

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

Ефективність сучасних виробничих систем визначається не лише продуктивністю технологічного обладнання, а й здатністю системи управління своєчасно враховувати стан ресурсів, транспортні обмеження, випадкові збурення та зміну попиту. Для бетонних підприємств ця проблема є особливо складною, оскільки процеси приготування, завантаження, транспортування та укладання суміші утворюють єдиний часово критичний цикл, порушення якого спричиняє простої, перевитрати ресурсів і погіршення якості продукції.

Використання цифрових двійників у поєднанні з мультиагентним моделюванням, оптимізацією та методами машинного навчання створює можливість досліджувати режими функціонування підприємства до реалізації управлінського рішення, прогнозувати наслідки ризикових подій і коригувати плани виробництва та доставки. У контексті відновлення транспортної, житлової та промислової інфраструктури України розв'язання таких завдань має вагомое державне й галузеве значення.

Отже, тема дисертаційної роботи М. С. Бугаєвського, спрямована на підвищення ефективності планування й управління виробництвом та логістикою бетону шляхом створення комплексу моделей та інформаційної технології

цифрового двійника, є актуальною, своєчасною й такою, що відповідає проблематиці спеціальності 122 «Комп'ютерні науки». Робота пов'язана з науково-дослідними проєктами 0124U004234 та 0123U104417, які виконувалися на кафедрі автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій ХНАДУ.

2. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій

Логіка дослідження побудована послідовно: від аналізу виробничих і логістичних проблем та сучасних цифрових технологій — до системного подання предметної області, математичних моделей планування, структури цифрового двійника, агентної імітаційної моделі, ризикових сценаріїв і практичного застосування. Вибір мультиагентного підходу є обґрунтованим автономністю та взаємозалежністю основних елементів системи: бетонних заводів, транспортних засобів, постачальників і будівельних майданчиків.

Математичні моделі містять цільові функції та обмеження, що враховують попит, виробничі потужності, часові вікна, транспортні витрати, інвестиційні рішення й прибутковість. Імітаційна модель доповнена економічним рівнем та механізмами відтворення виробничих, логістичних, постачальницьких і майданчикових ризиків. Для оцінювання стійкості запропоновано систему KPI та інтегральний індекс, а для контролю логістики й якості бетону досліджено ансамблеві, нейронні та рекурентні моделі машинного навчання.

Обґрунтованість рекомендацій підтверджена серією модельних експериментів, аналізом чутливості, дослідженням окремих і комбінованих сценаріїв ризику, порівнянням техніко-економічних показників та результатами апробації на підприємствах. Загальні висновки відповідають меті та завданням дослідження, а кількісні результати не суперечать представленим моделям і сценаріям.

3. Наукова новизна одержаних результатів

Наукові результати дисертації характеризуються системністю та орієнтацією на спільне дослідження виробничої, транспортної, економічної та ризикової складових. Найбільш суттєвими результатами є:

- нова мультиагентна імітаційна модель виробництва й логістики готового бетону, у якій взаємодія агентів поєднується з економічними показниками, оптимізаційними механізмами та оцінюванням ризиків;
- удосконалена модель планування логістичного ланцюга, що забезпечує погодження замовлень, потужностей бетонних заводів, часових обмежень і маршрутів руху автобетонозмішувачів;
- удосконалена модель розвитку виробничо-розподільчої мережі, яка дає змогу оцінювати доцільність модернізації, відкриття або використання виробничих потужностей за критеріями витрат і прибутковості;
- розвинені моделі машинного навчання для прогнозування затримок, оцінювання придатності бетонної суміші під час транспортування та контролю якості на основі IoT-даних.

Новизна зазначених результатів полягає не лише в застосуванні відомих методів до конкретної галузі, а у формуванні узгодженого контуру планування, моделювання, прогнозування та оцінювання, який може функціонувати як аналітичне ядро цифрового двійника бетонного підприємства.

4. Практичне значення одержаних результатів

Результати роботи доведено до прикладного рівня у вигляді інформаційної технології, яка передбачає інтеграцію із системами ERP, CRM, WMS, TMS, MES, SCADA, GIS і промисловими IoT-платформами. Це створює передумови для

використання моделі не лише як дослідницького засобу, а й як інструменту оперативного й перспективного планування.

Запропонований цифровий двійник дає змогу моделювати завантаження бетонних заводів, розподіл автопарку, рух транспортних засобів, очікування на майданчиках, ризики постачання та деградацію якості суміші. Одержані результати можуть бути використані під час модернізації підприємств, планування нових виробничих майданчиків і забезпечення великих інфраструктурних проєктів. Практична значущість підтверджена актами впровадження в ТОВ «Еталон», компанії Autostrada та освітньому процесі ХНАДУ.

5. Повнота викладення результатів у наукових працях

Результати дисертації пройшли належну апробацію та достатньо повно висвітлені у публікаціях. Загальний доробок за темою становить 17 праць: 5 статей у фахових наукових виданнях України, з яких 2 опубліковано у виданні, індексованому Scopus (Q2), 1 розділ колективної монографії та 11 тез і матеріалів конференцій. Публікації відображають ключові етапи роботи — від формування концепції цифрового двійника і багаторівневого планування до імітаційної моделі, оптимізації та машинного навчання.

Основні результати доповідалися на міжнародних та всеукраїнських конференціях у Харкові, Києві, Дніпрі, Токіо й Амстердамі. Задекларований особистий внесок здобувача у спільні праці відповідає змісту дисертації та охоплює постановку задач, розроблення моделей, проведення експериментів і формування інформаційної технології.

6. Зауваження та побажання до дисертаційної роботи

Водночас окремі положення роботи можуть бути предметом подальшого обговорення та розвитку:

1. Метрологічне забезпечення IoT-рівня. У роботі наведено склад датчиків і параметри, що використовуються для контролю технологічного процесу. Доцільно було б окремо розглянути похибки, калібрування, діагностику несправності та часову синхронізацію сенсорів, оскільки достовірність стану цифрового двійника безпосередньо залежить від якості первинних вимірювань.

2. Алгоритми оптимізації. У роботі формально задано цільові функції та обмеження, однак не наведено повного алгоритму чисельного розв'язання, критерію завершення, оцінки обчислювальної складності й порівняння з відомими MILP/VRPTW-методами або евристичними алгоритмами. Це ускладнює оцінювання масштабованості запропонованих рішень.

3. Статистична адекватність імітаційної моделі. У розділі 4 здійснено логічну перевірку та зіставлення з економічним розрахунком, але для повнішого підтвердження адекватності варто було б навести кількість прогонів, тривалість перехідного періоду, довірчі інтервали, статистичне порівняння модельних і фактичних розподілів часу операцій.

4. Обґрунтування інтегрального показника ризикостійкості. У формулах (3.9) і (3.14) використано вагові коефіцієнти, що визначаються експертно. Бажано було б описати склад експертної групи, метод узгодження оцінок та аналіз чутливості індексу до зміни ваг, оскільки від цього залежить ранжування ризикових сценаріїв.

5. Порівняння результатів упровадження. У таблиці 4.4 наведено переконливу позитивну динаміку показників, однак не зазначено тривалість базового та експериментального періодів, кількість рейсів, сезонні умови й статистичну значущість відмінностей. Подання цих відомостей посилює доказовість практичного ефекту.

6. Межі автоматичного управління. У роботі передбачено рекомендації операторам, автоматичне перепланування маршрутів і можливість коригування рецептури. Доцільно було б чіткіше розмежувати дорадчий та автоматичний режими, визначити умови блокування небезпечної команди, процедуру ручного підтвердження та безпечний стан системи за відмови зв'язку або датчиків.

Наведені зауваження визначають перспективні напрями розвитку дослідження, не спростовують основних наукових положень і не впливають на загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи.

7. Висновок

Дисертація Бугаєвського Михайла Сергійовича «Моделі та інформаційна технологія цифрових двійників у виробництві та логістиці бетону» є цілісною завершеною кваліфікаційною науковою працею, що містить теоретично обґрунтовані та практично значущі результати у сфері моделювання, оптимізації й інформаційного забезпечення виробничо-логістичних систем.

Робота за актуальністю, науковою новизною, обсягом виконаних досліджень, достовірністю, практичним значенням і повнотою опублікування результатів відповідає вимогам «Порядку підготовки здобувачів вищої освіти ступеня доктора філософії та доктора наук у закладах вищої освіти (наукових установах)». Бугаєвський Михайло Сергійович заслуговує на присудження ступеня доктора філософії (PhD) за спеціальністю 122 «Комп'ютерні науки».

Офіційний рецензент,
кандидатка технічних наук, доцентка
кафедри автоматизації та комп'ютерно-
інтегрованих технологій ХНАДУ

«22» листопада 2026 р.


Тетяна ПЛУГІНА

