

М. С. БУГАЄВСЬКИЙ, Ю. А. ПЕТРЕНКО**БАГАТОРІВНЕВЕ ПЛАНУВАННЯ Й УПРАВЛІННЯ У РОЗВИТКУ ВИРОБНИЦТВА ТА ЛАНЦЮЖКАХ ПОСТАВОК БЕТОНУ**

Актуальність дослідження пов'язана з тим, що 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. 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. Метою роботи є підвищення ефективності планування виробництва та логістики готового бетону на основі системного представлення та імітаційного моделювання в умовах динаміки ринкових вимог та обмежень. Отримані наступні результати. Запропоновано багаторівневу модель планування в логістиці бетону, яка враховує як його виробництво, так і розподіл та дозволяє вирішувати завдання узгодження планів постачання та розвитку підприємства. Використання даної моделі дозволяє проводити системний аналіз портфеля замовлень та проєктів розвитку виробництва з метою виявлення можливості їх реалізації на конкретному підприємстві, погоджувати плани реалізації проєктів та плани підприємства на різних рівнях планування, відбирати замовлення/проєкти до реалізації у відповідність до обраної стратегії розвитку. 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 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. Сформовані моделі можуть бути корисним інструментом, який допоможе менеджерам, диспетчерам та інженерам бетонних заводів спланувати свою діяльність.

Ключові слова: товарний бетон; доставка бетону; ланцюг поставок; планування виробництва та логістики; імітаційне моделювання.

М. BUGAEVSKYI, Y. PETRENKO**MULTI-LEVEL PLANNING AND MANAGEMENT IN CONCRETE PRODUCTION DEVELOPMENT AND SUPPLY CHAINS**

The relevance of the research is linked to the fact that the restoration of destroyed housing stock, the reconstruction of damaged infrastructure and industrial buildings, and the resumption of work on all construction sites across the country will lead to a sharp increase in demand for concrete, which will evidently exceed existing production capacities. Therefore, one of the key priorities for Ukrainian concrete plants today must be the implementation of strategies and development projects aimed at increasing productivity without compromising quality. The purpose of this study is to enhance the efficiency of production planning and logistics for ready-mixed concrete based on a systematic approach and simulation modeling under the dynamics of market demands and constraints. The following results have been obtained. A multi-level planning model for concrete logistics has been proposed. This model considers both production and distribution processes, allowing for the alignment of supply plans with the enterprise's development strategies. The use of this model enables systematic analysis of order portfolios and production development projects to assess their feasibility at a specific enterprise, coordinate project implementation plans with enterprise strategies at various planning levels, and select orders/projects for execution according to the chosen development strategy. A simulation model for analyzing the processes of production and logistics of ready-mixed concrete has been developed. This model facilitates solving various tasks, including evaluating the rationality and efficiency of production and delivery organization, identifying bottlenecks in production and logistics processes, forecasting performance indicators of concrete plants under changing production conditions, and generating data to support decisions aimed at reducing downtime for both plants and clients. The models developed can serve as valuable tools to assist managers, dispatchers, and engineers at concrete plants in planning their operations effectively.

Keywords: ready-mix concrete; concrete delivery; supply chain; production and logistics planning; simulation modeling.

Вступ. 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 [1]. 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.

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. Житлове будівництво за зрозумілих причин не показує чітких маркерів щодо стабілізації ринку. Однією з особливостей у забезпеченні поставок бетону є коротке логістичне плече та чутливість до дотримання графіків постачання бетонної суміші [2].

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

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».

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. 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. 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. 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 проєкту. Окрім того, розвиток ринку бетону, зокрема створення великих інтегрованих компаній, посилює конкуренцію, стимулюючи оптимізацію виробничих і логістичних процесів.

Отже, 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.

Загалом, комплексне планування та управління дозволяє не лише ефективно вирішувати поточні завдання, але й формувати стратегію розвитку, адаптовану до вимог сучасного ринку будівельних матеріалів [3].

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Проблема доставки бетону – це логістична задача, яка досліджує оптимальне відправлення вантажівок, задовольняючи деякі обмеження, пов'язані з часом, попитом і доступністю ресурсів [4].

Управління бетонними заводами з позицій логістичного підходу [5] 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 [6]. 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 зміни.

Підходи до планування виробництва в умовах невизначеності можна умовно поділити на дві ключові категорії: адаптивні та прогностичні [7]. 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 [8].

Прогностичні підходи, навпаки, орієнтовані на врахування ймовірності виникнення стохастичних подій ще на етапі розробки базового плану. 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.

Для вирішення системних завдань планування та управління складними розподіленими системами, якими є і підприємства, що розглядаються з виробництва та доставки готового бетону, розроблено різні підходи, методи та моделі. Одним з методів дослідження складних розподілених систем є метод математичного (аналітичного) моделювання [9]. Серед аналітичних методів найбільш розроблені та відомі завдання оперативно-календарного планування та управління [10]. Тут використовується різноманітний математичний інструментарій: методи мережного планування та управління [11], лінійне та динамічне програмування [12] та ін. Невід'ємним елементом аналізу систем управління ланцюжками постачання є імітаційні моделі [13]. Найбільш якісні результати при аналізі динаміки виробництва та логістики готового бетону дають саме методи імітаційного моделювання, які дозволяють найбільш гнучко, повно та наочно відображати процеси, що протікають у системі.

Мета роботи. Метою роботи є підвищення ефективності планування виробництва та логістики готового бетону на основі системного представлення та імітаційного моделювання в умовах динаміки ринкових вимог та обмежень.

Відповідно до поставленої мети дослідження необхідно вирішити такі завдання:

1. Розробити багаторівневу модель планування виробництва та логістики бетонних заводів.

2. Розробити імітаційну модель аналізу процесів виробництва та логістики готового бетону.

Створення імітаційної моделі буде сприяти підвищенню ефективності прийняття рішень щодо управління ризиками для раннього виявлення неоптимальної діяльності та майбутнього розвитку виробництва бетону та його логістики доставки.

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 рис. 1.

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 (рис. 2) 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.

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.

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

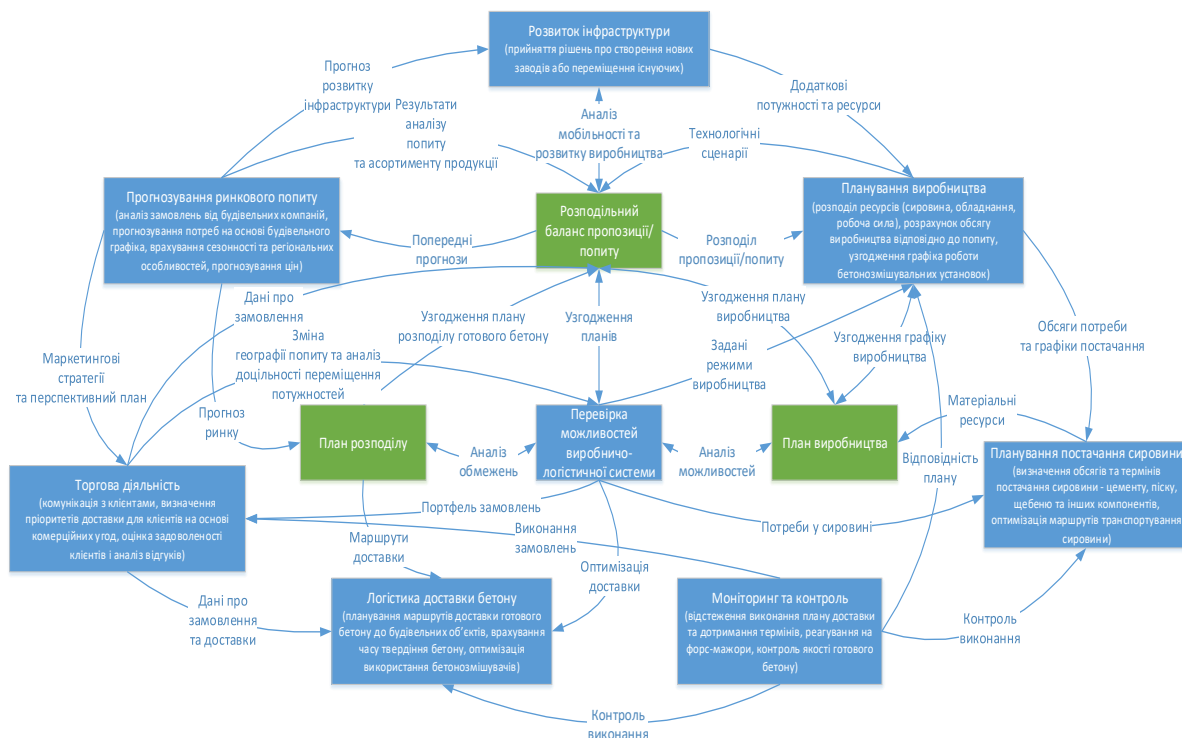


Рис. 1. Узагальнена схема процесу планування виробництва та логістики готового бетону

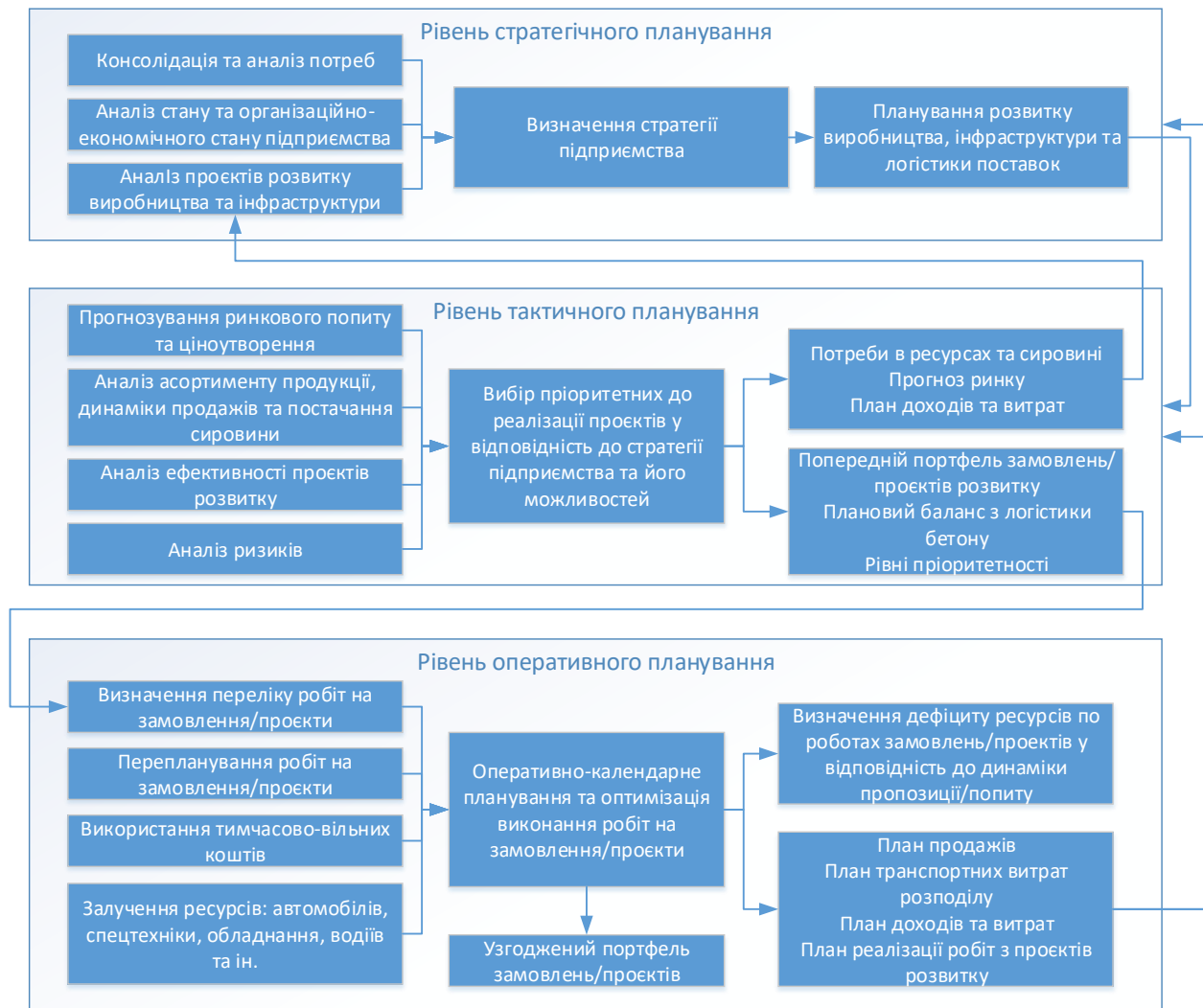


Рис. 2. Узагальнена схема процесу планування виробництва та логістики готового бетону

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.

Імітаційна модель аналізу процесів виробництва та логістики бетону. Щоб повністю 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 [14, 15] та складається з компонент, кожен з яких відображає окремий елемент динаміки поведінки підприємства та інфраструктури розподілу бетону. Структуру агентної імітаційної моделі показано на рис. 3.

У розробленій імітаційній моделі 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). Таким чином, маємо популяцію в потрібній кількості всіх типів агентів. Кожен агент має свої змінні та математичну модель, що описує його поведінку.

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.

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 рис. 4. У нас немає на меті деталізувати моделювання до рівня обладнання тому ми використали модель на основі системної динаміки, що забезпечує імітацію процесу виробництва з урахуванням наявних запасів матеріалів та продуктивності установки.

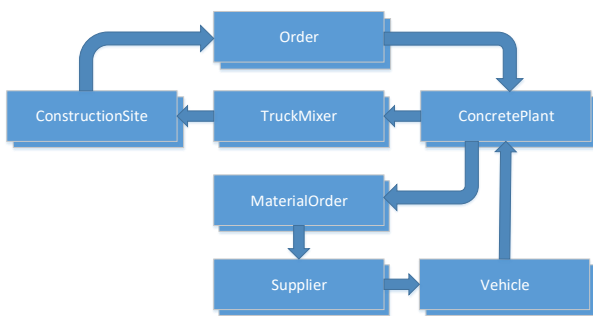


Рис. 3. Структура агентної імітаційної моделі аналізу процесів виробництва та логістики бетону

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, замовленням, яке він виконує. Важливі 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 автобетонозмішувачів (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 доставки бетону, зайнятості ресурсів на розвантаженні, час очікування розвантаження, показники черги вантажівок на обслуговування тощо.

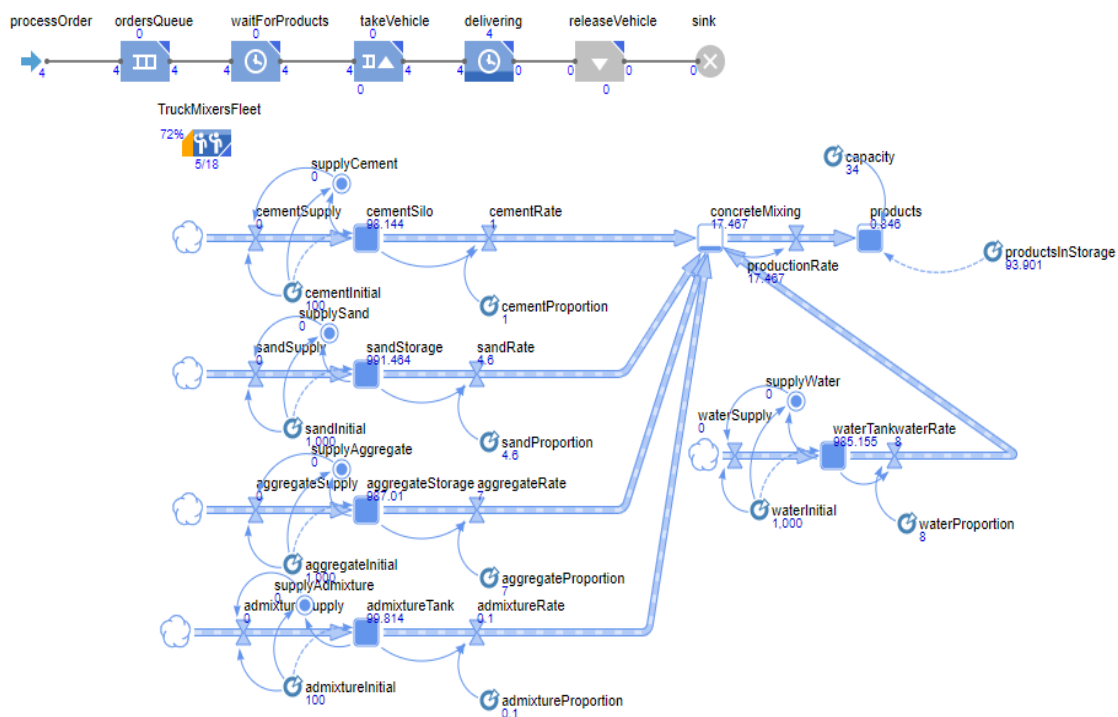


Рис. 4. Імітаційна модель агенту ConcretePlant

Результати моделювання процесів виробництва та логістики бетону. На рис. 5 представлено модель після запуску. Агенти функціонують у просторі геоінформаційної системи OpenStreetMap. Назви початкових місць виробничих потужностей та дистриб'юторів зчитуються з бази даних. Пошукова система геоінформаційної системи використовується для пошуку місць на карті та розміщенні там агентів, що дає можливість гнучко формувати як мережу бетонних заводів так і розподільчу мережу будівельних майданчиків.

Вантажівки рухаються по реальних дорогах, а маршрути створюються, коли транспортні засоби починають рухатися за своїми напрямками. 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. 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.

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 клієнта, 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 ми відображаємо різні параметри, діаграми та графіки. На рис. 6 представлений екран з результатами, що формуються для окремого 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.

На рис. 7 представлені дані маршрутів автобетонозмішувачів, де фіксуються всі часові параметри, що дає можливість в подальшому використати ці дані при формуванні графіків доставки.

Спостерігаючи за процесом моделювання для автобетонозмішувачів 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, а також діаграму станів, що визначає поведінку агента автобетонозмішувача.

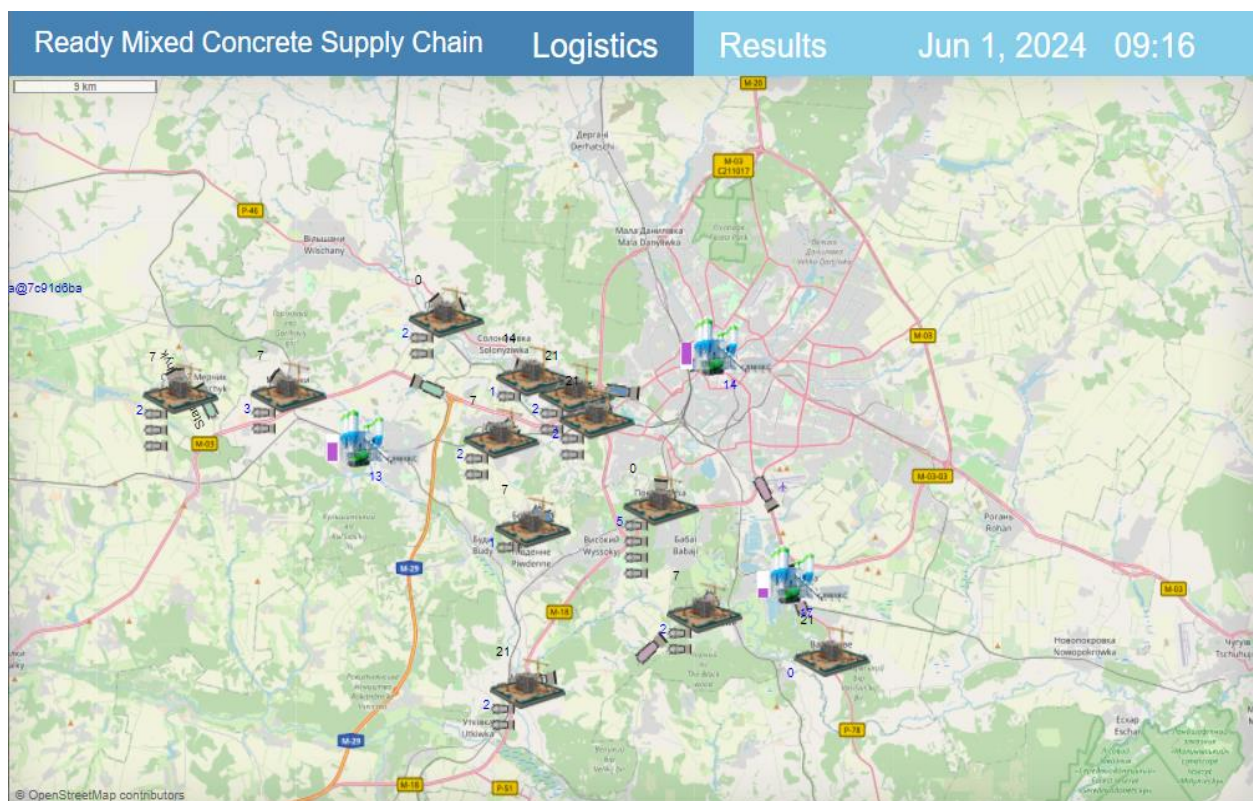


Рис. 5. Спостереження за логістикою доставки бетону при запуску імітаційної моделі

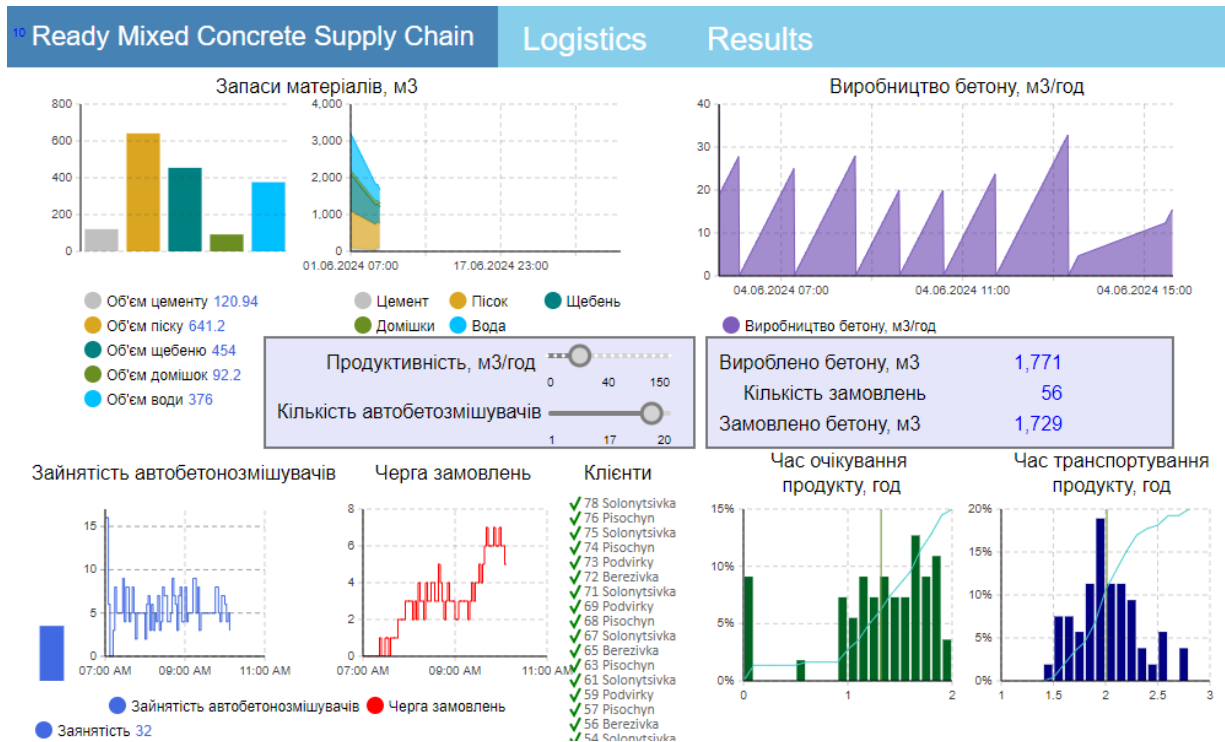


Рис. 6. Результати моделювання для агента ConcretePlant

Також формуються агреговані результати по всій мережі бетонних заводів, де можна побачити поточні показники щодо виробництва бетону, динаміку виробництва, зайнятості автопарку та час очікування продукту.

Пункт призначення	Початок очікування завантаження	Початок доставки	Початок очікування розвантаження	Початок повернення на завод	Час у дорозі до майданчику	Час у дорозі до заводу
Solonytsivka	11.59	0.0	0.0	0.0	0.18	0.19
Podvirky	15.33	0.0	0.0	0.0	0.14	0.15
Berezivka	13.43	0.0	0.0	0.0	0.28	0.27
Berezivka	13.59	0.0	0.0	0.0	0.28	0.27
Berezivka	13.73	0.0	0.0	0.0	0.28	0.27
Berezivka	14.45	0.0	0.0	0.0	0.28	0.27
Pisochyn	10.37	14.94	15.07	0.0	0.13	0.19
Pisochyn	9.83	15.27	15.4	0.0	0.13	0.19
Podvirky	14.82	0.0	0.0	0.0	0.14	0.15
Podvirky	14.62	0.0	0.0	0.0	0.14	0.15
Podvirky	14.22	0.0	0.0	0.0	0.14	0.15
Solonytsivka	12.72	0.0	0.0	0.0	0.18	0.19
Pisochyn	9.97	15.16	15.28	0.0	0.13	0.19
Pisochyn	10.82	15.6	0.0	0.0	0.18	0.19
Solonytsivka	11.91	0.0	0.0	0.0	0.18	0.19
Solonytsivka	12.36	0.0	0.0	0.0	0.18	0.19
Solonytsivka	11.14	0.0	0.0	0.0	0.18	0.19

Рис. 7. Маршрути автобетонозмішувачів заводу та їх часові параметри

Висновки. Таким чином, проведено дослідження багатокритеріального завдання підтримки прийняття рішень для ефективного управління виробництвом готового бетону та планування його доставки до будівельних майданчиків.

Розроблено багаторівневу модель планування виробництва і логістики доставки бетону, що дає змогу вирішувати завдання координації поставок із загальними планами розвитку підприємства. Завдяки її використанню можна здійснювати комплексний аналіз портфеля замовлень і проєктів розвитку виробництва, оцінювати їхню реалізацію на конкретному підприємстві, узгоджувати плани виконання проєктів із загальною стратегією підприємства на різних рівнях, а також обирати замовлення та проєкти для реалізації відповідно до визначених пріоритетів.

Розроблена імітаційна модель може бути корисною на етапі планування та дозволяє 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 кращого 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.

Список літератури

1. Ринок цементу та бетону України: 2023 та прогноз потреб // Readymix – Режим доступу: <https://readymix.pro/rinok-cementu-ta-betonu-ukrayini-2023-ta-prognoz-potreb>. – Дата звернення: 15 січня 2025.
2. Fitriani H., Rizki L. D. Just-in-time application on readymix concrete production. *International Journal of Advanced Technology and Engineering Exploration*. 2022. vol. 9. pp. 1183-1195. DOI: <https://doi.org/10.19101/IJATEE.2021.876116>.
3. Куліков О. М., Заяц О. В., Оксамитна Л. П. Сучасні підходи до управління портфелями проєктів в галузі дорожнього будівництва. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Стратегічне управління, управління портфелями, програмами та проєктами: Збірник наукових праць*. 2023. № 1 (7). С. 42-50. DOI: <https://doi.org/10.20998/2413-3000.2023.7.6>.
4. 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: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104631>.
5. 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, pp. 298-308. DOI: <https://doi.org/10.52403/ijrr.20240132>.

6. 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: <https://doi.org/10.3390/su15108169>.
7. 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: <https://doi.org/10.3390/app142311017>.
8. Семенчук К. Л. Моделювання стратегій ланцюгів постачань у проєктній діяльності. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Стратегічне управління, управління портфелями, програмами та проєктами: Збірник наукових праць*. 2024. № 1 (8). С. 58-65. DOI: <https://doi.org/10.20998/2413-3000.2024.8.8>.
9. 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: <https://doi.org/10.3390/app14167151>.
10. 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: <https://doi.org/10.3390/buildings13051249>.
11. 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: <https://doi.org/10.3390/app142412045>.
12. Vicente J. J. Optimizing Supply Chain Inventory: A Mixed Integer Linear Programming Approach. *Systems*. 2025. vol. 13. no. 1, article no. 33. DOI: <https://doi.org/10.3390/systems13010033>.
13. Matejević-Nikolić B., Živković L. Development of the Simulation Model for Ready Mixed Concrete Supply Chain Cost Structure. *Tehnički vjesnik*, 2023. vol. 30. no. 1. pp. 102-113. DOI: <https://doi.org/10.17559/TV-20220310120002>.
14. Buhaievskiy M., Petrenko Y. Simulation of production and logistics for concrete plants. *Radioelectronic and Computer Systems*. 2024. vol. 2024. no. 3. pp. 190-204. DOI: <https://doi.org/10.32620/reks.2024.3.13>.
15. Kiyko S., Druzhinin E., Prokhorov O., Haidabrus B. Multi-agent Model of Energy Consumption at the Metallurgical Enterprise. *DSMIE 2020: Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange*. 2020. pp. 156-165. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-50794-7_16.
- and projects: Collection of scientific papers]. Kharkov, NTU "KhPI" Publ, 2023. № 1 (7). pp. 42-50. DOI: <https://doi.org/10.20998/2413-3000.2023.7.6>.
4. Tzanetos A., Blondin M. (2023). Systematic search and mapping review of the concrete delivery problem (CDP): Formulations, objectives, and data. *Automation in Construction*. vol. 145. article no. 104631. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104631>.
5. Jaisree K. B., Palani B. (2024). Supply Chain Management in Construction Projects: A Comprehensive Analysis of the Indian Context - Review. *International Journal of Research and Review*. vol. 11. no. 1, pp. 298-308. DOI: <https://doi.org/10.52403/ijrr.20240132>.
6. Olugboyega O., Ejohwomu O., Omopariola E. D., Omoregie A. (2023). Sustainable Ready-Mixed Concrete (RMC) Production: A Case Study of Five RMC Plants in Nigeria. *Sustainability*. vol. 15. article no. 8169. DOI: <https://doi.org/10.3390/su15108169>.
7. Kim T, Kim Y-W. (2024). Proactive Production Scheduling Approach for Off-Site Construction with Due Date Uncertainty. *Applied Sciences*. vol. 14. no. 23, article no. 11017. DOI: <https://doi.org/10.3390/app142311017>.
8. Semenchuk K. Modelyuvannya stratehiy lantsyuhiv postachan' u proyeektniy diyal'nosti [Project activities modeling of supply chain strategies] *Visnyk NTU «KhPI». Seriya: Stratehichne upravlinnia, upravlinnia portfeliamy, prohramamy ta proektamy: Zbirnyk naukovykh prats* [Bulletin of the NTU "KhPI". Series: Strategic management, management of portfolios, programs and projects: Collection of scientific papers]. Kharkov, NTU "KhPI" Publ, 2024. № 1 (8). – pp. 58-65. DOI: <https://doi.org/10.20998/2413-3000.2024.8.8>.
9. Douaioui K., Benmoussa O., Ahlaqqach M. (2024). Optimizing Supply Chain Efficiency Using Innovative Goal Programming and Advanced Metaheuristic Techniques. *Applied Sciences*. vol. 14. no. 16, article no. 7151. DOI: <https://doi.org/10.3390/app14167151>.
10. Anastasiu L., Câmpian C., Roman N. (2023). Boosting Construction Project Timeline: The Case of Critical Chain Project Management (CCPM). *Buildings*. vol. 13. no. 5, article no. 1249. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings13051249>.
11. Forcael E., Contreras C., Francesconi C., Baesler F. (2024). Applying Game Theory to Teach the PERT Scheduling Method. *Applied Sciences*. vol. 14. no. 24, article no. 12045. DOI: <https://doi.org/10.3390/app142412045>.
12. Vicente J. J. (2025). Optimizing Supply Chain Inventory: A Mixed Integer Linear Programming Approach. *Systems*. vol. 13. no. 1, article no. 33. DOI: <https://doi.org/10.3390/systems13010033>.
13. Matejević-Nikolić B., Živković L. (2023). Development of the Simulation Model for Ready Mixed Concrete Supply Chain Cost Structure. *Tehnički vjesnik*. vol. 30. no. 1. pp. 102-113. DOI: <https://doi.org/10.17559/TV-20220310120002>.
14. Buhaievskiy M., Petrenko Y. (2024). Simulation of production and logistics for concrete plants. *Radioelectronic and Computer Systems*. vol. 2024. no. 3. pp. 190-204. DOI: <https://doi.org/10.32620/reks.2024.3.13>.
15. Kiyko S., Druzhinin E., Prokhorov O., Haidabrus B. (2020). Multi-agent Model of Energy Consumption at the Metallurgical Enterprise. *DSMIE 2020: Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange*. pp. 156-165. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-50794-7_16.

References (transliterated)

1. Rynok tsementu ta betonu Ukrayiny: 2023 ta prohnnoz potreb [Cement and concrete market of Ukraine: 2023 and demand forecast]. *Readymix*. Available at: <https://readymix.pro/rinok-cementu-ta-betonu-ukrayini-2023-ta-prognoz-potreb>. (accessed 15.01.2025).
2. Fitriani H., Rizki L. D. (2022). Just-in-time application on readymix concrete production. *International Journal of Advanced Technology and Engineering Exploration*. vol. 9. pp. 1183-1195. DOI: <https://doi.org/10.19101/IJATEE.2021.876116>.
3. Kulikov O., Zaiats O., Oksamytna L. Suchasni pidkhody do upravlinnya portfelyamy proyeektiv v haluzi dorozhn'oho budivnytstva [Modern approaches to project portfolio management in the road construction industry]. *Visnyk NTU «KhPI». Seriya: Stratehichne upravlinnia, upravlinnia portfeliamy, prohramamy ta proektamy: Zbirnyk naukovykh prats* [Bulletin of the NTU "KhPI". Series: Strategic management, management of portfolios, programs

Надійшла (received) 18.01.2025

Відомості про авторів / About the Authors

Бугаєвський Михайло Сергійович (Buhaievskiy Mikhailo) – аспірант кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, м. Харків; e-mail: bugaevsky73@gmail.com, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9844-3146>.

Петренко Юрій Антонович (Petrenko Yuri) – доктор технічних наук, професор, професор кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, м. Харків; e-mail: petrenko.yuriy.an@gmail.com, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4596-8870>.