

РЕЦЕНЗІЯ

офіційного рецензента на дисертаційну роботу

Здобувача: Бугаєвського Михайла Сергійовича

Тема дисертації: «Моделі та інформаційна технологія цифрових двійників у виробництві та логістиці бетону»

Подана на здобуття ступеня: доктора філософії (PhD)

Галузь знань: 12 «Інформаційні технології»

Спеціальність: 122 «Комп'ютерні науки»

1. Актуальність теми дослідження

Сучасний етап цифрової трансформації промислових підприємств характеризується активним упровадженням цифрових двійників, промислового Інтернету речей, засобів імітаційного моделювання, оптимізації та машинного навчання. Особливої ваги ці технології набувають для виробничо-логістичних систем, у яких якість управлінських рішень залежить від оперативності оброблення різномірних даних, узгодженості виробничих і транспортних процесів, урахування часових обмежень та ризиків.

Актуальність дисертації М. С. Бугаєвського посилюється необхідністю відновлення житлової, дорожньої та промислової інфраструктури України, що обумовлює зростання попиту на бетонні суміші та потребу у підвищенні продуктивності бетонних заводів без погіршення якості продукції. Специфіка товарного бетону, обмежений час його транспортування, залежність від дорожньої ситуації, виробничих потужностей і стану будівельних майданчиків зумовлюють необхідність комплексного інформаційного супроводу процесів виробництва та доставки.

Тема роботи є актуальною та відповідає сучасним напрямкам розвитку комп'ютерних наук, оскільки спрямована на розроблення моделей та

інформаційної технології цифрового двійника, що інтегрує виробничі, логістичні, економічні й ризикові параметри для підтримки прийняття рішень у реальному часі. Дослідження виконано в межах науково-дослідних робіт за проєктами 0124U004234 (2024–2025 рр.) та 0123U104417 (2023–2024 рр.), що підтверджує його зв'язок із науковими планами Харківського національного автомобільно-дорожнього університету.

2. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій

Наукові положення, висновки та рекомендації дисертації є достатньо обґрунтованими. Автором опрацьовано 151 наукове джерело, проведено системний аналіз сучасних підходів до організації виробництва й логістики товарного бетону, цифрових двійників, агентного моделювання, оптимізації, штучного інтелекту та машинного навчання. Сформульовані мета, об'єкт, предмет і завдання дослідження логічно пов'язані між собою та відповідають змісту чотирьох розділів роботи.

Методологічну основу становлять методи системного аналізу, теорії прийняття рішень, математичної оптимізації, мультиагентного імітаційного моделювання, статистичного аналізу та машинного навчання. Обґрунтованість одержаних результатів забезпечується формальними постановками задач планування й оптимізації, структурним описом агентів бетонного заводу, автобетонозмішувача та будівельного майданчика, проведенням сценарних експериментів, оцінюванням ризикостійкості й використанням системи технічних та економічних KPI.

Достовірність результатів підтверджується узгодженістю теоретичних положень із результатами імітаційних і машинно-навчальних експериментів, застосуванням метрик Accuracy, Precision, Recall, F-score, AUC, MAE, RMSE та коефіцієнта детермінації, а також практичною апробацією розробок. Висновки за

розділами й загальні висновки відповідають поставленим завданням та відображають основні результати дослідження.

3. Наукова новизна одержаних результатів

Наукова новизна дисертаційної роботи полягає у комплексному поєднанні засобів системного подання, оптимізації, мультиагентного моделювання та предиктивної аналітики в межах інформаційної технології цифрового двійника виробничо-логістичної системи бетонного підприємства. До основних наукових результатів належать:

- вперше розроблена імітаційна модель аналізу процесів виробництва та логістики готових бетонних сумішей, яка інтегрує технологічні й економічні показники у динамічну мультиагентну модель з оптимізаційними механізмами та дає змогу оцінювати ефективність організації виробництва і доставки, виявляти вузькі місця та прогнозувати показники діяльності підприємства;

- удосконалена модель планування та оптимізації логістичного ланцюга постачання готового бетону шляхом урахування попиту, маршрутів доставки, часових обмежень і виробничих потужностей;

- удосконалена модель оптимізації інфраструктури виробничо-розподільчої мережі, орієнтована на пошук раціонального співвідношення між експлуатаційними й транспортними витратами, інвестиціями та прибутковістю;

- подальшого розвитку набули моделі машинного навчання для аналізу ефективності логістики та якості готового бетону в реальному часі, які враховують дані систем управління замовленнями, IoT-платформ бетонних заводів і автобетонозмішувачів, а також систем маршрутизації.

Сукупність зазначених результатів формує цілісну науково-методичну основу для створення інформаційних систем підтримки рішень у виробництві й

логістиці товарного бетону та відповідає предметній області спеціальності 122 «Комп'ютерні науки».

4. Практичне значення одержаних результатів

Практична цінність роботи полягає у доведенні розроблених моделей до рівня інформаційної технології цифрового двійника для планування й управління виробництвом та логістикою бетонних підприємств. Запропоновані рішення можуть використовуватися менеджерами, диспетчерами, технологами й інженерами для прогнозування тривалості операцій, планування виробничого навантаження, вибору маршрутів доставки, оцінювання ризиків, контролю якості бетонної суміші та обґрунтування проєктів розвитку виробничо-розподільчої мережі.

У роботі наведено результати порівняння показників до та після застосування інформаційної технології, зокрема скорочення середнього часу доставки, підвищення частки своєчасних доставок, зменшення втрат міцності й собівартості та покращення використання транспортних засобів. Практичне значення підтверджене актами впровадження у діяльність ТОВ «Еталон», компанії Autostrada та в освітній процес Харківського національного автомобільно-дорожнього університету.

5. Повнота викладення результатів у наукових працях

Основні положення та результати дисертації достатньо повно відображені у наукових публікаціях здобувача. За темою роботи опубліковано 17 наукових праць, серед яких 5 статей у наукових фахових виданнях України, у тому числі 2 статті у виданні, що індексується міжнародною наукометричною базою Scopus і

належить до квартиля Q2, 1 розділ колективної монографії та 11 публікацій у матеріалах наукових конференцій.

Тематика публікацій охоплює імітаційне моделювання виробництва та логістики бетонних заводів, планування й оптимізацію ланцюгів постачання, багаторівневе управління, машинне навчання, цифрові двійники та управління проектами розвитку виробництва. Особистий внесок здобувача у спільні публікації конкретизовано. Результати апробовано на міжнародних і всеукраїнських науково-практичних конференціях у 2022–2026 роках.

6. Зауваження та побажання до дисертаційної роботи

Позитивно оцінюючи дисертаційну роботу в цілому, слід зазначити окремі дискусійні положення та побажання:

1. Формалізація цифрового двійника. У роботі наведено концепцію, рівні й компоненти цифрового двійника, проте доцільно було б чіткіше визначити формальний цикл двосторонньої синхронізації фізичного та віртуального об'єктів: склад повідомлень, частоту оновлення, критерій актуальності цифрового стану та процедуру підтвердження виконання керувальних команд.

2. Модель і семантика даних. В інформаційному рівні описано джерела даних, бази, API-шлюзи та брокери повідомлень, а в таблицях 2.2–2.8 наведено набори ознак. Водночас робота виграла б від подання узагальненої концептуальної або онтологічної моделі даних із визначенням сутностей «замовлення», «партія», «рейс», «рецептура», «автобетонозмішувач» та правил їх ідентифікації й версіонування.

3. Відтворюваність експериментів машинного навчання. У підрозділі 2.6 наведено структури ознак і значення метрик, однак недостатньо детально, з моєї точки зору, розкрито обсяг та походження вибірок, період накопичення даних, баланс класів, повний набір гіперпараметрів, процедури крос-валідації та довірчі інтервали. Подання цих відомостей підвищило б можливість незалежного відтворення результатів.

4. Інформаційна та кіберфізична безпека. Архітектура передбачає інтеграцію IoT, PLC, SCADA, MES, ERP та хмарних сервісів за протоколами MQTT, OPC UA, REST API і WebSocket. Доцільно було б доповнити роботу описом автентифікації пристроїв і користувачів, захисту каналів, журналювання команд, резервування брокерів і сховищ та режимів роботи за втрати зв'язку.

Висловлені зауваження мають переважно рекомендаційний і дискусійний характер, не знижують загальної наукової цінності дисертації та не впливають на достовірність її основних результатів.

7. Висновок

Дисертаційна робота Бугаєвського Михайла Сергійовича на тему «Моделі та інформаційна технологія цифрових двійників у виробництві та логістиці бетону» є завершеною, самостійною науковою працею, у якій отримано нові науково обґрунтовані результати та розв'язано актуальне науково-прикладне завдання розроблення моделей і інформаційної технології цифрових двійників для планування та управління виробництвом і логістикою бетонних підприємств в умовах змінних вимог, обмежень і ризиків.

За актуальністю, науковою новизною, обґрунтованістю положень, достовірністю результатів, практичним значенням, повнотою опублікування та оформленням дисертація відповідає вимогам «Порядку підготовки здобувачів вищої освіти ступеня доктора філософії та доктора наук у закладах вищої освіти (наукових установах)», а її автор заслуговує на присудження ступеня доктора філософії (PhD) за спеціальністю 122 «Комп'ютерні науки».

Офіційний рецензент,
кандидатка технічних наук, доцентка,
завідувачка кафедри комп'ютерних
наук і інформаційних систем ХНАДУ

«22» липень 2026 р.


Ганна ПЛЕХОВА