи; стабільне зростання прибутку.

Індекс стійкості системи у даному випадку дорівнює 1.0, що відповідає повністю стабільному режиму функціонування виробничо-логістичної системи.

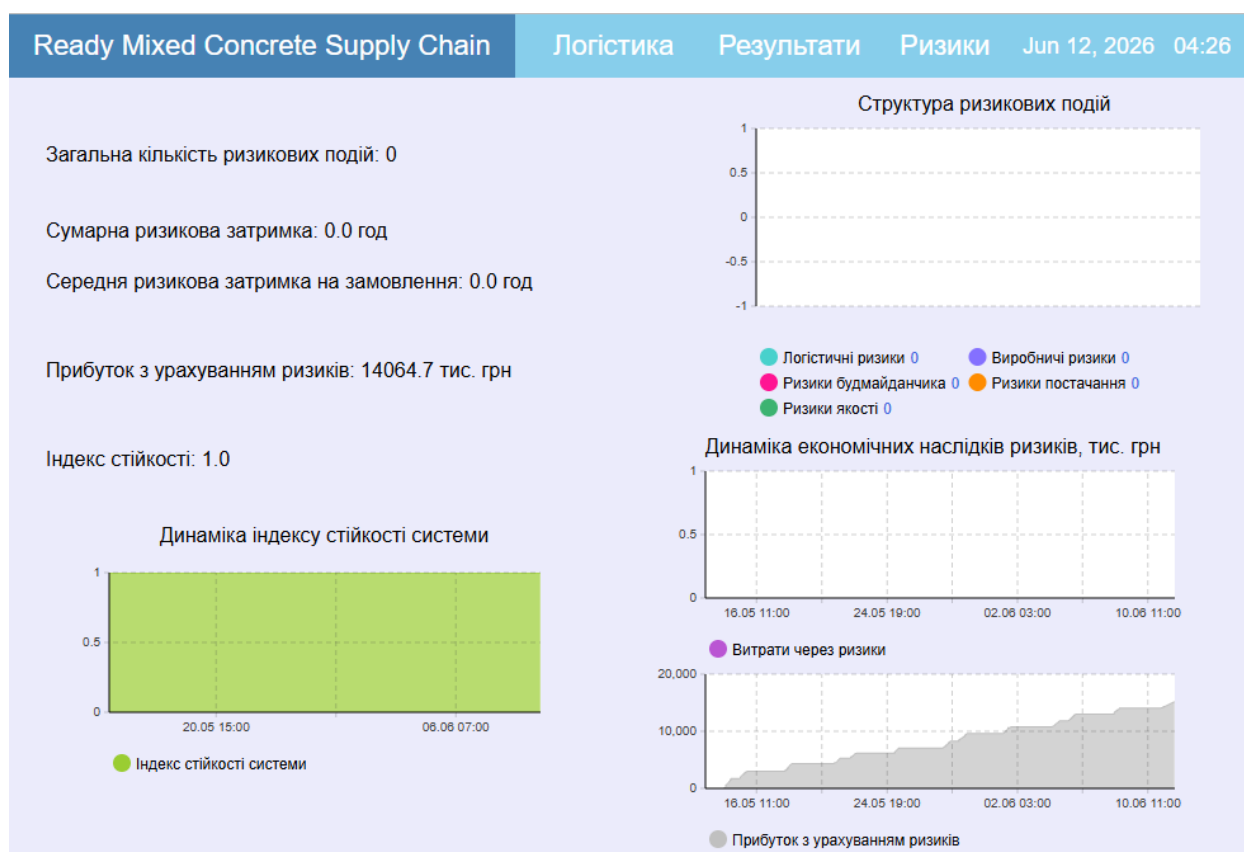


Рисунок 4.13 – Результати моделювання базового сценарію без

4.3.1 Сценарій логістичних ризиків доставки

У даному сценарії досліджувався вплив транспортних ризиків на ефективність доставки бетонної суміші. До моделі введено випадкові затримки, пов'язані із: заторами; зміною маршрутів; зниженням середньої швидкості руху; дорожніми обмеженнями. Імовірність виникнення транспортного ризику задавалася параметром $\text{trafficRiskProbability} = 0.01$.

У результаті експериментів спостерігалось:

- виникнення 89 логістичних ризикових подій;
- зростання сумарної затримки до 10.17 год;
- збільшення часу циклу доставки;
- накопичення економічних втрат через транспортні затримки.

При цьому індекс стійкості системи залишався на високому рівні та становив 0.98, що свідчить про достатню адаптивність системи до локальних транспортних порушень.

Крім транспортних ризиків спостерігались також окремі випадки ризику втрати якості бетонної суміші, що пояснюється збільшенням часу транспортування. На рисунку 4.14 наведено результати накопичення логістичних ризикових подій та динаміку економічних наслідків логістичних ризиків за місяць роботи мережі бетонних заводів.

4.3.2 Сценарій виробничих ризиків бетонного заводу

У межах даного сценарію досліджувався вплив виробничих ризиків на роботу бетонних заводів: зниження продуктивності обладнання; затримок виробництва; порушень технологічного процесу; нестабільності роботи змішувальних установок.

Виробничі ризики моделювались через: імовірність виникнення виробничого ризику – $\text{plantFailureProbability} = 0.01$; та коефіцієнт $\text{productivityRiskMultiplier} = 1.3$.

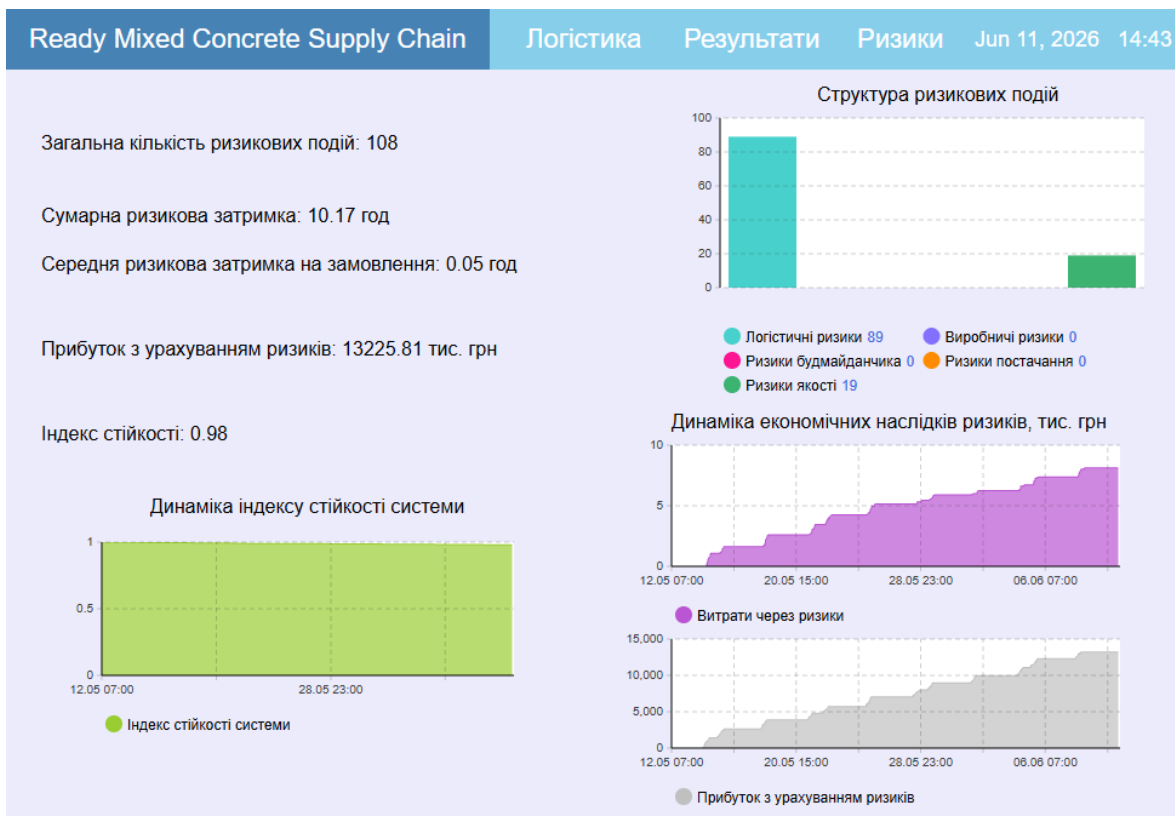


Рисунок 4.14 – Результати моделювання сценарію з логістичними ризиками доставки ризиків на протязі місяця роботи для мережі бетонних заводів

Результати моделювання наведені на рисунку 4.15.

У процесі експериментів спостерігалось:

- виникнення 50 виробничих ризикових подій;
- значне зростання сумарної ризикової затримки до 636.35 год;
- зменшення індексу стійкості системи до 0.7;
- накопичення черг замовлень;
- збільшення часу очікування автобетонозмішувачів.

Отримані результати показують, що виробничі ризики мають один із найбільших впливів на загальну стабільність системи, оскільки порушення роботи змішувального обладнання безпосередньо впливає на всі наступні етапи логістичного ланцюга.

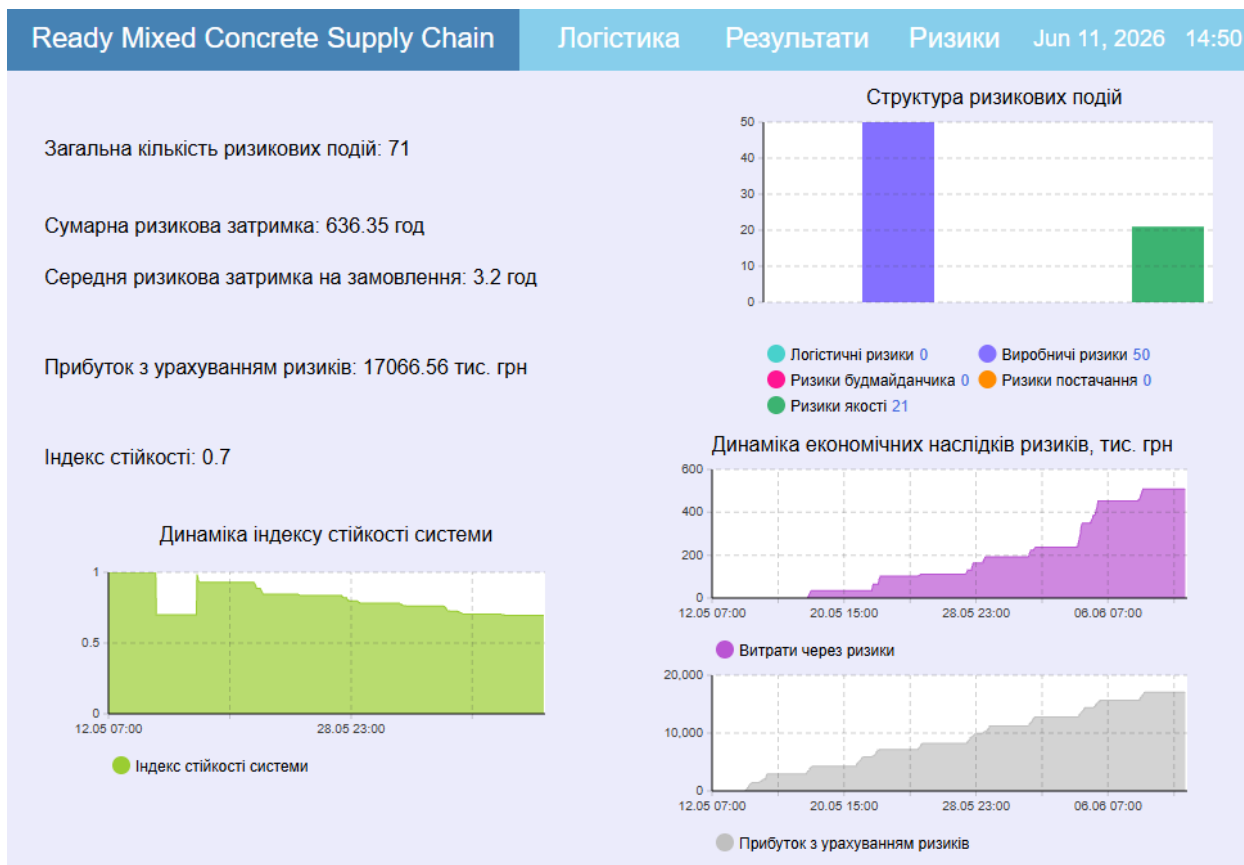


Рисунок 4.15 – Результати моделювання виробничих ризиків мережі бетонних заводів на протязі місяця роботи

4.3.3 Сценарій ризиків постачання матеріалів

У межах даного сценарію досліджувався вплив затримок постачання цементу, піску, щебеню, води та домішок. Ризики моделювались через: затримки доставки матеріалів; обмеження постачання; збільшення часу поповнення запасів. Для цього використовувались: параметр `materialDelayProbability`; додатковий час `materialDeliveryDelayHours`. Значення параметра `materialDelayProbability` встановлювалось на рівні 0.1. На рисунку 4.16 наведено результати моделювання ризиків постачання.

У результаті експериментів встановлено:

- виникнення 14 ризикових подій постачання;
- сумарну затримку 28 год;
- погіршення ритмічності виробництва;

- збільшення часу очікування виробничих ресурсів.

При цьому система зберігала відносно високий рівень стійкості (0.95), що пояснюється наявністю буферних запасів сировини та можливістю часткового перерозподілу ресурсів між виробничими циклами.

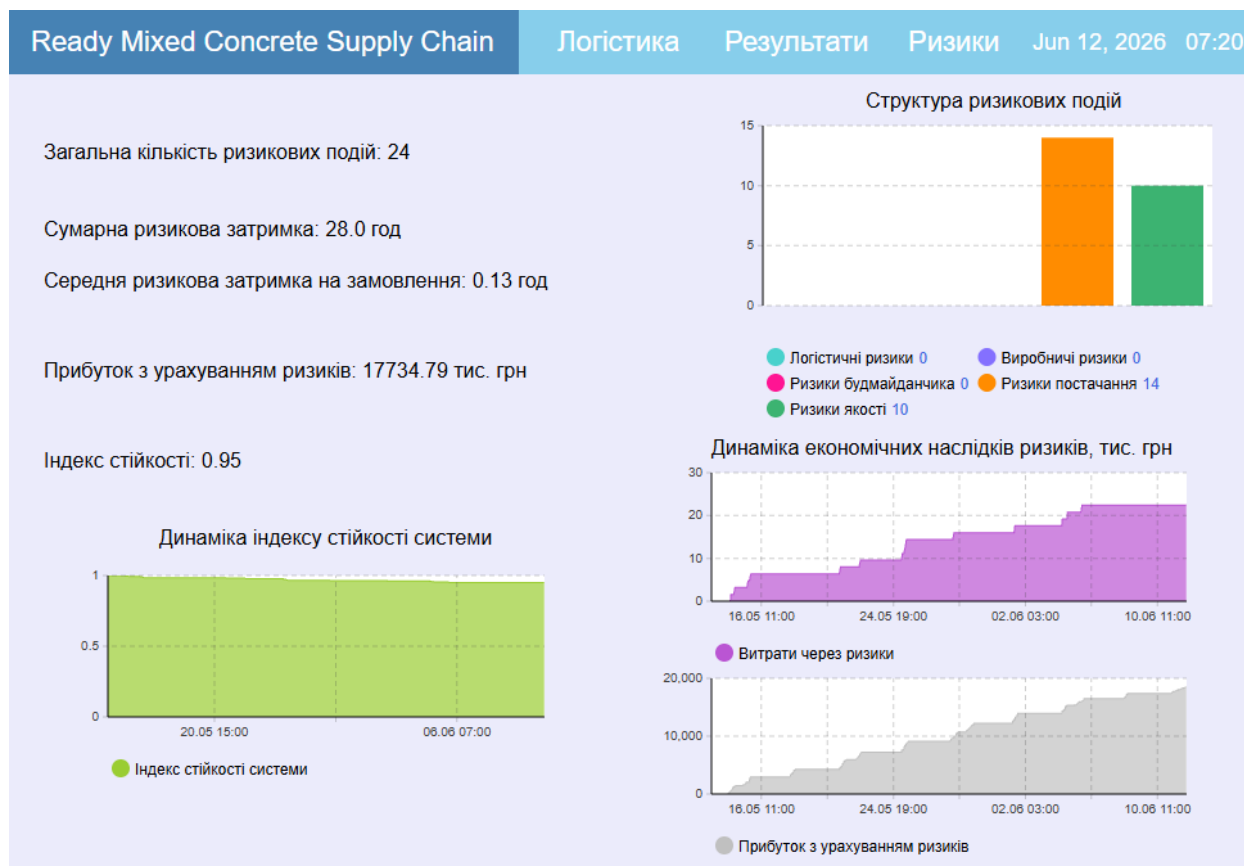


Рисунок 4.16 – Результати моделювання ризиків постачання матеріалів

4.3.4 Сценарій ризиків будівельного майданчика

У межах даного сценарію досліджувався вплив організаційних ризиків на будівельному майданчику: неготовності майданчика; затримок розвантаження; дефіциту персоналу; зайнятості обладнання. Імовірність виникнення ризику встановлювалась на рівні 0.2. Результати моделювання наведено на рисунку 4.17.

У процесі експериментів спостерігалось:

- виникнення 137 ризикових подій;

- збільшення часу очікування розвантаження;
- накопичення черг автобетонозмішувачів;
- зростання часу простою транспорту;
- зниження індексу стійкості системи до 0.93.

Отримані результати показують, що ризики будівельного майданчика істотно впливають на транспортну підсистему та можуть призводити до вторинних ризиків втрати якості бетонної суміші.

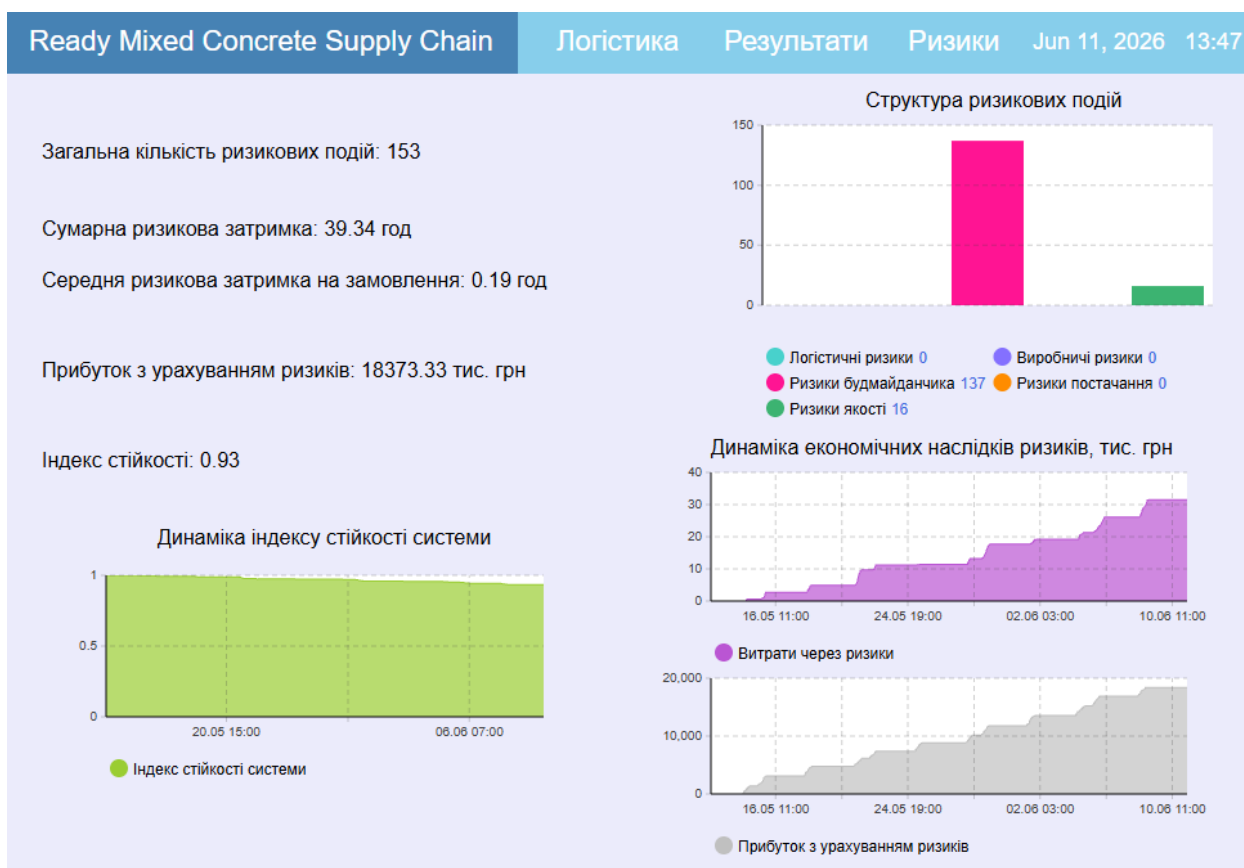


Рисунок 4.17 – Результати моделювання ризиків будівельного майданчика

4.3.5 Комбінований сценарій ризиків

На заключному етапі проведено комплексне дослідження системи при одночасному впливі: логістичних ризиків; виробничих ризиків; ризиків постачання; ризиків будівельного майданчика; ризиків втрати якості;

економічних ризиків. Для всіх категорій ризиків встановлювалась імовірність 0.1.

Результати комбінованого сценарію наведено на рисунку 4.18.

У результаті моделювання спостерігалось:

- 242 ризикові події;
- сумарна ризикова затримка 488.53 год;
- середня затримка на замовлення 2.41 год;
- зниження індексу стійкості системи до 0.72;
- значне накопичення економічних втрат;
- зростання ризиків втрати якості бетонної суміші.

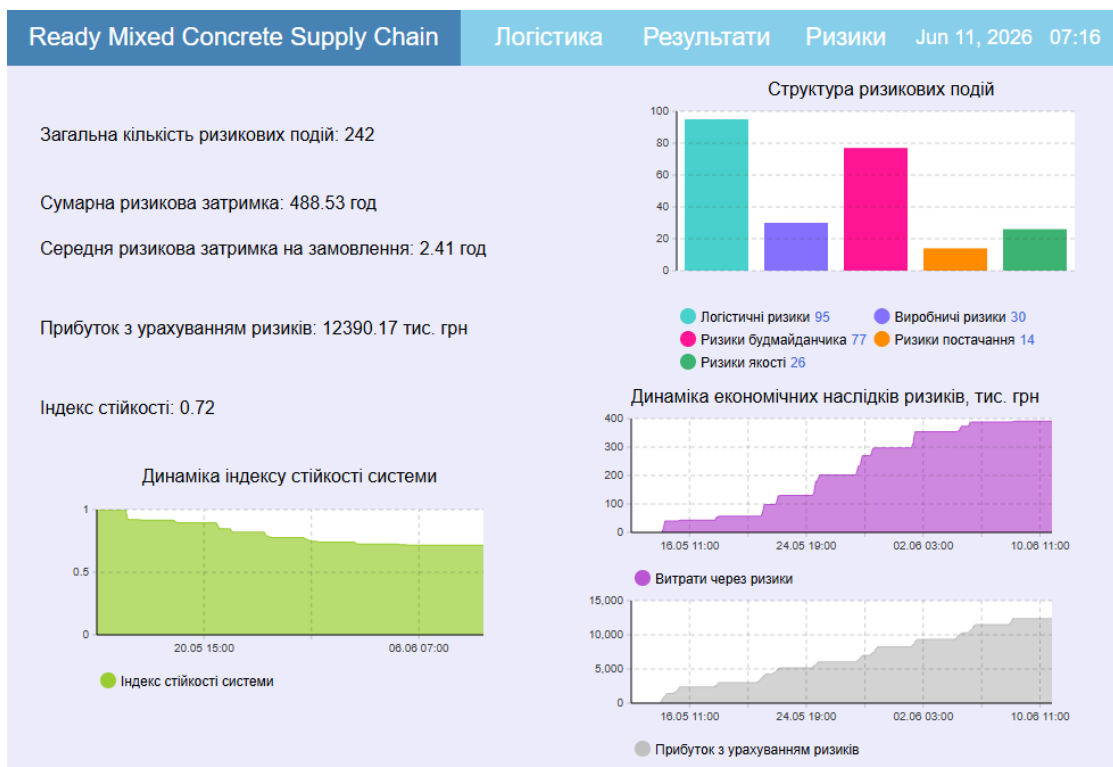


Рисунок 4.18 – Результати моделювання комбінованого сценарію ризиків для мережі бетонних заводів за місяць роботи

При комбінованому впливі ризикових факторів спостерігався нелінійний характер погіршення показників ефективності. Найбільший вплив на систему мали: виробничі ризики; логістичні затримки; ризики будівельних майданчиків.

Отримані результати підтверджують необхідність комплексного врахування ризиків у задачах планування виробництва та логістики готового бетону.

Таким чином, аналіз результатів моделювання (таблиця 4.2) показав, що найбільший вплив на стійкість виробничо-логістичної системи мають виробничі ризики бетонного заводу та комбінований вплив декількох категорій ризиків. При цьому логістичні ризики та ризики постачання матеріалів переважно впливають на часові показники доставки та економічні втрати, тоді як ризики будівельного майданчика формують значний рівень простоїв транспортної підсистеми.

Таблиця 4.2 – Результати моделювання ризикових сценаріїв

| Сценарій | Кількість ризикових подій | Сумарна затримка, год | Середня затримка, год | Індекс стійкості |
|-----------------------|---------------------------|-----------------------|-----------------------|------------------|
| Базовий | 0 | 0 | 0 | 1.00 |
| Логістичні ризики | 108 | 10.17 | 0.05 | 0.98 |
| Виробничі ризики | 71 | 636.35 | 3.20 | 0.70 |
| Ризики постачання | 24 | 28.00 | 0.14 | 0.95 |
| Ризики будмайданчика | 155 | 39.34 | 0.19 | 0.93 |
| Комбінований сценарій | 242 | 488.53 | 2.41 | 0.72 |

Запропонований підхід дозволяє проводити сценарний аналіз функціонування виробничо-логістичної системи в умовах невизначеності, оцінювати ризикостійкість системи та досліджувати наслідки різних стратегій управління. Це забезпечує підтримку прийняття рішень при плануванні виробництва, маршрутизації доставки, управлінні запасами матеріалів та координації робіт на будівельних майданчиках.

Реалізована ризик-орієнтована імітаційна модель дозволяє не лише оцінювати поточну ефективність системи, але й прогнозувати її поведінку при зміні умов функціонування, що є особливо важливим для великих інфраструктурних проєктів, мобільних бетонних заводів та роботи в умовах нестабільної логістичної інфраструктури.

4.4 Оцінка ефективності та розробка стратегій планування поставок бетону

4.4.1 Методика оцінювання ефективності

Для оцінки ефективності впровадження розроблених моделей, методів і інформаційної технології було використано систему показників КРІ, які комплексно характеризують виробничо-логістичну діяльність бетонного заводу. Серед основних показників виділено (таблиця 4.3): середній час виконання замовлення, частку своєчасних доставок, середню собівартість 1 м³ бетону, рівень втрат міцності під час транспортування, коефіцієнт завантаження виробничих потужностей та коефіцієнт використання транспорту.

Таблиця 4.3 – Показники оцінки ефективності виробничо-логістичній діяльності бетонного заводу

| Показник | Опис |
|-------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|
| Середній час виконання замовлення | Час від отримання замовлення до завершення доставки, год. |
| Частка своєчасних доставок | Відсоток доставок, виконаних у межах планового вікна часу. |
| Втрати міцності | Зниження прогнозованої міцності суміші під час транспортування, %. |
| Собівартість 1 м ³ | Сукупні витрати на виробництво, транспортування та розвантаження 1 м ³ бетону. |
| Коефіцієнт завантаження потужностей | Відношення фактичного обсягу виробництва до максимально можливого. |

4.4.2 Результати застосування інформаційної технології

Розроблена інформаційна технологія інтегрує аналітичні, оптимізаційні та імітаційні моделі для підтримки прийняття рішень у виробництві та логістиці готового бетону. Застосування технології на підприємствах

автобудівної галузі (при будівництві доріг та інших бетонних споруд) дозволило досягти значних покращень у ключових показниках ефективності.

Результати дослідження впроваджені у компаніях «Автомагістраль-Південь» (м. Одеса) та Autostrada (м. Вінниця). Ці компанії здійснюють будівництво, реконструкцію, капітальний та поточний ремонт автомобільних доріг, будівництво штучних споруд (підпірні стінки, труби, мости, шляхопроводи). Компанії також ведуть роботу над відбудовою складних інженерних споруд та беруть участь у захисті об'єктів енергетики. Завдяки власним мобільним бетонним заводам та пересувним лабораторіям вони мають можливість запускати роботи на новому об'єкті у стислі терміни.

Практична апробація розроблених методів, моделей та інформаційної технології здійснювалась у межах виконання виробничих завдань на окремих об'єктах дорожнього будівництва, де застосовуються мобільні бетонні заводи та пересувні логістичні схеми постачання. Впровадження відбувалося поетапно з урахуванням специфіки кожного об'єкта, умов роботи та наявної інфраструктури.

На першому етапі було проведено адаптацію інформаційної технології до умов конкретних виробничих майданчиків. Це включало формування цифрового представлення об'єктів – конфігурації мобільних бетонних заводів, складу обладнання, транспортного парку (автобетонозмішувачів), а також параметрів будівельних майданчиків (відстані, маршрути, часові обмеження). Для цього використовувались дані геоінформаційних систем, а також інформація з внутрішніх систем управління замовленнями підприємств.

На другому етапі було реалізовано інтеграцію даних із доступних джерел, зокрема:

- даних про виробничі процеси (режими роботи бетонних вузлів, обсяги випуску суміші);
- логістичних параметрів (маршрути руху, час у дорозі, завантаження та розвантаження);

- технологічних характеристик суміші (рецептура, температура, осідання);
- даних з пересувних лабораторій щодо якості бетону.

Це дозволило сформувати інформаційну базу для подальшого застосування імітаційних та аналітичних моделей.

На третьому етапі проводилось імітаційне моделювання різних сценаріїв організації виробництва та постачання бетону. Зокрема, досліджувалися варіанти розміщення мобільних бетонних заводів відносно будівельних об'єктів, зміни кількості автобетонозмішувачів, режимів роботи обладнання, а також вплив варіацій попиту та затримок у транспортній мережі. Це дозволило визначити раціональні параметри функціонування системи для кожного об'єкта.

На четвертому етапі застосовувались моделі машинного навчання для:

- прогнозування ймовірності затримок доставки;
- оцінки придатності бетонної суміші під час транспортування;
- прогнозування кінцевих характеристик якості бетону на основі ранніх даних виробництва.

Отримані прогнози використовувались як додатковий інструмент підтримки прийняття рішень для диспетчерів і технологів, зокрема при коригуванні графіків поставок, виборі маршрутів і налаштуванні технологічних параметрів виробництва.

На заключному етапі проводилась оцінка ефективності запропонованих рішень шляхом порівняння фактичних показників функціонування системи до та після впровадження елементів інформаційної технології (таблиця 4.4). Було зафіксовано зменшення часу простою транспорту, підвищення рівня своєчасності поставок, а також покращення стабільності якості бетонної суміші, що підтверджує практичну доцільність використання розробленого підходу в умовах реальних виробничих процесів.

Особливістю впровадження в умовах мобільних бетонних заводів є необхідність швидкої адаптації до змін конфігурації виробничо-логістичної

системи. Запропонована інформаційна технологія продемонструвала достатню гнучкість, що дозволяє оперативно переналаштовувати моделі при зміні місця розташування заводу, структури маршрутів або параметрів будівельного об'єкта, забезпечуючи тим самим ефективну підтримку процесів планування навіть у динамічному середовищі дорожнього будівництва.

Таблиця 4.4 – Результати застосування технології на підприємствах автобудівної галузі

| Показник | До впровадження | Після впровадження |
|---------------------------------------------|-----------------|--------------------|
| Середній час доставки, год | 2.8 | 2.4 (-14%) |
| Частка своєчасних доставок, % | 82 | 94 (+12%) |
| Втрати міцності при транспортуванні, % | 6.5 | 4.8 (-26%) |
| Середня собівартість 1 м ³ , грн | 1980 | 1840 (-7%) |
| Коефіцієнт використання транспорту | 0.72 | 0.83 (+15%) |

Отримані результати демонструють, що поєднання цифрового двійника, оптимізаційних моделей і машинного навчання дозволяє істотно знизити логістичні ризики, підвищити надійність постачань та забезпечити стабільну якість продукції.

4.4.3 Стратегії планування поставок

На основі результатів дослідження розроблено кілька стратегій управління процесами постачання бетону, які забезпечують адаптивність системи до змін у попиті, стані доріг та технологічних параметрах виробництва (таблиця 4.5).

Таким чином, розроблені методи та моделі продемонстрували високу ефективність для задач планування, управління та контролю у виробництві й логістиці бетону. Інформаційна технологія, побудована на базі цифрового двійника, забезпечує інтеграцію даних з виробничих, логістичних та аналітичних підсистем. Запропоновані стратегії дозволяють не лише

підвищити ефективність поточних процесів, але й створюють основу для розгортання інтелектуальних систем управління у майбутніх проєктах відновлення інфраструктури.

Таблиця 4.5 – Стратегії планування поставок бетону

| Стратегія | Сутність |
|------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Стратегія прогнозного виробництва | Планування випуску продукції на основі короткострокових прогнозів попиту, сформованих нейронними мережами |
| Стратегія адаптивної маршрутизації | Динамічне перепланування маршрутів автобетонозмішувачів з урахуванням GPS-даних, трафіку та прогнозу затримок |
| Стратегія технологічної адаптації | Автоматичне коригування рецептури або часу перемішування в разі виявлення відхилень за даними IoT-сенсорів |
| Стратегія стійкого планування | Балансування між економічною доцільністю та якістю готової продукції з урахуванням енергоспоживання |

4.4.4 Перспективи впровадження у виробничих системах в особливих умовах

В умовах воєнного часу або післявоєнного відновлення інфраструктури бетонні виробництва стикаються з низкою специфічних викликів, які безпосередньо впливають на стабільність постачань, якість продукції та ефективність планування. До таких умов належать перебої в енергопостачанні, обмежена доступність сировини, пошкодження транспортної інфраструктури, ризики для логістичних маршрутів і нестабільність попиту на бетон у зонах відновлення тощо.

1. Інтелектуальна підтримка рішень у воєнних і кризових умовах. Розроблена інформаційна технологія (рисунок 4.19) може бути адаптована для функціонування в умовах підвищеної невизначеності. Моделі машинного навчання дозволяють оперативно прогнозувати зміни попиту на бетонні суміші з урахуванням темпів відновлення об'єктів і пріоритетності завдань військового чи гуманітарного характеру. Цифровий двійник підприємства

може використовуватись для моделювання сценаріїв перебоїв у поставках енергії або транспортних обмежень, що забезпечує проактивне планування виробництва навіть за умов нестабільної логістичної ситуації.

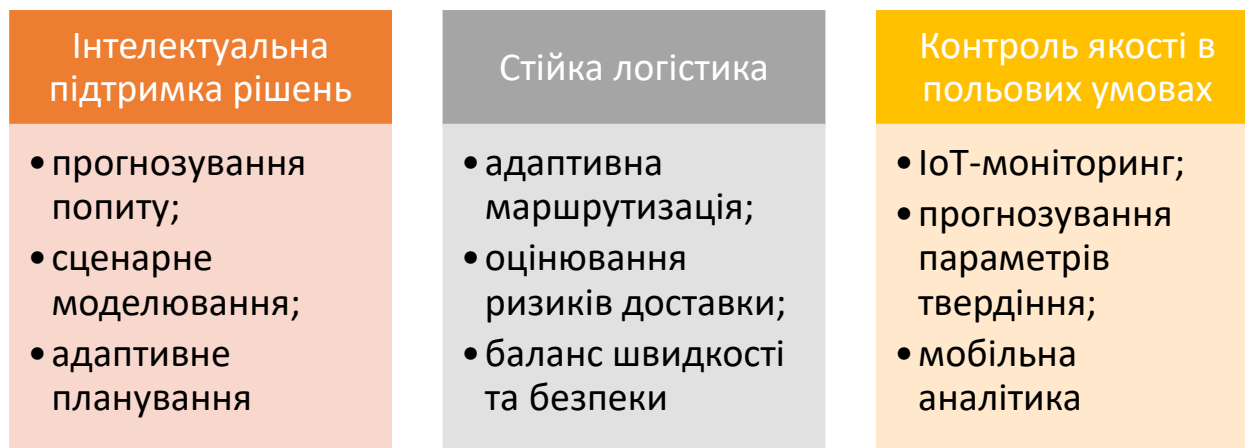


Рисунок 4.19 – Напрями застосування розробленої інформаційної технології

2. Моделі стійкості логістичних систем. Особливу увагу приділено створенню моделей стійкості логістичних систем. В умовах ризику руйнування транспортної інфраструктури чи зміни маршрутів доставки готового бетону стає складним завданням. Застосування оптимізаційних алгоритмів у поєднанні з ML-моделями прогнозування часу доставки дозволяє адаптивно змінювати маршрути залежно від оперативних даних – відстаней, стану доріг, рівня загрози чи погодних умов. Таким чином, система забезпечує баланс між безпекою, швидкістю та якістю постачання.

3. Підтримка технологічної якості в польових умовах. У польових або віддалених умовах, де обмежена кількість датчиків і контролерів, застосування цифрового двійника забезпечує віртуальний моніторинг параметрів твердіння бетону. На основі даних IoT-сенсорів система може прогнозувати зниження температури або вологості, що дає змогу своєчасно вносити корективи у процес догляду за бетоном. Використання мобільних пристроїв для збору польових даних забезпечує оперативну аналітику й контроль якості безпосередньо на місцях заливки.

4. Інтеграція в стратегії відновлення інфраструктури. Під час відновлення пошкоджених територій важливою є координація між виробничими потужностями, будівельними майданчиками та логістичними вузлами. Інформаційна технологія, створена в межах даного дослідження, може стати основою для централізованого управління потоками бетону на рівні регіону або кластера підприємств. Це дозволить створити інтегровану систему планування відновлювальних робіт, що мінімізує затримки й підвищує ефективність використання ресурсів у критичних умовах.

Таким чином, у воєнних та післявоєнних умовах розроблена технологія може бути основою для побудови адаптивної системи управління бетонним виробництвом і логістикою, здатної до роботи в середовищі з високим рівнем ризику та невизначеності. Завдяки поєднанню методів машинного навчання, імітаційного моделювання та цифрового двійника створюються умови для формування стійкої виробничо-логістичної інфраструктури, що сприяє ефективному відновленню об'єктів цивільного й оборонного призначення.

4.4 Висновки до розділу 4

1. Наведено ілюстрований приклад моделювання процесів виробництва та логістики у мережі бетонних заводів та будівельних майданчиків. За результатами моделювання накопичується статистика: структура витрат окремо (виробництво, транспортування, заливка, вартість простою) на кожному будівельному об'єкті, а також сумарно по всіх об'єктах будівництва; кількість автобетонозмішувачів на кожний завод; кількість виготовленого/залитого бетону на кожну установку/майданчик; тривалість завантаження/розвантаження/холостого ходу; середнє знаходження у черзі тощо. Час в дорозі для автобетонозмішувачів визначається завдяки використанню геоінформаційної системи з реальною транспортною інфраструктурою, що відрізняє це дослідження від більшості наявних.

2. Проведені оптимізаційні експерименти щодо визначення режимів функціонування системи. Продемонстровані два експерименти для максимізації коефіцієнта використання автобетонозмішувачів та мінімізації часу очікування автобетонозмішувачами продукту. Взагалі то розроблених сценаріїв для використання менеджерами компанії, диспетчерами та інженерами бетонних заводів та будівельних майданчиків при плануванні виконання робіт більше.

3. Імітаційна модель процесів виробництва і логістики дозволила відтворити реальні процеси з урахуванням розроблених оптимізаційних моделей, стохастичних факторів, динамічних змін попиту і обмежень ресурсів, що зробило можливим тестування різних стратегій управління виробничо-логістичною системою підприємства.

4. Аналіз результатів моделювання показав високу залежність прибутковості від взаємодії маржі та продуктивності, що було візуалізовано за допомогою інструментів аналітики, зокрема графіків прибутковості. Це дозволяє не тільки оцінювати поточну ефективність, а й бачити різні сценарії, прогнозувати наслідки змін параметрів системи.

5. Проведена кількісна оцінка ефективності впровадження розроблених методів, моделей та інформаційної технології показала суттєве покращення ключових показників функціонування виробничо-логістичної системи. Зокрема, за результатами імітаційних та аналітичних експериментів встановлено зменшення середнього часу доставки на 10–15%, підвищення частки своєчасних поставок до 90–95%, зниження втрат якості бетону під час транспортування до 20–25%, а також покращення точності прогнозування параметрів якості бетону (коефіцієнт детермінації до $R^2 \approx 0.9$). Отримані результати підтверджують доцільність інтеграції моделей машинного навчання, оптимізаційних алгоритмів та імітаційного моделювання в єдину інформаційну технологію цифрового двійника для підвищення ефективності управління.

6. Проведені експериментальні дослідження підтвердили доцільність інтеграції механізмів врахування ризиків у цифровий двійник виробничо-логістичної системи готового бетону. Розроблена модель дозволила відтворити вплив логістичних, виробничих, ресурсних та організаційних ризиків на функціонування бетонних заводів, транспортної підсистеми та будівельних майданчиків у динамічному середовищі.

7. Узагальнення результатів дослідження свідчить про можливість масштабування розробленої інформаційної технології на мережі бетонних заводів різного рівня складності та інтеграції її з існуючими інформаційними системами підприємств. Запропонований підхід є адаптивним до змін зовнішнього середовища та може бути ефективно застосований в умовах підвищеної невизначеності, зокрема у воєнний період або під час післявоєнного відновлення інфраструктури. Використання цифрових двійників, методів штучного інтелекту та імітаційного моделювання створює передумови для формування стійких виробничо-логістичних систем, здатних оперативно реагувати на ризики, обмеження ресурсів і динамічні зміни попиту.

7. Основні результати, представлені в цьому розділі, опубліковані в [138], [140], [141], [144], [149], [150].

ВИСНОВКИ

Проведено дослідження багатокритеріального завдання підтримки прийняття рішень для ефективного управління виробництвом готової бетонної суміші та плануванням її доставки до будівельних майданчиків з урахуванням факторів ризику.

1. Системне логістичне представлення процесів управління дозволило охопити всі ключові елементи функціонування підприємства з виробництва та доставки бетону, що сформувало основу для побудови комплексу оптимізаційних та імітаційної моделей. Запропоновано комплексну ієрархічну модель логістичних процесів у виробництві та розподілі готового бетону, яка враховує взаємодію між виробничими, транспортними й економічними підсистемами підприємства.

2. Удосконалено підхід до імітаційного моделювання логістики готового бетону на основі мультиагентної системи, яка враховує стохастичний попит, змінні маршрути доставки, рецептуру суміші та часові обмеження виробництва. Реалізовано інтеграцію економічних показників у динамічну модель, що дозволяє оцінювати вплив структури витрат, вартості сировини, транспортних витрат та інших параметрів на загальний прибуток підприємства в режимі реального часу.

3. Удосконалено моделі до оптимізації поведінки агентів на основі динамічних стратегій прийняття рішень, які знижують витрати простою та підвищують загальну ефективність логістичного ланцюга.

4. Вперше розроблено імітаційну модель аналізу процесів виробництва та логістики готових бетонних сумішей, що відтворює реальні технологічні та економічні процеси з урахуванням оптимізаційних моделей, стохастичних факторів, динамічних змін попиту і обмежень ресурсів, що дозволяє проводити оцінку раціональності та ефективності організації виробництва та доставки товарного бетону, визначати вузькі місця виробничих та логістичних процесів, прогнозувати показники економічної

діяльності бетонних заводів, з урахуванням зміни умов виробництва, проводити тестування різних стратегій управління виробничо-логістичною системою підприємства.

5. Дістали подальшого розвитку моделі машинного навчання для аналізу ефективності логістики готового бетону в реальному часі, що засновані на ансамблевих методах машинного навчання, які на відміну від існуючих враховують параметри системи управління замовленнями, IoT-платформи автобетонозмішувачів та система маршрутизації, що дозволяє підвищити ефективність предиктивної аналітики логістики готового бетону.

6. Розроблено інформаційну технологію підтримки прийняття рішень для планування виробництва та логістики готового бетону на основі концепції цифрового двійника, яка інтегрує імітаційні, оптимізаційні та аналітичні моделі, а також методи машинного навчання. На відміну від існуючих підходів, запропонована технологія забезпечує комплексну обробку даних із різномірних джерел (систем управління замовленнями, IoT-платформ, геоінформаційних сервісів), що дозволяє здійснювати багатокритеріальне оцінювання стану виробничо-логістичної системи та формувати адаптивні сценарії управління в режимі, наближеному до реального часу.

7. Практична значимість отриманих результатів полягає у можливості підвищення ефективності функціонування підприємств з виробництва та постачання бетонних сумішей за рахунок впровадження розроблених моделей і методів. Використання запропонованої інформаційної технології дозволяє зменшити витрати на транспортування та виробництво, скоротити час виконання замовлень, підвищити рівень завантаження виробничих потужностей і транспортних засобів, а також забезпечити стабільну якість бетонної продукції за рахунок застосування предиктивної аналітики та контролю параметрів у реальному часі.

8. Практичне значення дисертаційного дослідження підтверджене апробацією на міжнародних наукових та науково-практичних конференціях, розробкою політик та впровадженням в діяльність ТОВ «Еталон» (м. Харків)

(акт впровадження 15/1 від 15.05.2026), Autostrada (м. Вінниця) (акт впровадження 003214 від 14.05.2026), а також у освітньому процесі Харківського національного автомобільно-дорожнього університету (акт впровадження 838/42 від 07.05.2026).

9. Результати дослідження можуть бути використані при розробці та впровадженні систем управління виробництвом і логістикою в підприємствах автобудівної галузі, зокрема при будівництві автомобільних доріг, мостів, транспортних розв'язок та інших об'єктів інфраструктури, що потребують значних обсягів бетонних сумішей. Запропоновані підходи забезпечують підвищення узгодженості між виробничими та будівельними підрозділами, оптимізацію графіків поставок та мінімізацію ризиків, пов'язаних із затримками та відхиленнями технологічних параметрів.

10. Отримані наукові та практичні результати створюють основу для подальшого розвитку інтелектуальних виробничо-логістичних систем на базі цифрових двійників, зокрема з можливістю масштабування на регіональній мережі підприємств і інтеграції з галузевими інформаційними платформами. Запропоновані рішення є перспективними для застосування в умовах підвищеної невизначеності, включаючи завдання післявоєнного відновлення інфраструктури, де необхідне оперативне планування, адаптивність до змін середовища та ефективне використання обмежених ресурсів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Куліков О. М., Заяц О. В., Оксамитна Л. П. Сучасні підходи до управління портфелями проектів в галузі дорожнього будівництва // Вісник НТУ «ХП». Серія: Стратегічне управління, управління портфелями, програмами та проектами. 2023. № 1(7). С. 42–50. DOI: 10.20998/2413-3000.2023.7.6.
2. Структурні зміни та виклики в будівельній індустрії України: аналіз та прогнози. URL: https://eba.com.ua/wp-content/uploads/2024/08/02-09-24_Zvit-Strukturni-zminy-ta-vyklyky-v-budivelnij-industriyi-Ukrayiny.pdf.
3. Показники та аналіз будівельного сектору першого півріччя 2025 року. URL: <https://novatorstroy.com/ua/pres-relizi/pokazniki-ta-analiz-budivelnogo-sektoru-pershogo-pivrichchya-2025-roku>.
4. Fifth Rapid Damage and Needs Assessment (RDNA5). World Bank, February 2022 – December 2025 . URL: <https://documents.worldbank.org/en/publication/documents-reports/documentdetail/099022026094036395>.
5. Оцінка збитків RDNA5: на 2026 рік Україна потребує \$15,25 млрд на відновлення, із яких 34 % вже забезпечено держбюджетом та партнерами. URL: <https://www.kmu.gov.ua/news/otsinka-zbytkiv-rdna5-na-2026-rik-ukraina-potrebuie-141-mlrd-na-vidnovlennia-iz-iakykh-34-vzhe-zabezpecheno-derzhbiudzhedom-ta-partneramy>.
6. Updated damage assessment finds \$524 billion needed for recovery in Ukraine over the next decade // UNDP. 2025 . URL: <https://www.undp.org/ukraine/press-releases/updated-damage-assessment-finds-524-billion-needed-recovery-ukraine-over-next-decade>.
7. Ринок цементу та бетону України: 2023 та прогноз потреб. URL: <https://readymix.pro/rinok-cementu-ta-betonu-ukrayini-2023-ta-prognoz-potreb>.
8. Адаптація до нових умов. Як виробникам цементу та бетону в Україні вдалося наростити виробництво попри низьку активність

забудовників. URL: <https://delo.ua/realty/adaptaciya-do-novix-umov-yak-virobnykam-cementu-ta-betonu-v-ukrayini-vdalosya-narostiti-virobnictvo-popri-nizku-aktivnist-zabudovnikiv-420831/>.

9. Romanenko O., Alaverdian L., Dymenko R. Sustainable development strategies for the construction industry of Ukraine: problems and prospects // *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2025. No. 5. P. 153–161. DOI: 10.33271/nvngu/2025-5/153.

10. Fitriani H., Rizki L. D. Just-in-time application on readymix concrete production // *International Journal of Advanced Technology and Engineering Exploration*. 2022. Vol. 9. P. 1183–1195. DOI: 10.19101/IJATEE.2021.876116.

11. Khan M. A., Deep S., Asim M., Khan Z. R. Quantization of Risks Involved in Supply of Ready Mix Concrete in Construction Industry in Indian Scenario // *International Journal of Civil Engineering and Technology*. 2017. Vol. 8, iss. 3. P. 175–184. URL: <http://www.iaeme.com/IJCIET/issues.asp?JType=IJCIET&VType=8&IType=3>.

12. Chen S., Ye Z., Lu W., Feng K. Exploring Performance of Using SCM Concrete: Investigating Impacts Shifting along Concrete Supply Chain and Construction // *Buildings*. 2024. Vol. 14. Article no. 2186. DOI: 10.3390/buildings14072186.

13. Pronchakov Y., Prokhorov O., Fedorovich O. Concept of High-Tech Enterprise Development Management in the Context of Digital Transformation // *Computation*. 2022. Vol. 10, iss. 7. Article no. 118. DOI: 10.3390/computation10070118.

14. Ding C., Liu H., Chen Y., Qiu W. Collaborative Innovation in Construction Supply Chain under Digital Construction: Evolutionary Game Analysis Based on Prospect Theory // *Buildings*. 2024. Vol. 14. Article no. 2019. DOI: 10.3390/buildings14072019.

15. Покровська Н., Журке А. Перспективи розвитку бетонного виробництва в контексті відбудови України // *Економіка та суспільство*. 2025. № 73. DOI: 10.32782/2524-0072/2025-73-2.

16. Кришталь Г., Ордуханов Т. Кругообіг інвестицій в будівельну галузь та їх вплив на ефективність інвестиційної політики // Економіка та суспільство. 2025. № 71. DOI: 10.32782/2524-0072/2025-71-13.

17. Проекти нацпрограми «Відновлення та модернізація житла та інфраструктури регіонів». URL: <https://recovery.gov.ua/project/program/recovery-and-upgrade-of-housing-and-regions-infrastructure>.

18. Струтинська І. В. Організація та управління цифровою трансформацією бізнес-структур: теорія, методологія, практика : монографія. Тернопіль : ФОП Паляниця В. А., 2020. 475 с.

19. Бондаренко Д., Калашнікова К. Цифровізація будівельної галузі України: аналіз стану, проблем та перспектив розвитку // Економіка та суспільство. 2024. № 65. DOI: 10.32782/2524-0072/2024-65-2.

20. Delbrügger T., Lenz L. T., Losch D., Roßmann J. A navigation framework for digital twins of factories based on building information modeling // Proceedings of the 22nd IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), 12–15 September 2017, Limassol, Cyprus. 2017. P. 1–4.

21. Євсєєв В. В., Максимова С. С. Технологія процесу керування розробкою кібер-фізичних виробничих систем // Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки. 2020. Т. 31(70), № 6. С. 57–63.

22. Catti P., Nikolakis N., Ntoulmperis M., Lakkas-Pyknis V., Alexopoulos K. Real-Time Concrete Workability Estimation in Transit via an IoT-Enabled Cyber-Physical System // Electronics. 2025. Vol. 14. Article no. 3289. DOI: 10.3390/electronics14163289.

23. Marchewka A., Ziolkowski P., García Galán S. Real-time prediction of early concrete compressive strength using AI and hydration monitoring // Scientific Reports. 2025. Vol. 15. Article no. 15463. DOI: 10.1038/s41598-025-97060-w.

24. Nour El-Din M., Pereira P. F., Poças Martins J., Ramos N. M. M. Digital Twins for Construction Assets Using BIM Standard Specifications // Buildings. 2022. Vol. 12. Article no. 2155. DOI: 10.3390/buildings12122155.
25. Grieves M. Virtually Perfect: Driving Innovative and Lean Products through Product Lifecycle Management. 2011.
26. Grieves M. Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication. 2014. URL: https://research.fit.edu/media/site-specific/researchfitedu/camid/documents/1411.0_Digital_Twin_White_Paper_Dr_Grieves.pdf.
27. Shafiq S. I., Sanin C., Szczerbicki E., Toro C. Virtual engineering object/virtual engineering process: A specialized form of cyber physical system for Industrie 4.0 // Procedia Computer Science. 2015. Vol. 60. P. 1146–1155.
28. Virtually Intelligent Product Systems: Digital and Physical Twins . URL: https://www.researchgate.net/publication/334599683_Virtually_Intelligent_Product_Systems_Digital_and_Physical_Twins.
29. Shahzad M., Shafiq M. T., Douglas D., Kassem M. Digital Twins in Built Environments: An Investigation of the Characteristics, Applications, and Challenges // Buildings. 2022. Vol. 12. Article no. 120. DOI: 10.3390/buildings12020120.
30. Dinter R., Tekinerdogan B., Catal C. Predictive maintenance using digital twins: A systematic literature review // Information and Software Technology. 2022. Vol. 151. Article no. 107008. DOI: 10.1016/j.infsof.2022.107008.
31. Rasheed A., San O., Kvamsdal T. Digital Twin: Values, Challenges and Enablers From a Modeling Perspective // IEEE Access. 2020. Vol. 8. P. 21980–22012. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2970143.
32. Shahzad M., Shafiq M. T., Douglas D., Kassem M. Digital Twins in Built Environments: An Investigation of the Characteristics, Applications, and

Challenges // Buildings. 2022. Vol. 12. Article no. 120. DOI: 10.3390/buildings12020120.

33. Dinter R., Tekinerdogan B., Catal C. Predictive maintenance using digital twins: A systematic literature review // Information and Software Technology. 2022. Vol. 151. Article no. 107008. DOI: 10.1016/j.infsof.2022.107008.

34. Rasheed A., San O., Kvamsdal T. Digital Twin: Values, Challenges and Enablers From a Modeling Perspective // IEEE Access. 2020. Vol. 8. P. 21980–22012. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2970143.

35. Moshood T. D., Nawanir G., Sorooshian S., Okfalisa O. Digital Twins Driven Supply Chain Visibility within Logistics: A New Paradigm for Future Logistics // Applied System Innovation. 2021. Vol. 4. Article no. 29. DOI: 10.3390/asi4020029.

36. Nour El-Din M., Pereira P. F., Poças Martins J., Ramos N. M. M. Digital Twins for Construction Assets Using BIM Standard Specifications // Buildings. 2022. Vol. 12, iss. 12. Article no. 2155. DOI: 10.3390/buildings12122155.

37. Chacón R., Posada H., Ramonell C., Jungmann M., Hartmann T., Khan R., Tomar R. Digital twinning of building construction processes. Case study: A reinforced concrete cast-in structure // Journal of Building Engineering. 2024. Vol. 84. Article no. 108522. DOI: 10.1016/j.jobe.2024.108522.

38. Kaliraman B., Verma R., Paruthi S. Internet of things in sustainable concrete production // Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering. Woodhead Publishing, 2025. P. 621–633. DOI: 10.1016/B978-0-443-23895-6.00024-8.

39. Ghosh A., Hosseini M. R., Al-Ameri R., Kaklauskas G., Nikmehr B. Internet of Things (IoT) for digital concrete quality control (DCQC): A conceptual framework // Proceedings of the 13th International Conference «Modern Building Materials, Structures and Techniques», 16–17 May 2019, Vilnius, Lithuania. 2019. P. 298–305. DOI: 10.3846/mbmst.2019.100.

40. Xin P., Isleem H. F., Khishe M. A digital twin approach for sustainable construction: predictive optimization of concrete strength using industry 4.0 principles // *Scientific Reports*. 2026. Vol. 16. Article no. 2443. DOI: 10.1038/s41598-025-32276-4.

41. Bányai T., Illés B., Gubán M., Gubán Á., Schenk F., Bányai Á. Optimization of Just-In-Sequence Supply: A Flower Pollination Algorithm-Based Approach // *Sustainability*. 2019. Vol. 11, iss. 14. Article no. 3850. DOI: 10.3390/su11143850.

42. Gaikwad K., Thakare S. B. Optimization Of Ready Mix Concrete (RMC) Dispatching Schedule: A Literature Review // *International Journal of Engineering Development and Research*. 2019. Vol. 7, iss. 1. P. 327–332. URL: <https://rjwave.org/IJEDR/papers/IJEDR1901060.pdf>.

43. Sivilevičius H., Žuraulis V. Investigation of the Importance of Asphalt Mixing Plant Properties for Selecting the Best Sustainable Alternative // *Sustainability*. 2026. Vol. 18. Article no. 1582. DOI: 10.3390/su18031582.

44. The Ready Mix Concrete Market Report . URL: <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/ready-mix-concrete-market>.

45. Lima Y. Y., Sulbarán L. F., Mack-Vergara Y. L. Qualitative Characterization of Concrete Production in Panama from an Environmental Perspective: Water, Energy, and CO2 Emissions // *Sustainability*. 2025. Vol. 17. Article no. 1918. DOI: 10.3390/su17051918.

46. Optimization of dispatching schedule of ready mixed concrete (RMC) plant for multi-plant and multi-site operation condition: a literature review // *International Journal of Emerging Technologies and Innovative Research*. 2021. Vol. 8, iss. 5. P. f783–f789. URL: <http://www.jetir.org/papers/JETIR2105770.pdf>.

47. Arularasi V., Pachiappan T., Avudaiappan S., Raman S. N., Guindos P., Amran M., Fediuk R., Vatin N. I. The Energy Consumption of Ready-Mixed Concrete Mixing // *Encyclopedia* . URL: <https://encyclopedia.pub/entry/41869>.

48. Špak M., Mandičák T., Spišáková M., Verčimák D. Risk Management on Concrete Structures as a Tool for the Control of Construction Efficiency // Sustainability. 2023. Vol. 15, iss. 12. Article no. 9577. DOI: 10.3390/su15129577.
49. Sobieraj J., Metelski D. Project Risk in the Context of Construction Schedules—Combined Monte Carlo Simulation and Time at Risk (TaR) Approach: Insights from the Fort Bema Housing Estate Complex // Applied Sciences. 2022. Vol. 12, iss. 3. Article no. 1044. DOI: 10.3390/app12031044.
50. Akhavan M., Alivirdi M., Jamalpour A., Kheradranjbar M., Mafi A., Jamalpour R., Ravanshadnia M. Impact of Industry 5.0 on the Construction Industry (Construction 5.0): Systematic Literature Review and Bibliometric Analysis // Buildings. 2025. Vol. 15. Article no. 1491. DOI: 10.3390/buildings15091491.
51. Opoku D.-G. J., Perera S., Osei-Kyei R., Rashidi M., Famakinwa T., Bamdad K. Drivers for Digital Twin Adoption in the Construction Industry: A Systematic Literature Review // Buildings. 2022. Vol. 12, iss. 2. Article no. 113. DOI: 10.3390/buildings12020113.
52. Becue A., Maia E., Feeken L., Borchers P., Praça I. A New Concept of Digital Twin Supporting Optimization and Resilience of Factories of the Future // Applied Sciences. 2020. Vol. 10. Article no. 4482. DOI: 10.3390/app10134482.
53. Sharma A., Kosasih E., Zhang J., Brintrup A., Calinescu A. Digital Twins: State of the art theory and practice, challenges, and open research questions // Journal of Industrial Information Integration. 2022. Vol. 30. Article no. 100383. DOI: 10.1016/j.jii.2022.100383.
54. Jaisree K. B., Palani B. Supply Chain Management in Construction Projects: A Comprehensive Analysis of the Indian Context – Review // International Journal of Research and Review. 2024. Vol. 11, no. 1. P. 298–308. DOI: 10.52403/ijrr.20240132.
55. Olugboyega O., Ejohwomu O., Omopariola E. D., Omoregie A. Sustainable Ready-Mixed Concrete (RMC) Production: A Case Study of Five RMC Plants in Nigeria // Sustainability. 2023. Vol. 15. Article no. 8169. DOI: 10.3390/su15108169.

56. Kim T., Kim Y.-W. Proactive Production Scheduling Approach for Off-Site Construction with Due Date Uncertainty // *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14, no. 23. Article no. 11017. DOI: 10.3390/app142311017.

57. Семенчук К. Л. Моделювання стратегій ланцюгів постачань у проєктній діяльності // *Вісник НТУ «ХПІ»*. Серія: Стратегічне управління, управління портфелями, програмами та проєктами. 2024. № 1(8). С. 58–65. DOI: 10.20998/2413-3000.2024.8.8.

58. Biruk S. Dispatching concrete trucks using simulation method // *Budownictwo i Architektura*. 2015. Vol. 14. P. 5–10. DOI: 10.35784/bud-arch.1638.

59. Afsoosbiria H., Machowska A. Development of Sustainable Concrete Using By-Products as a Green Material, and Potential Solutions for Sustainability in Mass Concrete Construction—Comprehensive Review // *Sustainability*. 2025. Vol. 17. Article no. 9983. DOI: 10.3390/su17229983.

60. Liu X., Shen L., Zhang K. Estimating the Probability Distribution of Construction Project Completion Times Based on Drum-Buffer-Rope Theory // *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12. Article no. 7150. DOI: 10.3390/app11157150.

61. Anastasiu L., Câmpian C., Roman N. Boosting Construction Project Timeline: The Case of Critical Chain Project Management (CCPM) // *Buildings*. 2023. Vol. 13, no. 5. Article no. 1249. DOI: 10.3390/buildings13051249.

62. Forcael E., Contreras C., Francesconi C., Baesler F. Applying Game Theory to Teach the PERT Scheduling Method // *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14, no. 24. Article no. 12045. DOI: 10.3390/app142412045.

63. Szafranko E., Harasymiuk J. Modelling of Decision Processes in Construction Activity // *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12. Article no. 3797. DOI: 10.3390/app12083797.

64. Vicente J. J. Optimizing Supply Chain Inventory: A Mixed Integer Linear Programming Approach // *Systems*. 2025. Vol. 13, no. 1. Article no. 33. DOI: 10.3390/systems13010033.

65. Wu M., Low S. P. Modeling just-in-time purchasing in the ready mixed concrete industry // *International Journal of Production Economics*. 2007. Vol. 107, iss. 1. P. 190–201. DOI: 10.1016/j.ijpe.2006.08.010.
66. Szóstak M., Konior J., Sawicki M. Technology and Management Applied in Construction Engineering Projects // *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12, iss. 22. Article no. 11823. DOI: 10.3390/app122211823.
67. Ariöz Ö., Arslan G., Tuncan M., Kıvrak S. Web-based quality control of ready mixed concrete // *Building and Environment*. 2007. Vol. 42, iss. 3. P. 1465–1470. DOI: 10.1016/j.buildenv.2005.12.020.
68. Al-Bazi A., Dawood N. Development of an intelligent manufacturing management simulation model: An application to the precast concrete industry. 2008.
69. Lu M., Lam H.-C. Simulation-optimization integrated approach to planning ready mixed concrete production and delivery: Validation and applications // *Proceedings of the 2009 Winter Simulation Conference (WSC), Austin, TX, USA, 2009*. 2009. P. 2593–2604. DOI: 10.1109/WSC.2009.5429729.
70. Hussein M., Eltoukhy A. E. E., Darko A., Eltawil A. Simulation-Optimization for the Planning of Off-Site Construction Projects: A Comparative Study of Recent Swarm Intelligence Metaheuristics // *Sustainability*. 2021. Vol. 13. Article no. 13551. DOI: 10.3390/su132413551.
71. Sofrankova A., Ondov M., Sofranko M. Simulation-Driven Mining Logistics Towards Sustainable and Reliable Production // *Applied Sciences*. 2025. Vol. 15. Article no. 11722. DOI: 10.3390/app152111722.
72. Park M., Kim W.-Y., Lee H.-S., Han S. Supply chain management model for ready mixed concrete // *Automation in Construction*. 2011. Vol. 20. P. 44–55. DOI: 10.1016/j.autcon.2010.07.005.
73. Matjević-Nikolić B., Živković L., Stojković N., Velimirović N. Application of the simulation model for ready mixed concrete supply. 2025. P. 431–440. DOI: 10.62683/SINARG2025.055.

74. Chen W., Men Y., Fuster N., Osorio C., Juan A. A. Artificial Intelligence in Logistics Optimization with Sustainable Criteria: A Review // Sustainability. 2024. Vol. 16. Article no. 9145. DOI: 10.3390/su16219145.
75. Daios A., Kladovasilakis N., Kelemis A., Kostavelis I. AI Applications in Supply Chain Management: A Survey // Applied Sciences. 2025. Vol. 15. Article no. 2775. DOI: 10.3390/app15052775.
76. Yazdanbakhsh A. Forecasting trend changes of cement demand in the United States: An exploratory study // Results in Engineering. 2025. Vol. 25. Article no. 103859. DOI: 10.1016/j.rineng.2024.103859.
77. Chen Z., Song C., Zhang X., Cheng J. Scheduling Optimization of Electric Ready Mixed Concrete Vehicles Using an Improved Model-Based Reinforcement Learning. 2023. DOI: 10.36253/979-12-215-0289-3.74.
78. Maqsoom A., Aslam B., Gul M. E., Ullah F., Kouzani A. Z., Mahmud M. A. P., Nawaz A. Using Multivariate Regression and ANN Models to Predict Properties of Concrete Cured under Hot Weather // Sustainability. 2021. Vol. 13, iss. 18. Article no. 10164. DOI: 10.3390/su131810164.
79. Narayanan N., Sundar M., Mohanadhas B., Mangottiri V. Concrete Classification Using Machine Learning Techniques // Proceedings of the corresponding publication. 2022. DOI: 10.1007/978-3-030-98335-2_12.
80. Tipu R. K., Bansal S., Batra V. et al. Ensemble machine learning models for predicting concrete compressive strength incorporating various sand types // Multiscale and Multidisciplinary Modeling, Experiments and Design. 2025. Vol. 8. Article no. 222. DOI: 10.1007/s41939-025-00812-4.
81. Tzanetos A., Blondin M. Systematic search and mapping review of the concrete delivery problem (CDP): Formulations, objectives, and data // Automation in Construction. 2023. Vol. 145. Article no. 104631. DOI: 10.1016/j.autcon.2022.104631.
82. Ahmed Z. H., Yousefikhoshbakht M. A Hybrid Algorithm for the Heterogeneous Fixed Fleet Open Vehicle Routing Problem with Time Windows // Symmetry. 2023. Vol. 15, iss. 2. Article no. 486. DOI: 10.3390/sym15020486.

83. Kralev V., Krалева R. Combining Genetic Algorithm with Local Search Method in Solving Optimization Problems // *Electronics*. 2024. Vol. 13. Article no. 4126. DOI: 10.3390/electronics13204126.
84. Schmid V., Doerner K. F., Hartl R. F., Salazar-González J.-J. Hybridization of very large neighborhood search for ready-mixed concrete delivery problems // *Computers & Operations Research*. 2010. Vol. 37. P. 559–574. DOI: 10.1016/j.cor.2008.07.010.
85. Dönmez O. A., Öner E. Optimizing ready-mixed concrete transportation by a truck mixer routing model for concrete plants // *Journal of Engineering Sciences and Design*. 2024. Vol. 12, iss. 4. P. 802–820. DOI: 10.21923/jesd.1445781.
86. Syahputra R. H., Komarudin K., Destyanto A. R. Optimization Model of Ready-Mix Concrete Delivery Route and Schedule: A Case in Indonesia RMC Industry // *Proceedings of the 3rd International Conference on Computational Intelligence and Applications (ICCIA)*, Hong Kong, China, 2018. 2018. P. 21–25. DOI: 10.1109/ICCIA.2018.00012.
87. Sarkar D., Gohel J., Dabasia K. Optimization of ready mixed concrete delivery for commercial batching plants of Ahmedabad, India // *International Journal of Construction Management*. 2021. Vol. 21, no. 10. P. 1024–1043. DOI: 10.1080/15623599.2019.1602582.
88. Maghrebi M., Waller S., Rey D., Narayanan P. K. Using Lagrangian Relaxation to Solve Ready Mixed Concrete Dispatching Problem // *Transportation Research Record*. 2015. Vol. 2498. DOI: 10.3141/2498-10.
89. Hsie M., Huang C. Y., Hsiao W. T., Wu M. Y., Liu Y. C. Optimization on Ready-Mixed Concrete Dispatching Problem via Sliding Time Window Searching // *KSCE Journal of Civil Engineering*. 2022. Vol. 26. P. 3173–3187. DOI: 10.1007/s12205-022-1273-0.
90. Douaioui K., Benmoussa O., Ahlaqqach M. Optimizing Supply Chain Efficiency Using Innovative Goal Programming and Advanced Metaheuristic

Techniques // Applied Sciences. 2024. Vol. 14, no. 16. Article no. 7151. DOI: 10.3390/app14167151.

91. Choi J., Xuelei J., Jeong W. Optimizing the Construction Job Site Vehicle Scheduling Problem // Sustainability. 2018. Vol. 10, iss. 5. Article no. 1381. DOI: 10.3390/su10051381.

92. Rong H., Wenbo C., Bin Q., Ning G., Fenghong X. Learning Ant Colony Algorithm for Green Multi-depot Vehicle Routing Problem // Journal of System Simulation. 2021. Vol. 33, iss. 9. Article no. 2095. DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.20-0349.

93. Zhang Z., Qu T., Zhao K., Zhang K., Zhang Y., Liu L., Wang J., Huang G. Q. Optimization Model and Strategy for Dynamic Material Distribution Scheduling Based on Digital Twin: A Step towards Sustainable Manufacturing // Sustainability. 2023. Vol. 15, iss. 23. Article no. 16539. DOI: 10.3390/su152316539.

94. Yang J., Zhu H., Ma J., Yue B., Guan Y., Shi J., Shangguan L. Improved Genetic Algorithm for Solving Green Path Models of Concrete Trucks // Applied Sciences. 2023. Vol. 13, iss. 16. Article no. 9256. DOI: 10.3390/app13169256.

95. Oviedo A. I., Londoño J. M., Vargas J. F., Zuluaga C., Gómez A. Modeling and Optimization of Concrete Mixtures Using Machine Learning Estimators and Genetic Algorithms // Modelling. 2024. Vol. 5. P. 642–658. DOI: 10.3390/modelling5030034.

96. Chen Z., Wang H., Wang B., Yang L., Song C., Zhang X., Lin F., Cheng J. C. Scheduling optimization of electric ready mixed concrete vehicles using an improved model-based reinforcement learning // Automation in Construction. 2024. Vol. 160. Article no. 105308. DOI: 10.1016/j.autcon.2024.105308.

97. Galić M., Kraus I. Simulation Model for Scenario Optimization of the Ready-Mix Concrete Delivery Problem // Selected Scientific Papers – Journal of Civil Engineering. 2016. Vol. 11. P. 7–18. DOI: 10.1515/sspjce-2016-0014.

98. Hanif S., Din S. U., Gui N., Holvoet T. Multiagent Coordination and Teamwork: A Case Study for Large-Scale Dynamic Ready-Mixed Concrete Delivery Problem // *Mathematics*. 2023. Vol. 11, iss. 19. Article no. 4124. DOI: 10.3390/math11194124.
99. Weiszer M., Fedorko G., Molnár V., Tučková Z., Poliak M. Dispatching policy evaluation for transport of ready mixed concrete // *Open Engineering*. 2020. Vol. 10, no. 1. P. 120–128. DOI: 10.1515/eng-2020-0030.
100. Jamal J., Hasan M., Azad A., Ahmad M., Ahmmed M. Optimization of Ready-Mix Concrete Operations: A Comprehensive Approach Through Practical and Simulation-Oriented Data // *Proceedings of the 7th IEOM Bangladesh International Conference on Industrial Engineering and Operations Management, Dhaka, Bangladesh, 2024*. 2024. P. 230–240. DOI: 10.46254/BA07.20240036.
101. Matejević-Nikolić B., Živković L. Development of the Simulation Model for Ready Mixed Concrete Supply Chain Cost Structure // *Tehnički vjesnik*. 2023. Vol. 30, iss. 1. P. 102–113. DOI: 10.17559/TV-20220310120002.
102. Weerapura V., Sugathadasa R., De Silva M. M., Nielsen I. Feasibility of Digital Twins to Manage the Operational Risks in the Production of a Ready-Mix Concrete Plant // *Buildings*. 2023. Vol. 13. Article no. 447. DOI: 10.3390/buildings13020447.
103. Nellickal A. G., Rajendra A. V., Palaniappan S. A simulation-based model for evaluating the performance of ready-mixed concrete (RMC) production processes // *Living and Learning: Research for a Better Built Environment: Proceedings of the 49th International Conference of the Architectural Science Association*. 2015. P. 658–667. URL: https://anzasca.net/wp-content/uploads/2015/12/063_Nellickal_Rajendra_Palaniappan_ASA2015.pdf
104. Xu J., Zhou L., He G., Ji X., Dai Y., Dang Y. Comprehensive Machine Learning-Based Model for Predicting Compressive Strength of Ready-Mix Concrete // *Materials*. 2021. Vol. 14. Article no. 1068. DOI: 10.3390/ma14051068.

105. Matejević-Nikolić B., Živković L. Comparative Representation of Two Models for Predicting the Productivity of Column and Wall Concreting Process // Buildings. 2022. Vol. 12. Article no. 1809. DOI: 10.3390/buildings12111809.

106. Sanchez J., Aristizabal M. Simulation a ready-mix concrete plants network using multimethod approach // Proceedings of the 2017 Winter Simulation Conference. 2017. P. 2405–2412. URL: https://www.researchgate.net/publication/322212507_SIMULATION_A_READY_MIX_CONCRETE_PLANTS_NETWORK_USING_MULTIMETHOD_APPROACH.

107. Mustakim M., Rohafiz S., Khairiel A. N., Adebare O., Alonge O. An Innovative of Simul Model for Ready-Mix Concretes in the Concept of Third-Party Logistics and Supply Chain Management in Malaysia and Thailand // International Journal of Supply Chain Management. 2020. Vol. 9, iss. 5. P. 908–914. URL: <https://ojs.excelingtech.co.uk/index.php/IJSCM/article/viewFile/5187/2815>.

108. Jiang J.-R. An improved cyber-physical systems architecture for Industry 4.0 smart factories // Advances in Mechanical Engineering. 2018. Vol. 10, iss. 6. P. 1–15. DOI: 10.1177/1687814018784192.

109. Douaioui K., Oucheikh R., Benmoussa O., Mabrouki C. Machine Learning and Deep Learning Models for Demand Forecasting in Supply Chain Management: A Critical Review // Applied System Innovation. 2024. Vol. 7, iss. 5. Article no. 93. DOI: 10.3390/asi7050093.

110. Zheng W., Shui Z., Xu Z., Gao X., Zhang S. Multi-objective optimization of concrete mix design based on machine learning // Journal of Building Engineering. 2023. Vol. 76. Article no. 107396. DOI: 10.1016/j.jobbe.2023.107396.

111. Katyare P., Joshi S., Kulkarni M. Machine Learning based Material Demand Prediction of Construction Equipment for Maintenance // International Journal of Computing and Digital Systems. 2024. Vol. 17. P. 1–12. DOI: 10.12785/ijcds/1571018142.

112. Tuvayanond W., Kamchoom V., Prasittisopin L. Efficient machine learning for strength prediction of ready-mix concrete production (prolonged mixing) // *Construction Innovation*. 2024. DOI: 10.1108/CI-09-2023-0240.

113. Chen F., Xu W., Wen Q., Zhang G., Xu L., Fan D., Yu R. Advancing Concrete Mix Proportion through Hybrid Intelligence: A Multi-Objective Optimization Approach // *Materials*. 2023. Vol. 16. Article no. 6448. DOI: 10.3390/ma16196448.

114. Charhate S., Subhedar M., Adsul N. Prediction of Concrete Properties Using Multiple Linear Regression and Artificial Neural Network // *Journal of Soft Computing in Civil Engineering*. 2018. Vol. 2. P. 27–38. DOI: 10.22115/scce.2018.112140.1041.

115. Straka M., Ondov M. Exploring Artificial Intelligence as a Tool for Logistics Process Simulation // *Applied Sciences*. 2026. Vol. 16. Article no. 3301. DOI: 10.3390/app16073301.

116. Nowak M., Pawłowska-Nowak M. Dynamic Pricing Method in the E-Commerce Industry Using Machine Learning // *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14, no. 24. Article no. 11668. DOI: 10.3390/app142411668.

117. Ullah A., Mohmand M. I., Hussain H., Johar S., Khan I., Ahmad S., Mahmoud H. A., Huda S. Customer Analysis Using Machine Learning-Based Classification Algorithms for Effective Segmentation Using Recency, Frequency, Monetary, and Time // *Sensors*. 2023. Vol. 23, no. 6. Article no. 3180. DOI: 10.3390/s23063180.

118. Shan D., Qu F., Wang Z., Ji Y., Xu J. A Review of the Application of Computer Vision Techniques in Sustainable Engineering of Open Pit Mines // *Sustainability*. 2025. Vol. 17, no. 7. Article no. 3051. DOI: 10.3390/su17073051.

119. Mustapha I. B., Abdulkareem M., Jassam T. M. et al. Comparative Analysis of Gradient-Boosting Ensembles for Estimation of Compressive Strength of Quaternary Blend Concrete // *International Journal of Concrete Structures and Materials*. 2024. Vol. 18. Article no. 20. DOI: 10.1186/s40069-023-00653-w.

120. Nikoopayan Tak M. S., Feng Y., Mahgoub M. Advanced Machine Learning Techniques for Predicting Concrete Compressive Strength // Infrastructures. 2025. Vol. 10, no. 2. Article no. 26. DOI: 10.3390/infrastructures10020026.

121. Vargas J. F., Oviedo A. I., Ortega N. A., Orozco E., Gómez A., Londoño J. M. Machine-Learning-Based Predictive Models for Compressive Strength, Flexural Strength, and Slump of Concrete // Applied Sciences. 2024. Vol. 14, no. 11. Article no. 4426. DOI: 10.3390/app14114426.

122. Farooq F., Ahmed W., Akbar A., Aslam F., Alyousef R. Predictive modeling for sustainable high-performance concrete from industrial wastes: A comparison and optimization of models using ensemble learners // Journal of Cleaner Production. 2021. Vol. 292. Article no. 126032. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.126032.

123. A shared vision of the future . URL: <https://explore.commandalkon.com/home/col/pr-awards/a-shared-vision-of-the-future-featured-in-international-cement-review-magazine?pflpid=57730&pfsid=rNMhBdMzMx>.

124. BatchMaster Software . URL: https://en.wikipedia.org/wiki/BatchMaster_Software.

125. Jonel provides the customized adaptive, simple, and highly reliable technology solutions for concrete management, manufacture, and delivery . URL: <https://www.jonel.com/>

126. Solid concrete contracting tools . URL: <https://www.trimble.com/en/solutions/trimble-construction-one/concrete>.

127. Now every player sees the play-by-play . URL: <https://www.bcmicorp.com/material-now/>.

128. The Global Leader in Last Mile Delivery Software . URL: <https://www.dispatchtrack.com/>.

129. Data-driven decisions . URL: <https://ortec.com/en-us>.

130. Huang Y., Yang T., Liu B., Xue Y., Li Q. Simulation Experiment Research on the Production of Large Box Girders // Buildings. 2024. Vol. 14. Article no. 3338. DOI: 10.3390/buildings14113338.

131. Mavrin V., Makarova I. Developing a Decision Support System to Improve the Waste Transportation Process // Logistics. 2026. Vol. 10. Article no. 78. DOI: 10.3390/logistics10040078.

132. Forcael E., Martínez-Chabur P., Ramírez-Cifuentes I., García-Alvarado R., Ramis F., Opazo-Vega A. Performance Analysis of 3D Concrete Printing Processes through Discrete-Event Simulation // Buildings. 2023. Vol. 13. Article no. 1390. DOI: 10.3390/buildings13061390.

133. Петренко Ю. А., Бугаєвський М. С. Управління проектами розвитку бетонних заводів при відновленні житлової і промислової інфраструктури в післявоєнний період // Управління проектами у розвитку суспільства. Управління проектами післявоєнної розбудови України : тези доп. XXI Міжнар. наук.-практ. конф., 24 трав. 2024 р. Київ : КНУБА, 2024. С. 194–198.

134. Бугаєвський М. С. Аналіз інформаційних технологій планування та управління у виробництві та логістиці бетону // Science: development and factors its influence : proceedings of the 7th International Scientific and Practical Conference, April 6–8, 2026, Amsterdam, Netherlands. Scientific Collection «InterConf», 2026. № 289. С. 176–179. URL: <https://archive.interconf.center/index.php/conference-proceeding/issue/view/6-8.04.2026/300>.

135. Петренко Ю. А., Бугаєвський М. С. Гібридна методологія управління проектами модернізації системи автоматизованого управління на асфальтобетонних заводах // Multidisciplinary academic notes. Theory, methodology and practice : матеріали XVII Міжнар. наук.-практ. конф., 03–06 трав. 2022 р., Tokyo, Japan. 2022. С. 1092–1096. DOI: 10.46299/ISG.2022.1.17. URL: <https://isg-konf.com/wp-content/uploads/2022/05/Multidisciplinary-academic-notes.-Theory-methodology-and-practice.pdf>

136. Петренко Ю. А., Бугаєвський М. С. Використання гібридної методології в управлінні проєктами // Комп'ютерно-інтегровані технології автоматизації технологічних процесів на транспорті та у виробництві : матеріали Всеукр. наук.-практ. конф. здобувачів вищої освіти і молодих учених, 23 листоп. 2022 р. Харків : ХНАДУ, 2022. С. 255–258. URL: https://mf.khadi.kharkov.ua/fileadmin/user_upload/%D0%9C%D0%B0%D1%82%D0%B5%D1%80%D1%96%D0%B0%D0%BB%D0%B8_%D0%9A%D0%86%D0%A2-2022.pdf

137. Петренко Ю. А., Бугаєвський М. С. Задачі впровадження методів управління проєктами модернізації систем автоматизованого управління на асфальтобетонних заводах // Збірник наукових праць за матеріалами V Міжнар. наук.-практ. інтернет-конф., 23–24 берез. 2023 р. Дніпро : Юрсервіс, 2023. С. 148–151. URL: https://nmetau.edu.ua/file/zbirnik_materialiv_konf_udunt_2023.pdf

138. Петренко Ю. А., Бугаєвський М. С. Використання гнучких методів у проєктній діяльності з розробки програмного забезпечення // Сучасний стан досліджень в сфері ІТ : матеріали Всеукр. наук.-практ. конф. здобувачів вищої освіти і молодих учених, 19 квіт. 2024 р. Харків : ХНАДУ, 2024. С. 168–172. URL: <https://bit.ly/4eQD6Iq>

139. Федорович О., Прончаков Ю. Method to organize logistic transport interactions for the new order portfolio of distributed virtual manufacture // Radioelectronic and Computer Systems. 2020. № 2. P. 102–108. DOI: 10.32620/reks.2020.2.09.

140. Buhaiivskyi M., Petrenko Y. Planning and optimization models in ready-made concrete production and logistics // Radioelectronic and Computer Systems. 2025. No. 2. P. 264–279. DOI: 10.32620/reks.2025.2.17.

141. Бугаєвський М. С., Петренко Ю. А. Багаторівневе планування й управління у розвитку виробництва та ланцюжках поставок бетону // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Стратегічне

управління, управління портфелями, програмами та проектами. 2025. № 1(10). С. 10–17. DOI: 10.20998/2413-3000.2025.10.2.

142. Бугаєвський М. С., Петренко Ю. А. Моделі машинного навчання для аналізу ефективності виробництва та логістики готового бетону // Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету. 2025. № 109. С. 48–55. DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2025.109.0.48.

143. Петренко Ю. А., Бугаєвський М. С. Методи машинного навчання для цифрових двійників виробництва та логістики бетонних заводів у проектах післявоєнного відновлення України // Управління проектами у розвитку суспільства : тези доп. XXII Міжнар. конф., 23 трав. 2025 р., Київ. Київ : Київ. нац. ун-т буд-ва і архітектури, 2025. С. 233–237.

144. Buhaievskiy M., Petrenko Y. Planning and management of the order portfolio and development projects of concrete plants // Integrated strategic management, portfolio, program, and project management : abstr. of the 15th Intern. Sci. and Practical Conf., February 11–12, 2025. Kharkiv : NTU «KhPI», 2025. P. 22–23.

145. Бугаєвський М. С., Петренко Ю. А. Використання штучного інтелекту для виявлення аномалій і відхилень у виробничих даних // Сталий розвиток сучасних інформаційних технологій : матеріали студентської наук. конф. здобувачів вищої освіти та молодих учених, 24 квіт. 2025 р. Харків : ХНАДУ, 2025. С. 136–140. URL: <https://bit.ly/495JPKT>

146. Værbak M., Billanes J. D., Jørgensen B. N., Ma Z. A Digital Twin Framework for Simulating Distributed Energy Resources in Distribution Grids // Energies. 2024. Vol. 17. Article no. 2503. DOI: 10.3390/en17112503.

147. Бугаєвський М., Петренко Ю. Simulation of production and logistics for concrete plants // Radioelectronic and Computer Systems. 2024. Vol. 2024, no. 3. P. 190–204. DOI: 10.32620/reks.2024.3.13.

148. Петренко Ю. А., Бугаєвський М. С. Цифрові двійники у виробництві та логістиці бетонних заводів // Інформаційні системи в управлінні проектами та програмами : зб. праць Міжнар. наук.-практ. конф.,

9–13 верес. 2024 р. Харків–Коблево : ХНУРЕ, 2024. С. 180–183. URL:
<https://mmp-conf.org/documents/archive/proceedings2024.pdf>

149. Петренко Ю. А., Бугаєвський М. С. Упровадження гнучких підходів до технологій укладання контрактів на основі гібридної методології управління проектами в дорожньо-будівельній галузі // Вісник ХНАДУ. Харків : ХНАДУ, 2023. № 100. С. 25–29. DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2023.100.0.25.

150. Петренко Ю. А., Бугаєвський М. С. Використання сучасних методів контролю якості у проектній діяльності з розробки програмного забезпечення // Комп'ютерно-інтегровані технології автоматизації технологічних процесів на транспорті та у виробництві : матеріали Всеукр. наук.-практ. конф. здобувачів вищої освіти і молодих учених, 22 листоп. 2023 р. Харків : ХНАДУ, 2023. С. 297–301. URL:
<https://dspace.khadi.kharkov.ua/handle/123456789/17902>

ДОДАТОК А. Акти впровадження результатів дисертаційної роботи

УКРАЇНА
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ
УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ
АВТОМОБІЛЬНО-ДОРОЖНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ
№02071168
61002 м.Харків-МСП, вул. Ярослава Мудрого, 25
Тел. 700-38-66

07.05.2026 № 238/42

ЗАТВЕРДЖУЮ
ПРОРЕКТОР З НАУКОВОЇ РОБОТИ
Ілля ДІМИТРІЄВ
« 07 » _____ 2026 року



АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

результатів дисертаційного дослідження в навчальний процес
Харківського національного автомобільно-дорожнього університету

Ми, що нижче підписалися, декан механічного факультету к.т.н. проф. Єфименко О.В. та завідувач кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій д.т.н. проф. Гурко О.Г. склали даний акт про те, що результати Бугаєвського Михайла Сергійовича, які отримані в його дисертаційній роботі використані при проведенні занять з дисциплін для здобувачів рівня вищої освіти «бакалавр»:

– «Основи інформаційних технологій» для спеціальностей F3 «Комп'ютерні науки», ОП «Комп'ютерні науки», F6 «Інформаційні системи та технології» ОП «Інформаційні інтелектуальні системи та технології» та спеціальності G7 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка» ОП «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології», 2025р.;

– Системи оптимального, адаптивного та робастного керування» для потоку МА-41-22, МА-42-22 спеціальності G7 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка», ОП «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології».

Впровадження результатів дисертаційної роботи в навчальний процес дозволило підвищити якість підготовки фахівців за рахунок:

- удосконаленого підхід до імітаційного моделювання логістики готового бетону на основі мультиагентної системи, яка враховує стохастичний попит, змінні маршрути доставки, рецептуру суміші та часові обмеження виробництва;
- розробки IoT-платформи системи маршрутизації, що дозволяє підвищити ефективність предикативної аналітики логістики готового бетону;
- подальшого розвитку технологій технологій Industry 4.0 та 5.0, а саме методів штучного інтелекту та машинного навчання у цифрових двійниках.

Декан механічного факультету

Олександр ЄФІМЕНКО

Завідувач кафедри автоматизації та
комп'ютерно-інтегрованих технологій

Олександр ГУРКО

Вих. № 033/14 від « 14 » 05 2026

АКТ

про впровадження науково-практичних результатів дисертаційної роботи Бугаєвського Михайла Сергійовича на здобуття наукового ступеня доктора філософії «Моделі та інформаційна технологія цифрових двійників у виробництві та логістиці бетону»

Найменування пропозиції для впровадження:

- моделі оптимізації інфраструктури виробничої та розподільчої мережі;
- імітаційна модель аналізу процесів виробництва та логістики готового бетону;
- інформаційна технологія планування та управління виробництвом та логістикою бетонних підприємств.

Оцінка ефективності впровадження: позитивна.

Ефективність впровадження:

1. Забезпечено підвищення обґрунтованості управлінських рішень у процесах планування виробництва та логістики бетону у проектах будівництва та ремонту автомобільних доріг і відбудови інженерних споруд за рахунок використання аналітичних, оптимізаційних та імітаційних моделей.

2. Підвищено узгодженість між виробничими підрозділами та будівельними майданчиками, що дозволило покращити координацію графіків виготовлення та постачання готового бетону в умовах змінного попиту та ризиків.

3. Забезпечено можливість моделювання різних сценаріїв функціонування виробничо-логістичної системи, що дозволяє завчасно виявляти потенційні вузькі місця та оцінювати наслідки змін у параметрах системи.

4. Підвищено ефективність використання виробничих потужностей та транспортних засобів за рахунок оптимізації структури мережі та режимів функціонування підприємства.

5. Забезпечено впровадження підходів предиктивної аналітики для оцінювання ризиків затримок та контролю якості бетонних сумішей під час транспортування і виробництва на основі даних автоматизованих систем керування та методів машинного навчання.

Акт складено без фінансових зобов'язань перед автором.

З повагою,

Керівник управління з персоналу

Катерина ВАСІЮТА





ТОВ «Завод залізобетонних конструкцій «ЕТАЛОН»
61060, м. Харків, проспект Льва Ландау, 171
ЄДРПОУ 38771657 ІПН387716520324
ІВАН: UA823204780000026003924942588
в АБ «УКРГАЗБАНК», МФО320478
тел. +38(057)766-66-00
e-mail: GBK.Etalon@gmail.com

Вих. № 15/1 від 15.05.2026

АКТ

про впровадження науково-практичних результатів дисертаційної роботи Бугаєвського Михайла Сергійовича на здобуття наукового ступеня доктора філософії «Моделі та інформаційна технологія цифрових двійників у виробництві та логістиці бетону»

У цьому акті засвідчується впровадження у діяльність ТОВ „ЗЗК „Еталон“ наукових положень та результатів дисертації Бугаєвського Михайла Сергійовича.

Опис впровадження. Запропонований Бугаєвським М.С. підхід до планування та керування виробничо-логістичними системами бетонних підприємств містить у собі:

- системну модель планування та оптимізації в логістиці бетону;
- моделі оптимізації інфраструктури виробничо-розподільчої мережі бетонних підприємств;
- імітаційна модель аналізу процесів виробництва та логістики готового бетону та принципи побудови цифрового двійника підприємства;
- моделі машинного навчання для аналізу ефективності виробничо-логістичних процесів бетонних підприємств;
- інформаційна технологія планування та управління виробництвом і логістикою бетонних підприємств.

В результаті впровадження науково-практичних результатів дисертації Бугаєвського М.С. отримано:

1. Забезпечено підвищення оперативності планування виробництва бетонних сумішей на мобільних бетонних заводах, що дозволило ефективно адаптувати процеси до умов будівництва та реконструкції автомобільних доріг і штучних споруд.

2. Покращено організацію логістичних процесів доставки бетонних сумішей до будівельних майданчиків за рахунок врахування змінних умов дорожньої інфраструктури, маршрутів транспортування та обмежень виконання робіт.

3. Забезпечено можливість швидкого розгортання та переналаштування виробничо-логістичної системи при зміні локації мобільних бетонних заводів, що є критично важливим для реалізації проектів дорожнього будівництва.

4. Підвищено рівень контролю якості бетонних сумішей у процесі виробництва та транспортування завдяки використанню аналітичних моделей і даних з пересувних лабораторій та засобів автоматизації.