

ВІДГУК ОФІЦІЙНОГО ОПОНЕНТА

на дисертаційну роботу Бугаєвського Михайла Сергійовича «Моделі та інформаційна технологія цифрових двійників у виробництві та логістиці бетону», подану на здобуття ступеня доктора філософії з галузі знань 12 «Інформаційні технології» за спеціальністю 122 «Комп'ютерні науки»

Актуальність теми дисертаційної роботи

Дисертаційна робота Бугаєвського Михайла Сергійовича присвячена розв'язанню актуального науково-прикладного завдання розроблення моделей та інформаційної технології цифрових двійників для підтримки прийняття рішень у виробництві та логістиці готових бетонних сумішей. Актуальність обраної теми визначається одночасним впливом кількох обставин: високою ресурсо- та часозалежністю виробництва товарного бетону, обмеженим терміном збереження його технологічних властивостей під час транспортування, необхідністю синхронізації роботи бетонних заводів, автопарку та будівельних майданчиків, а також істотним впливом випадкових затримок, дефіциту матеріалів, несправностей обладнання та порушень транспортної інфраструктури.

Особливої ваги дослідження набуває в умовах воєнних руйнувань та майбутнього масштабного відновлення житлової, транспортної, енергетичної і промислової інфраструктури України. Очікуване зростання попиту на бетонні суміші потребує не лише нарощування виробничих потужностей, а й підвищення ефективності використання наявних ресурсів, скорочення простоїв, забезпечення своєчасності доставки та стабільності якості продукції. Традиційні розрізнені системи автоматизації виробництва, диспетчеризації транспорту, управління

замовленнями та лабораторного контролю не забезпечують цілісного відображення стану виробничо-логістичної системи й не створюють достатньої основи для сценарного прогнозування.

Застосування концепції цифрового двійника, що поєднує дані фізичних об'єктів, IoT-моніторинг, геоінформаційні сервіси, імітаційні та оптимізаційні моделі, а також засоби машинного навчання, є перспективним напрямом підвищення обґрунтованості управлінських рішень. Тому тема дисертації відповідає сучасним тенденціям розвитку комп'ютерних наук, зокрема інтелектуальним системам підтримки прийняття рішень, кіберфізичним системам, цифровим двійникам, імітаційному моделюванню, аналізу даних та штучному інтелекту. Отже, актуальність дисертаційного дослідження є належно обґрунтованою.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами та темами

Дослідження виконано на кафедрі автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій Харківського національного автомобільно-дорожнього університету в межах науково-дослідних робіт за державними реєстраційними номсрами 0124U004234 (2024–2025 рр.) та 0123U104417 (2023–2024 рр.). Тематика дисертації узгоджується із завданнями цифрової трансформації виробничих підприємств, розвитком комп'ютерно-інтегрованих технологій, моделюванням виробничо-логістичних процесів та створенням систем підтримки прийняття рішень. Отримані результати доповнюють зазначені дослідження моделями планування і оптимізації, мультиагентною імітаційною моделлю та інформаційною технологією цифрового двійника бетонного підприємства.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації

Наукові положення, висновки та практичні рекомендації дисертації загалом є обґрунтованими. Це забезпечено логічною структурою дослідження: від аналізу предметної області та сучасних засобів цифровізації — до системного подання виробничо-логістичних процесів, формалізації оптимізаційних задач, розроблення моделей машинного навчання, побудови мультиагентної імітаційної моделі та інтеграції отриманих компонентів у цілісну інформаційну технологію.

Методологічну основу роботи становлять системний аналіз, теорія прийняття рішень, методи оптимізації, дискретно-подійне, агентне та системно-динамічне моделювання, методи машинного навчання і статистичного оцінювання. Обраний комплекс методів відповідає меті та завданням дисертації. Системне логістичне подання дозволило виділити взаємопов'язані виробничі, транспортні, ресурсні, економічні та якісні підсистеми. Математичні моделі враховують попит, виробничі потужності, транспортні ресурси, часові вікна, маршрути, структуру витрат і доходів. Імітаційна модель відображає поведінку бетонних заводів, автобетонозмішувачів, замовлень та будівельних майданчиків у динамічному середовищі.

Обґрунтованість результатів посилюється проведенням сценарних та оптимізаційних експериментів, аналізом ризиків, порівнянням кількох моделей машинного навчання за метриками accuracy, precision, recall, F1-score, AUC, MAE, RMSE та R^2 , а також використанням реальної дорожньої інфраструктури в геоінформаційному середовищі. Висновки за розділами відповідають поставленим завданням, а загальні висновки відображають основні результати роботи. Водночас окремі аспекти експериментальної методики, відтворюваності

та порівняння з базовими методами потребують додаткового уточнення, що зазначено у зауваженнях.

Достовірність результатів дослідження

Достовірність одержаних результатів забезпечується коректним використанням відомих методів системного аналізу, математичного та імітаційного моделювання, машинного навчання; узгодженістю математичних постановок із фізичним змістом процесів виробництва і доставки бетону; застосуванням багатоваріантних сценарних експериментів; порівнянням альтернативних алгоритмів; аналізом чутливості параметрів; а також практичною апробацією результатів.

Практичне підтвердження результатів представлено актами впровадження у діяльність ТОВ «Еталон», компанії Autostrada та в освітній процес Харківського національного автомобільно-дорожнього університету. За наведеними автором результатами порівняння до і після впровадження елементів інформаційної технології середній час доставки зменшився з 2,8 до 2,4 год, частка своєчасних доставок зросла з 82 до 94 %, втрати якості під час транспортування знизилися з 6,5 до 4,8 %, середня собівартість 1 м³ — з 1980 до 1840 грн, а коефіцієнт використання транспорту підвищився з 0,72 до 0,83. Сукупність цих результатів дає підстави вважати основні положення дисертації достовірними в межах наведених умов і припущень.

Основні наукові результати дисертації

До основних наукових результатів дисертації слід віднести наступне:

1. Сформовано системне логістичне подання процесів управління підприємствами з виробництва та розподілу готового бетону, яке поєднує виробничу, транспортну, ресурсну, економічну та інформаційну складові й створює основу для побудови комплексу взаємопов'язаних моделей.

2. Запропоновано багаторівневу модель планування виробництва та логістики товарного бетону, що розмежовує стратегічний, тактичний і оперативний рівні прийняття рішень та враховує розвиток виробничо-розподільчої мережі.

3. Удосконалено модель планування та оптимізації логістичного ланцюга постачання готового бетону шляхом урахування попиту, маршрутів доставки, часових обмежень, місткості транспортних засобів, виробничих потужностей і економічних критеріїв.

4. Удосконалено модель оптимізації інфраструктури виробничо-розподільчої мережі, яка дає змогу оцінювати конфігурації розміщення заводів, розподіл замовлень і транспортних потоків за критеріями витрат, доходів, транспортної доступності та прибутковості.

5. Вперше розроблено комплексну мультиагентну імітаційну модель аналізу процесів виробництва та логістики готових бетонних сумішей, у якій поєднано дискретно-подійне, агентне та системно-динамічне моделювання, економічні показники, GIS-маршрутизацію та механізми урахування стохастичних ризиків.

6. Дістали подальшого розвитку моделі машинного навчання для прогнозування затримок доставки, оцінювання придатності бетонної суміші під час транспортування, контролю відповідності партій бетону вимогам і прогнозування міцності на основі даних систем управління замовленнями, IoT-платформ, телеметрії автобетонозмішувачів та виробничих сенсорів.

7. Розроблено інформаційну технологію цифрового двійника для планування та управління виробництвом і логістикою бетону, що інтегрує фізичний, інформаційний та аналітико-моделюючий рівні, взаємодіє з ERP, CRM, WMS, TMS, MES, SCADA, GIS та IoT-системами і формує сценарії, KPI та рекомендації для операторів, диспетчерів і менеджерів.

8. Запропоновано ризик-орієнтовану систему показників для оцінювання виробничих, ресурсних, логістичних, якісних та організаційних ризиків, зокрема кількості ризикових подій, сумарної затримки, економічних втрат, прибутку з урахуванням ризику та індексу стійкості системи.

Значимість отриманих результатів для науки і практичного використання

Наукова значимість роботи полягає у розвитку методів комп'ютерного моделювання та інтелектуального аналізу виробничо-логістичних систем. Автором запропоновано цілісне представлення цифрового двійника бетонного підприємства, в якому виробничі, транспортні, економічні та якісні процеси розглядаються не ізольовано, а як взаємопов'язана динамічна система. Інтеграція оптимізаційних постановок із поведінковою логікою агентів, GIS-середовищем та моделями машинного навчання розширює можливості дослідження таких систем за змінного попиту, ресурсних обмежень і ризикових подій.

Практична цінність полягає у можливості використання розробленої технології для планування виробничих програм, визначення раціонального

складу автопарку, вибору конфігурації мережі бетонних заводів, диспетчеризації поставок, прогнозування затримок, контролю придатності бетонної суміші та оцінювання економічних наслідків управлінських рішень. Запропонована система може застосовуватися стаціонарними і мобільними бетонними заводами, дорожньо-будівельними компаніями та підприємствами, що виконують великі інфраструктурні проекти.

Важливою перевагою є можливість сценарного аналізу до фактичного внесення змін у виробничу систему. Це зменшує ризик необґрунтованих капіталовкладень, дозволяє перевіряти наслідки зміни продуктивності заводу, кількості автобетонозмішувачів, інтенсивності замовлень, маршрутів, запасів сировини та рівня ризиків. Практичне впровадження і кількісні результати, наведені в роботі, підтверджують перспективність запропонованих рішень для цифрової трансформації підприємств будівельної та дорожньо-будівельної галузей.

Повнота викладення результатів досліджень в опублікованих працях

За темою дисертації опубліковано 17 наукових праць, серед яких 5 статей у наукових фахових виданнях України, дві з яких опубліковано у виданні, що індексується базою Scopus і належить до другого квартиля; один розділ колективної монографії; 11 публікацій у матеріалах міжнародних та всеукраїнських наукових конференцій. У публікаціях відображено основні етапи дослідження: системне подання цифрового двійника бетонного заводу, імітаційне моделювання виробництва та логістики, моделі планування й оптимізації, багаторівневе управління, моделі машинного навчання та питання цифрової трансформації підприємств.

Найбільш вагомі результати оприлюднено у статтях «Simulation of production and logistics for concrete plants» (2024), «Planning and optimization models in ready-made concrete production and logistics» (2025), «Багаторівневе планування й управління у розвитку виробництва та ланцюжках поставок бетону» (2025) та «Моделі машинного навчання для аналізу ефективності виробництва та логістики готового бетону» (2025). Заявлений особистий внесок здобувача у спільних публікаціях конкретизовано. За змістом і тематикою публікації в цілому достатньо повно відображають основні наукові результати дисертації.

Зміст дисертації та відповідність встановленим вимогам

Дисертація складається з анотації українською та англійською мовами, переліку умовних скорочень, вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку використаних джерел і додатка з актами впровадження. За авторськими даними повний обсяг становить 188 сторінок, основний текст — 146 сторінок; робота містить 62 рисунки, 26 таблиць і список із 151 джерела. Структура дисертації відповідає логіці наукового дослідження та забезпечує послідовне розкриття поставлених завдань.

Оцінка першого розділу

У першому розділі проаналізовано стан і проблеми планування, управління та розвитку бетонних виробництв у мирний час та в особливих умовах. Автор пов'язує потребу в цифровій трансформації з масштабами відновлення інфраструктури, регіональністю ринку товарного бетону, обмеженим радіусом доставки та високою чутливістю технологічних властивостей суміші до часу

транспортування. Розглянуто концепцію цифрових двійників, промисловий Інтернет речей, кіберфізичні системи, класичні задачі маршрутизації, дискретно-подійне та агентне моделювання, оптимізаційні й інтелектуальні методи.

Позитивною рисою розділу є поєднання аналізу предметної області з оглядом комп'ютерних технологій і програмних систем, які застосовуються у виробництві та логістиці бетону. Порівняльні таблиці дозволяють визначити можливості та обмеження аналітичних, інженерних, імітаційних і штучно-інтелектуальних підходів, а також наявних інформаційних систем. За результатами аналізу сформульовано науково-прикладне завдання, наукову гіпотезу, мету та послідовність подальших досліджень. Розділ створює достатнє теоретичне підґрунтя для розроблення авторських моделей.

Оцінка другого розділу

У другому розділі сформовано системне логістичне подання процесів виробництва та розподілу готового бетону, запропоновано багаторівневу модель планування та концептуальну структуру цифрового двійника бетонного заводу. Цифровий двійник представлено у вигляді фізичного, інформаційного та аналітико-моделюючого рівнів. Фізичний рівень включає технологічне обладнання, транспорт, датчики та виконавчі пристрої; інформаційний — інтеграцію даних виробничих, логістичних і корпоративних систем; аналітичний — імітаційні, оптимізаційні та машинно-навчальні компоненти.

Суттєвим результатом є формалізація задач планування логістичного ланцюга і розвитку виробничо-розподільчої інфраструктури. У моделях враховано розподіл замовлень між заводами, рейсами й транспортними засобами, часові вікна, місткість автопарку, витрати та доходи. Розділ також містить дослідження моделей машинного навчання для прогнозування затримок,

контролю придатності суміші під час транспортування та прогнозування якості бетону на виробництві. Наведено порівняння Decision Tree, Random Forest, MLP, LSTM і гібридної LSTM+MLP за системою класифікаційних та регресійних метрик.

Результати розділу є змістовними і мають самостійне наукове значення. Вони формують математичну та інформаційну основу для побудови імітаційної моделі й подальшої інтеграції компонентів у цифровий двійник.

Оцінка третього розділу

Третій розділ присвячено розробленню імітаційної моделі у середовищі AnyLogic. Модель реалізовано як поєднання агентного, дискретно-подійного та системно-динамічного підходів. Основними агентами є бетонний завод, автобетонозмішувач, будівельний майданчик, замовлення, рецептура суміші та елементи виробничої інфраструктури. Детально описано змінні, параметри, події, діаграми станів і механізми накопичення статистики.

Важливим результатом є розширення техніко-операційної моделі до управлінсько-економічного рівня. У поведінку агентів інтегровано собівартість виробництва, ціну реалізації, транспортні витрати, вартість простоїв, оплату праці, амортизацію, штрафи, надбавки та інші показники. Таке розширення дозволяє оцінювати не лише часові та ресурсні характеристики, а й прибутковість різних варіантів організації виробництва та доставки.

Окремо реалізовано механізми моделювання виробничих, ресурсних, логістичних, якісних та організаційних ризиків як стохастичних подій, що змінюють параметри агентів. Запропоновано систему KPI ризикостійкості, яка включає сумарну затримку, кількість ризикових подій, економічні втрати,

прибуток з урахуванням ризиків та індекс стійкості. Загалом третій розділ є центральним у дисертації й демонструє працездатність розробленої моделі.

Оцінка четвертого розділу

У четвертому розділі розроблені моделі об'єднано в інформаційну технологію цифрового двійника. Наведено її архітектуру, канали обміну даними та взаємодію з IoT-пристроями, PLC, SCADA, MES, ERP, CRM, WMS, TMS і GIS. Розглянуто приклад мережі з трьох бетонних заводів і дванадцяти будівельних майданчиків у Харківській області, для якої моделюються виробництво, формування черг, доставка реальними дорогами, розвантаження та повернення автобетонозмішувачів.

Наведено результати оптимізаційних експериментів. Зокрема, максимальне використання автобетонозмішувачів на рівні 85 % отримано за використання дев'яти машин, продуктивності заводу 48 м³/год та середнього очікування 0,3 год. Мінімальний час очікування близько п'яти хвилин досягнуто за дванадцятьма автобетонозмішувачів, продуктивності 73 м³/год та коефіцієнта використання транспорту 64 %. Проведено окремі експерименти для логістичних, виробничих, ресурсних, майданчикових і комбінованих ризиків.

У розділі також представлено методику оцінювання ефективності за KPI та результати практичної апробації. Порівняння показників до і після застосування технології свідчить про скорочення часу доставки, підвищення своєчасності постачань, зменшення втрат якості та собівартості, покращення використання транспорту. Запропоновано стратегії прогностного виробництва, адаптивної маршрутизації, технологічної адаптації та стійкого планування. Розділ підтверджує прикладну спрямованість і можливість використання результатів у реальних виробничо-логістичних системах.

Апробація результатів роботи

Основні положення, ідеї та результати дисертації доповідалися й обговорювалися на міжнародних та всеукраїнських конференціях у 2022–2026 роках, зокрема на конференціях з комп'ютерно-інтегрованих технологій, управління проєктами, інформаційних систем, сталого розвитку інформаційних технологій та інтегрованого стратегічного управління. Апробація охоплює етапи від формування концепції цифрового двійника й системного подання логістики до імітаційного моделювання, оптимізації та застосування машинного навчання. Результати впроваджено у виробничу діяльність та освітній процес, що підтверджує їх практичну спрямованість.

Зауваження до дисертаційної роботи

Позитивно оцінюючи дисертаційну роботу та одержані результати, слід висловити такі зауваження і побажання:

1. У підрозділі щодо зв'язку з науковими програмами наведено лише державні реєстраційні номери двох науково-дослідних робіт. Доцільно було б зазначити їх повні назви, конкретні завдання, які виконувалися здобувачем, та безпосередній внесок результатів дисертації у кожен тему.

2. Заявлена відмінність цифрового двійника від цифрової моделі потребує чіткішого формального розмежування. У роботі детально розроблено архітектуру, моделі та канали інтеграції, однак двосторонню автоматичну синхронізацію фізичного та віртуального об'єктів у реальному часі показано переважно на концептуальному рівні. Варто було б навести конкретний протокол оновлення стану, періодичність обміну та приклади керувальних впливів із цифрового середовища.

3. Положення наукової новизни «вперше» та «удосконалено» сформульовані переконливо за змістом, але їм бракує стислого формалізованого порівняння з найближчими аналогами за єдиною системою ознак. Така таблиця дала б змогу чіткіше відокремити авторський внесок від відомих рішень.

4. Для оптимізаційних моделей доцільно було б докладніше описати алгоритми розв'язання, використані програмні засоби або солвери, критерії зупинки, обчислювальну складність і масштабованість. Твердження про досягнення оптимального або наближено оптимального рішення внаслідок взаємодії агентів потребує кількісного порівняння з централізованими MILP/VRPTW-підходами чи відомими евристиками.

5. У підрозділах з машинного навчання недостатньо повно наведено походження, обсяг, період формування та репрезентативність наборів даних. Для відтворюваності результатів бажано подати гіперпараметри моделей, спосіб їх добору, випадкові зерна, кількість повторних запусків, результати крос-валідації та довірчі інтервали метрик.

6. Для прогнозування затримок ознака `traffic_delay_estimate_min` має найсильніший зв'язок із цільовою змінною `is_delayed`. Слід чітко обґрунтувати, що ця оцінка формується до моменту прогнозу і не містить інформації про фактичний результат рейсу; інакше можливе приховане витікання цільової інформації та завищення якості класифікації.

7. LSTM та гібридна модель навчалися на «псевдопослідовних» даних, сформованих дублюванням або агрегуванням сенсорних векторів у часові вікна. Такий спосіб обмежує доказовість висновку про переваги рекурентних архітектур для аналізу часової динаміки. Доцільніше було б використати справжні синхронізовані часові ряди телеметрії та порівняти їх із моделями на агрегованих ознаках.

8. Верифікація імітаційної моделі ґрунтується на експертно заданих даних, логічній перевірці та зіставленні з розрахунковим економічним прикладом. Для посилення достовірності варто було б навести формальну процедуру калібрування за фактичними даними підприємств, кількість імітаційних прогонів, довжину перехідного періоду, довірчі інтервали та статистичні критерії відповідності розподілів.

9. У тексті сценаріїв ризику та у підсумковій таблиці 4.2 наведено різні кількості подій: для логістичних ризиків — 89 у тексті та 108 у таблиці, для виробничих — 50 і 71, для постачання — 14 і 24, для будівельного майданчика — 137 і 155. Необхідно пояснити, чи йдеться про різні прогони, середні значення або редакційну помилку, та уніфікувати результати.

10. У вступі та додатку зазначено впровадження у ТОВ «Еталон» і Autostrada, тоді як у підрозділі 4.4.2 йдеться про «Автомагістраль-Південь» і Autostrada. Перелік баз апробації та відповідні кількісні показники мають бути узгоджені з актами впровадження.

11. Кількісні показники «до» і «після» впровадження є важливими, проте в роботі доцільно було б детальніше навести тривалість спостереження, кількість рейсів і замовлень, характеристики порівнюваних об'єктів, метод нормування зовнішніх факторів та внесок окремих компонентів технології у загальний ефект.

12. Архітектуру інформаційної технології подано на достатньому концептуальному рівні, однак питання кібербезпеки, автентифікації IoT-пристроїв, захисту технологічних даних, відмовостійкості, затримок обміну та масштабування до регіональної мережі заводів висвітлено стисло. Ці аспекти є важливими для промислового впровадження цифрового двійника.

13. У роботі наявні окремі термінологічні та редакційні неузгодженості: у завданні дослідження згадується впровадження в практику управління асфальтобетонних підприємств, хоча предметом є виробництво готового бетону;

порушено нумерацію підрозділів 3.3 і 3.3.1–3.3.3; двічі використано номер 4.4 та номер 7 у висновках розділу 4; у пункті 5 висновків до розділу 4 пропущено числове значення коефіцієнта детермінації. Текст потребує додаткового літературного і технічного редагування.

14. Доцільно чіткіше зіставити кожне положення наукової новизни з конкретною публікацією та результатом експериментальної перевірки. Частина публікацій щодо гібридного управління проєктами та асфальтобетонних заводів має опосередкований зв'язок із центральною тематикою цифрових двійників виробництва і логістики готового бетону.

Наведені зауваження мають переважно уточнювальний, методичний та редакційний характер, визначають перспективи подальшого розвитку дослідження і не знижують загальної позитивної оцінки дисертаційної роботи.

Висновок

Дисертаційна робота Бугаєвського Михайла Сергійовича «Моделі та інформаційна технологія цифрових двійників у виробництві та логістиці бетону» є завершеним, самостійним і цілісним науковим дослідженням, у якому розв'язано актуальне науково-прикладне завдання розроблення моделей та інформаційної технології цифрового двійника для підвищення ефективності планування і управління виробництвом та логістикою готового бетону.

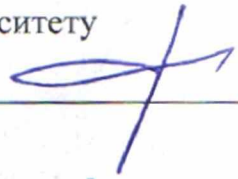
Робота містить науково обґрунтовані результати, що мають новизну, теоретичне і практичне значення. Поставлену мету досягнуто, завдання дослідження в основному виконано, результати достатньо повно опубліковано та апробовано, а їх практичне використання підтверджено відповідними актами.

За актуальністю, змістом, обсягом, рівнем наукової новизни, обґрунтованістю основних положень, достовірністю результатів, практичною

значимістю та повнотою публікацій дисертаційна робота відповідає вимогам Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44, а також Вимогам до оформлення дисертації, затвердженим наказом Міністерства освіти і науки України від 12 січня 2017 р. № 40.

Бугаєвський Михайло Сергійович заслуговує на присудження ступеня доктора філософії з галузі знань 12 «Інформаційні технології» за спеціальністю 122 «Комп'ютерні науки».

Доктор технічних наук, професор,
в.о. завідувача кафедри комп'ютерних наук
та інформаційних технологій
Національного аерокосмічного університету

«Харківський авіаційний інститут»  Олег ФЕДОРОВИЧ

Підпис доктора технічних наук, професора, в.о. завідувача кафедри комп'ютерних наук та інформаційних технологій Національного аерокосмічного університету «Харківський авіаційний інститут» Олега ФЕДОРОВИЧА засвідчую.

Проректор з НПР

Національного аерокосмічного університету

«Харківський авіаційний інститут»  Андрій Гуменний

« 17 » липня 2026 р.

