

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БУДІВНИЦТВА І
АРХІТЕКТУРИ

ДРУЖИНІН МАКСИМ АНДРІЙОВИЧ



УДК 624.041:69.055]-048.34:004.946](477)(043.3)

**СИСТЕМА ФУНКЦІОНАЛЬНО-ЦИФРОВОГО СУПРОВОДУ
ОРГАНІЗАЦІЇ ЗБІРНОГО БУДІВНИЦТВА**

Спеціальність 05.23.08 – технологія та організація промислового та
цивільного будівництва

РЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Київ – 2025

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Київському національному університеті будівництва і архітектури (м Київ) Міністерства освіти і науки України.

Науковий консультант: заслужений працівник освіти України,
доктор технічних наук, професор
Чернишев Денис Олегович,
професор кафедри водопостачання та
водовідведення Київського національного
університету будівництва і архітектури,

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Арутюнян Ірина Андріївна,
завідувач кафедри промислового та цивільного
будівництва Інженерного навчально-наукового
інституту ім. Ю. М. Потебні Запорізького
національного університету;

доктор технічних наук, професор
Шумаков Ігор Валентинович,
завідувач кафедри технології та організації
будівельного виробництва Навчально-наукового
інституту будівництва та цивільної інженерії
Харківського національного університету
міського господарства імені О.М. Бекетова;

доктор технічних наук, професор
Доненко Василь Іванович,
професор кафедри будівництва, урбаністики та
просторового планування Східноукраїнський
національний університет імені Володимира
Даля

Захист відбудеться «15» травня 2025 року о 12.00 год. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.056.03 у Київському національному університеті будівництва і архітектури за адресою: 03037, м. Київ, пр. Повітряних Сил, 31, ауд. 204.

Із дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Київського національного університету будівництва і архітектури за адресою: 03037, м. Київ, пр. Повітряних Сил, 31.

Реферат розіслано «14» квітня 2025 року.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 26.056.03
канд. техн. наук, доцент



Максим КЛІС

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Нагальність дослідження зумовлена необхідністю підвищення ефективності організації збірного будівництва через впровадження сучасних цифрових технологій. Дослідження є особливо актуальним у контексті воєнного та повоєнного відновлення України, де збірне будівництво відіграє ключову роль у швидкому створенні житла та інфраструктури. Дослідження відповідає на потребу розширення наукових уявлень про трансформацію організації управління ланцюгами постачання у збірному будівництві, інтегруючи цифрові технології та моделі нечіткої логіки, що сприяє формуванню нового теоретико-методичного базису організації постачання з урахуванням специфіки галузі. Назріла потреба визначити нові принципи та запропонувати оновлений організаційно-технологічний формат функціонально-цифрового супроводу будівельних проєктів збірного будівництва. Така система супроводу зазначених проєктів забезпечить їх належну адаптацію до сучасних вимог девелоперського управління, мінімізацію ризиків та невизначеності в організації постачання та спорудження об'єктів збірного будівництва. Практичні передумови роботи визначаються потребами у підвищенні функціональності, технологічності та результативності девелоперських проєктів, скороченні витрат і термінів реалізації, а також забезпеченні стійкості постачання в умовах сучасних викликів, особливо в процесах воєнного та повоєнного відновлення. Впровадження цифрових технологій та методичних основ сприятиме розвитку автоматизованих платформ управління будівельними процесами, що дозволить оптимізувати логістику, контролювати ресурси та оперативно реагувати на зміни зовнішнього середовища. Отримані результати можуть бути використані у практиці будівельних підприємств для реалізації державних і комерційних проєктів відновлення житлової забудови, що робить дослідження надзвичайно актуальним.

Аналіз праць науковців та практиків з організації будівництва, будівельного девелопменту та їх цифрового оновлення, таких як І.А. Арутюнян, Н.С. Бушуєва, Т.А. Гончаренко, П.Є. Григоровський, В.І. Доненко, А.Д. Єсипенко, М.Г. Лихогруд, В.О. Поколенко, Т.А. Кравчуновська, А.В. Радкевич, Г.М. Тонкачєєв, О.О. Терентьєв, В.І. Торкатюк, О.А. Тугай, Д.О. Чернишев, І.В. Шумаков, Л.М. Шутенко засвідчив наступне: для продуктивного формалізованого опису та успішної розбудови системи постачання як складової проєктів збірного будівництва назрілим є вирішення низки наукових та прикладних проблем – доцільно розробити принципово нову та діджитал-адаптовану систему адміністрування процесами постачання у проєктах формату «збірне будівництво». Ця система має включати теоретико-методичний базис, модернізований набір організаційно-технологічних та цифрових інструментів; система має спиратись на синергію сполучення платформи будівельного девелопменту, BIM-технологій, нечіткої логіки, прогнозової аналітики, мережевого моделювання та оптимізаційних алгоритмів, що сприяє підвищенню ефективності будівельного девелопменту.

Отже, нагальність вирішення назрілих проблем дає підстави вважати, що обрана тема дослідження є *актуальною* для науково-обґрунтованого вирішення зазначеного кола наукових проблем щодо формування системи функціонально-цифрового супроводу процесів організації збірного будівництва як запоруки зростання функціональності процесів організації постачання та надійності середовища девелопменту для проєктів зазначеного типу.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Розробки автора є складовими науково-дослідних та науково-пошукових тем, які виконувались в КНУБА та Академії будівництва України. Зокрема, у межах теми «Розбудова сучасного аналітичного інструментарію девелоперського управління підрядним будівництвом» (№0115U000860) використано авторську аналітико-прикладну систему для оцінки успішності постачання в проєктах збірного будівництва із застосуванням цифрових інструментів та Fuzzy Logic. У дослідженні «Розвиток управлінської взаємодії інституційних учасників девелоперських проєктів» (№0121U111793) обґрунтовано впровадження BIM-моделювання для цифрового простору девелоперських проєктів. У межах теми «Вдосконалення аналітичного апарату обґрунтування формату девелопменту для проєктів будівництва» (№W4-14-b, Академія будівництва України) застосовано авторську розробку щодо цифрового адміністрування партнерських відносин у будівництві за допомогою мережевого аналізу. Зміст та спрямування досліджень, висвітлених в роботі, відповідають цільовому спрямуванню нормативно-правових вимог, які накреслені: Законом України «Про регулювання містобудівної діяльності» (17.02.2011 № 3038-VI, із змінами, в поточній редакції) та «Концепцією впровадження технологій будівельного інформаційного моделювання (BIM-технологій) в Україні», схвалену розпорядженням Кабінету Міністрів України від 17 лютого 2021 р. № 152-р.

Метою роботи є розв'язання теоретико-методичної та науково-прикладної проблеми, пов'язаної із формуванням системи функціонально-цифрового супроводу організації збірного будівництва. Система у вигляді науково-теоретичних засад та прикладного інструментарію реалізує своє призначення як сучасний діджитал-адаптований простір прийняття організаційно-технологічних рішень для проєктів зазначеного типу, на ґрунті синтезу цифрових, організаційних та управлінських технологій.

Для досягнення поставленої в роботі мети визначено наступний перелік **завдань дослідження**:

1. Опрацювати зміст категоріально-понятійного апарату в контексті змісту дослідження, систематизувати наукові передумови формування системи супроводу процесів постачання як запоруки поліпшення функціональності в організації циклу проєктів збірного будівництва (далі використовується аббревіатура – ПЗБ).

2. Упорядкування компонент методичного базису, пошук формату цифрових рішень для наступної інтеграції управлінських і логістичних процесів в організації складу ПЗБ.

3. Опрацювати передовий вітчизняний та зарубіжний досвід інтеграції організаційно-технологічних підходів та цифрових технологій для раціоналізації системи організації та цифрового простору прийняття рішень в проєктах досліджуваного типу.

4. Пошук загально-методичних та спеціальних підходів для цільового поліпшення якості комунікацій між організаціями-виконавцями в ПЗБ.

5. Відбір та адаптація аналітичних компонентів для формалізованого моделювання індикаторів успішності організації постачання з використанням цифрових інструментів та оновленого формату мережевої моделі.

6. Формування аналітичних систем вияву продуктивності процесів постачання та управління ресурсами в ПЗБ.

7. Розробка прикладного інструментарію організації постачання в ПЗБ на ґрунті цифрових технологій.

8. Спрямування компонент прикладного інструментарію на візуалізацію стану дотримання директивних вимог в організації ПЗБ, на формування дієвих партнерських відносин та успішних комунікацій у досліджуваних будівельних проєктах.

9. Трансформація змісту науково-теоретичних та аналітичних результатів дослідження в комплекс прикладних програм, його імплементація в практику супроводу підготовки та організації ПЗБ.

10. Формування організаційно-технологічного, індикативно-цифрового простору вияву функціональної стійкості середовища та продуктивності організації циклу в умовах певного ПЗБ.

11. Визначення вектору подальшого розвитку дослідження в науково-теоретичному та прикладному аспектах.

Об'єкт дослідження – процеси формування системи функціонально-цифрового супроводу організації збірного будівництва.

Предмет дослідження – теоретико-методичні основи та науково-прикладні моделі організації системи функціонально-цифрового супроводу в ПЗБ.

Методи дослідження. Загально-методичний базис роботи формувався як синергійне сполучення універсальних та спеціальних методів і моделей прийняття рішень. До складу першої групи увійшли системний, процесний підходи, мережевий аналіз, метод структуризації ієрархій, разом із методичними платформами: будівельного девелопменту, smart-управління, IPD (інтегрована реалізація проєктів), теорія «зацікавлених сторін» (стейкхолдерів). Цільову спрямованість методичного базису забезпечило поєднання наступних компонент: методи оновлення графо-аналітичного конструктиву та критеріально-параметричної основи мережевих моделей будівництва; BIM-моделювання; прикладні пакети імітаційно-стохастичного, мережевого та кластерного аналізу; нечітка логіка та Fuzzy-технології. Застосування зазначених методів дослідження було здійснено коректно, з урахуванням міждисциплінарного підходу та використанням BIM-технології як основи для розробки системи формалізованого моделювання та функціонально-цифрового

супроводу. Це забезпечило обґрунтування, локалізоване виокремлення та подальшу агрегацію рішень у проектах організації будівництва для ПЗБ.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у науковому обґрунтуванні теоретико-методичних засад та інструментарію як складових системи функціонально-цифрового супроводу організації збірного будівництва. Розроблена система супроводу ПЗБ поєднує міждисциплінарний підхід, що базується на BIM-моделюванні, методі скінченних елементів, сучасних цифрових та аналітичних інструментах. Вона включає мережеву модель представлення «елементів-робіт», модель оцінки та прогнозування «стійкості постачання в проектах збірного будівництва» із застосуванням нечіткої логіки та машинного навчання, алгоритми кластеризації для ідентифікації спільнот у ланцюзі постачання та інструменти аналізу мереж для оптимізації взаємодії учасників. Принципова новизна підходу – поєднання цифрових технологій, мережевого моделювання та нечіткої логіки аналізу для комплексної оптимізації ПЗБ, що підвищує адаптивність, стійкість та ефективність управління ланцюгом постачання.

Складовими наукової новизни дисертаційної роботи є наступні результати.

Уперше обґрунтовано:

✓ теоретичний концепт функціонального супроводу будівельних ПЗБ із використанням цифрових технологій. Концепт спирається на думку про нагальність та обов'язковість інтегрованого девелоперського управління всіма етапами життєвого циклу будівельного об'єкта. Концепт базується на застосуванні сучасних цифрових технологій, моделей і методів для підвищення ефективності управління ланцюгом постачання, що включає планування, координацію та контроль усіх процесів – від проектування і виробництва збірних конструкцій до їх транспортування, монтажу та експлуатації. В основі концепту лежить цифровізація управлінських рішень, що реалізується через використання таких технологій, як BIM-моделювання, системи прогнозу аналітики на основі машинного навчання, алгоритми кластеризації для ідентифікації ключових учасників ланцюга постачання та розроблену автором *класифікацію проривних цифрових технологій* та процесів, які можуть застосовуватися протягом життєвого циклу об'єкта будівництва, що дозволяє систематизувати інноваційні підходи до організації збірного будівництва та інтегрувати їх у єдину цифрову екосистему;

✓ загально-методичний базис опису, моделювання та оптимізації проєктів організації збірного будівництва, що ґрунтується на міждисциплінарному підході. Базис поєднує будівельний девелопмент, BIM – та імітаційне моделювання, соціальний аналіз мереж, управління ланцюгами постачання та відносинами з клієнтами. Додатково використано системний, процесний та ситуаційний підходи, реінжиніринг управлінських структур і графоаналітичні методи. Ключову роль відіграє застосування BIM як цифрового фундаменту для створення комплексної організаційно-технологічної моделі проєктів збірного будівництва;

✓ *аналітико-прикладний інструментарій для оптимізації управління постачанням у збірному будівництві*. Інструментарій включає: моделі оптимізації мережі постачання; аналітичні компоненти моделювання індикаторів успішності організації постачання з використанням Fuzzy Logic; методи мережевого аналізу для моделювання партнерських відносин і комунікацій; аналітичні модулі оцінки впливу інтелектуальних систем на постачання та управління ресурсами. Зміст інструментарію трансформовано у комплекс прикладних програм для цифрової оптимізації збірного будівництва.

Удосконалено:

✓ *науково-методичний підхід до застосування BIM-технологій для формалізації будівельного проєкту та його девелоперського супроводу*. BIM використано як основу для створення цифрової моделі девелоперського проєкту «збірне будівництво», що охоплює всі етапи життєвого циклу об'єкта. Ці технології інтегрують девелоперів, архітекторів, виробників, логістів та будівельників у єдине цифрове середовище, дозволяючи оцінювати показники ефективності, виявляти критичні вузли та оптимізувати логістику;

✓ *методичні підходи до застосування нечіткої логіки у ПЗБ* – шляхом розробки інтегрованих моделей, що враховують невизначеність та адаптивність взаємодій у ланцюзі постачання. Запропоновані підходи оцінки «стійкості ланки» гнучко адаптуються до змінних умов, підвищуючи ефективність логістики. Алгоритми кластеризації оптимізують розподіл ресурсів та координацію учасників, а аналіз мереж забезпечує стратегічну стійкість і управління ризиками. Використання машинного навчання в прогнозуванні покращує точність рішень і автоматизує аналітичні процеси, сприяючи підвищенню ефективності ланцюгів постачання;

✓ *науково-прикладні засади застосування інструментів штучного інтелекту в будівництві* – в даній роботі це удосконалення є частиною інтегрованої системи функціонально-цифрового супроводу організації збірного будівництва. Застосування штучного інтелекту дозволяє автоматизувати процеси управління, підвищити точність планування та мінімізувати невизначеності, що критично важливо для ефективної реалізації ПЗБ, особливо у контексті воєнного та повоєнного відновлення інфраструктури;

✓ *алгоритми машинного навчання для ідентифікації спільнот у мережі ланцюга постачання збірного будівництва*, що реалізовано через розробку гібридних моделей кластеризації, що поєднують методи глибокого навчання та графового аналізу. Це дозволяє враховувати динаміку зв'язків між учасниками, адаптуватися до змін у структурі мережі та підвищувати точність і швидкість виявлення ключових спільнот. Запропонований підхід забезпечує оптимізацію взаємодії постачальників, зниження логістичних ризиків та підвищення стійкості ланцюга постачання в умовах невизначеності;

✓ *дорожня карта цифровізації будівельної галузі України* – в роботі адаптована до змісту завдань проєктів «збірного будівництва» та враховує передові практики Великої Британії з урахуванням специфіки національного ринку. Вона включає інтеграцію BIM-технологій, стандартизацію даних,

розвиток цифрових платформ для управління ланцюгами постачання та застосування штучного інтелекту для прогнозування ризиків. Особливу увагу приділено поетапному впровадженню цифрових рішень, стимулюванню інвестицій у технології та створенню нормативно-правового середовища для підтримки цифрової трансформації галузі.

Набуло подальшого розвитку:

- *діджитал-адаптований підхід до організації збірного будівництва* та його застосування для відновлення житлового фонду та інфраструктури України є пріоритетним. У роботі обґрунтовано, що впровадження сучасних цифрових рішень у ці проєкти дозволяє підвищити ефективність управління та логістики, прискорити будівельні процеси, знизити витрати та оптимізувати ресурси. Це дає змогу швидко реагувати на виклики післявоєнного відновлення та забезпечити якісне відновлення об'єктів у короткі терміни;

- *зміст категорії «функціонально-цифровий супровід» для організації будівництва*. У контексті ПЗБ ця категорія означає інтегровану систему, що поєднує організаційно-функціональні методи та цифрові технології для координації всіх етапів реалізації проєкту. Такий підхід сприяє оптимізації системи постачання, зменшенню ризиків і адаптації до змінних умов будівництва;

- *теоретико-методичні принципи та специфіка застосування концепції ланцюга постачання в збірному будівництві* – особливу увагу зосереджено на адаптації концепції «ланцюга постачання» у збірному будівництві. Йдеться про розробку ефективних підходів до впровадження цифрових технологій в управління матеріальними потоками. Це дозволяє зменшити витрати, уникати затримок і покращити координацію між усіма учасниками процесу, що є критично важливим для таких проєктів;

- *аналітичні підходи до оцінки та оптимізації циклу будівництва* – у цьому контексті для умов ПЗБ пропонується використання цифрових моделей нового покоління, адаптованих під специфіку збірного будівництва. Вони дають змогу деталізувати процеси, гнучко коригувати параметри проєкту та відповідати запитам як замовників, так і місцевих громад.

Практичне значення одержаних результатів полягає в розробці інноваційної системи функціонально-цифрового супроводу, що сприяє підвищенню ефективності управління ланцюгами постачання у збірному будівництві. Використання аналітичних моделей на основі Fuzzy Logic, мережевого аналізу та штучного інтелекту дозволяє прогнозувати стійкість ланцюгів постачання, оптимізувати розподіл ресурсів і покращувати комунікацію між учасниками будівельних проєктів. Інтеграція BIM-технологій, автоматизованих цифрових рішень та інтелектуальних алгоритмів забезпечує адаптивність до невизначеності, зменшення ризиків і підвищення стійкості логістичних мереж. Запропонована система є ключовим інструментом для цифрової трансформації будівництва, що має критичне значення в умовах відновлення інфраструктури України. Практичне значення результатів дисертації підтверджена її впровадженням в практику підготовки, організації та

адміністрування ПЗБ, які готувались та впроваджувались Департаментами з питань будівництва та архітектури Вінницької (довідка від 31.10.2024 № 30-14/649) та Хмельницької (довідка від 18.12.2024 № 317/34-36-2975/2024) облдержадміністрацій, а також будівельними та девелоперськими компаніями ТОВ «Архітектурно-будівельні новації» (довідка від 03.12.2024 № 184) та БК «Альфа-сервіс» (довідка від 11.12.2024 № 338/1) – проєкт «Посад-Покровський – застосування префаб-рішень WBC для реалізації програми відбудови індивідуальних житлових будівель» та проєкт ЖК «ДіамандХіл»; Інститутом місцевого розвитку (довідка від 04.12.2024 № 338/1) проєкт «Створення цифрової BIM-моделі підготовки, організації та цифрового адміністрування проєктами збірного будівництва», міжнародний українсько-британський проєкт «Будівництво заводу із склофібробетону за участю компанії Power-SpraysLtd». Окремі компоненти дослідження були інтегровані в навчально-освітній процес Київського національного університету будівництва і архітектури для підготовки бакалаврів та магістрів за спеціальністю 192 «Будівництво та цивільна інженерія» (дисципліни «Організація і управління будівництвом» та «Спецкурс випускаючої кафедри»). Впровадження сучасних методів цифрового супроводу, BIM-технологій, інтелектуального аналізу ланцюгів постачання та оптимізації ресурсів дозволило студентам набути компетентностей, необхідних для роботи в умовах цифрової трансформації будівельної галузі.

Особистий внесок здобувача полягає в самостійному отриманні наукових і практичних результатів, представлених у дисертації. У співавторських працях використано лише ті ідеї, що є підсумком власних досліджень автора. Внесок у колективних роботах зазначено в переліку публікацій. Матеріали та висновки кандидатської дисертації в даній роботі не використовувалися.

Апробація змісту результатів та інновацій дослідження здійснена на 16 міжнародних науково-практичних конференціях, зазначених у списку [40-47].

Публікації. Основні науково-теоретичні, методичні та практичні результати дисертації опубліковано у 47 друкованих працях, з яких: 3 монографії (у співавторстві); 4 наукові статті у виданнях, що індексуються у науко-метричних базах Scopus та Web of Science Core Collection; 23 статті у спеціалізованих наукових виданнях та збірниках наукових праць, включених до категорії «Б» переліку фахових видань; 1 додаткова публікація у зарубіжному виданні; 16 публікацій апробаційного характеру у вигляді тез доповідей на міжнародних та вітчизняних науково-практичних конференціях.

Структура та обсяг дисертації відповідає встановленим вимогам та змісту вирішуваних в дисертації завдань. Дисертація містить анотацію українською та англійською мовами, список праць здобувача, вступ, п'ять розділів, загальні висновки, список використаних джерел із 357 найменувань, додатки. Повний обсяг дисертації складає 507 сторінок, з них 438 сторінок основного тексту, включаючи 47 рисунків та 62 таблиці.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** розкрито актуальність і значущість теми дисертації, визначено її мету та основні завдання, представлено ключові положення, а також наукову й практичну цінність отриманих результатів. Окремо зазначено особистий внесок автора.

У **першому розділі «Сутність інноваційної системи функціонально-цифрового супроводу проєктів збірного будівництва»** досліджено еволюцію змісту вихідних положень понятійно-категоріального апарату дослідження, таких як «проєкт збірного будівництва», «система постачання ПЗБ», «функціонально-цифровий супровід ПЗБ». Дослідженнями даного розділу обґрунтовано, що для забезпечення функціональності, стійкості та надійності системи постачання в ПЗБ в умовах сучасного будівельного девелопменту важливо застосовувати інтегровані підходи, що поєднують передові цифрові технології з управлінськими методами. Використання BIM-моделювання, методів нечіткої логіки, машинного навчання та мережевого аналізу дозволяє адаптувати ланцюг постачання до змінних умов, покращувати процеси планування та прогнозування, а також знижувати ризики. Це дозволяє зберігати високий рівень надійності та стійкості системи постачання навіть у складних умовах, таких як воєнне та післявоєнне відновлення інфраструктури. Врахування факторів гнучкості та адаптивності дозволяє забезпечити швидку реакцію на зміни в умовах ринку і зовнішнього середовища, що є критичним для успішної реалізації проєктів в умовах воєнного та повоєнного часу. Цифровізація постачання і автоматизація процесів гарантують ефективну координацію всіх учасників, що підвищує якість і скорочує час виконання проєктів. Надана авторська класифікація факторів стійкості системи постачання в девелоперському проєкті збірного будівництва (табл. 1, рис. 1).

Таблиця 1

Систематизація категоріально-понятійного апарату (у авторському викладі)

№з/п	Найменування категорії	Надане тлумачення категорії
1.	«Стійкість системи»	Величина збурень, які система може поглинути до того, як її структура буде перевизначена під дією змінних і процесів [Gunderson L.H.]. Величина збурення, яку може витримати система до того, як вона перейде в інший стан, що контролюється іншим набором процесів [Carpenter S].
2.	Система постачання	Інтегроване управління послідовністю логістичних потоків, обробкою та діяльністю з обробки – від постачальників до кінцевих споживачів – необхідне для ефективного та результативного виробництва продукту або послуги. [Coyle J.J., Bardi E.I., Langley C.J.Zar].
3.	Управління ланцюгом постачання	Управління змістом постачання і взаємовідносинами між ланками ланцюга постачання з метою максимізації споживчої цінності та досягнення стійкої конкурентної переваги. Це свідомі зусилля компанії або групи компаній, спрямовані на побудову та управління ланцюгами постачання у найбільш ефективний та результативний [Battaglia A., Tyndall G].

№з/п	Найменування категорії	Надане тлумачення категорії
4.	Стійкість системи постачання в девелоперському проєкті.	Мультиаспектна характеристика, що визначає ефективність, адаптивність і надійність логістичних мереж в проєкті. Вона охоплює технічну (інтеграція цифрових технологій), функціональну (оптимізація ланцюгів постачання), соціальну (якість взаємодії учасників) та економічну (мінімізація витрат) складові. Важливими аспектами є гнучкість до змін, екологічна відповідальність та ризикостійкість у кризових умовах (авторське тлумачення).
5.	Функціонально-цифровий супровід проєкту будівництва	Комплексна система управління будівельним проєктом, що поєднує організаційно-функціональні методи та цифрові технології для координації всіх етапів його реалізації. Вона включає використання BIM-моделювання, суттєво модернізованих мережевих моделей будівництва, аналітичних алгоритмів, Fuzzy Logic та автоматизованих рішень для оптимізації системи постачання, нейтралізації ризиків циклу ПЗБ та адаптації до динамічних умов будівництва (авторське тлумачення).

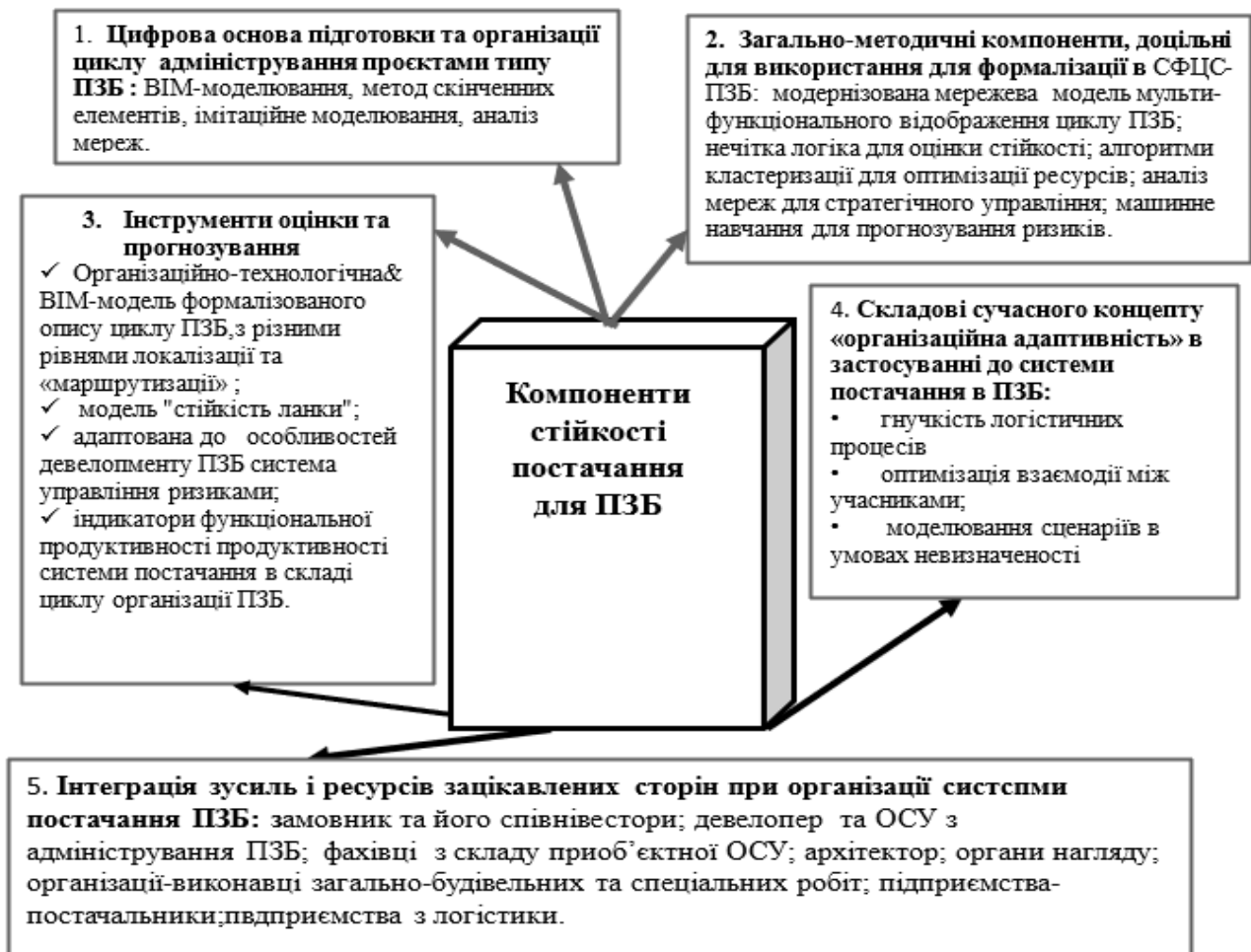


Рис. 1. Визначальні компоненти стійкості постачання в ПЗБ

(Джерело: розроблено автором)

На підставі досліджень, що подані в даному розділі, автором доведено, визначальною запорукою наукової обґрунтованості та успішності системи постачання для ПЗБ є використання платформи будівельного девелопменту “build-to-suit”, залучення широкого спектра інформаційних та управлінських технологій, полягає у створенні синергетичного ефекту, який сприяє підвищенню ефективності всіх етапів реалізації ПЗБ – від ініціації до експлуатації.

Дослідження **другого розділу** дисертації **«Інтеграція цифрових технологій у процеси організації збірного будівництва. Формування загально-методичного базису дослідження»** присвячені науковому вирішенню завдань, які стосуються: вибору формату цифрових рішень для інтеграції технологічних, управлінських і логістичних процесів в рамках будівельних проєктів; пошуку та відбору компонент до складу загально-методичного базису роботи. Стратегою створюваного загально-методичного базису для організації ПЗБ є поєднання технологій організації будівництва з платформою будівельного девелопменту, з цифровими технологіями, методами адаптивного управління, принципами синергетики. Для пошуку компонент базису застосовано міждисциплінарний підхід у пошуку компонент загально-методичного базису та їх інтеграції в контексті ПЗБ. Залучені до складу базису основні компоненти, зокрема будівельний девелопмент, імітаційне та BIM-моделювання, методико-прикладна платформа інтегрованої реалізації проєкту (*Integrated Project Delivery – IPD*), соціальний аналіз мереж, а також методи управління ланцюгами поставок і відносинами з клієнтами, створюють цифровий простір для адміністрування проєктних процесів. Додаткові компоненти, такі як теорія систем і процесний підхід, сприяють реінжинірингу управлінських структур та продуктивності підсистем організації проєктного циклу, серед яких і підлягає розгляду, моделюванню та вдосконаленню саме підсистема постачання. Завдяки залученню між-дисциплінарного підходу та використанню BIM-технологій як провідної структурно-твірної основи, створений базис забезпечує багатофункціональність цільового змісту організаційно-технологічної моделі девелоперського проєкту «збірне будівництво» (рис. 2). Загальна структура цієї моделі реалізує специфічну ієрархію розгляду циклу ПЗБ (рис. 3). *Перший (верхній) рівень* – інституційний рівень ПЗБ, що визначає задум та всю подальшу стратегію проєкту; *другий рівень* – рівень становлення, регламентації та діяльності проєктно-орієнтованої оргструктури девелопменту проєкту. *Третій рівень* – стейкхолдери проєкту (субпідрядники, постачальники та інші зацікавлені сторони). *Четвертий рівень* – етапи девелоперського проєкту від ініціації до завершення, в якому процеси підготовки, будівництва та постачання є невід’ємними складовим. *П’ятий рівень* моделі – це чотири підсистеми виконання робіт та послуг проєкту, прив’язані до окремих комплексів робіт, девелоперських угод та відповідних стейкхолдерів: підсистеми постачання (VIII.S), підготовки (VIII.P), виробництва робіт (VIII.C) та контролю (VIII.K). *Шостий рівень* – BIM-структурована модель циклу та середовища ПЗБ, що підлягає аналізу за підсистемами, стейкхолдерами, часовими та бюджетно- кошторисними параметрами.

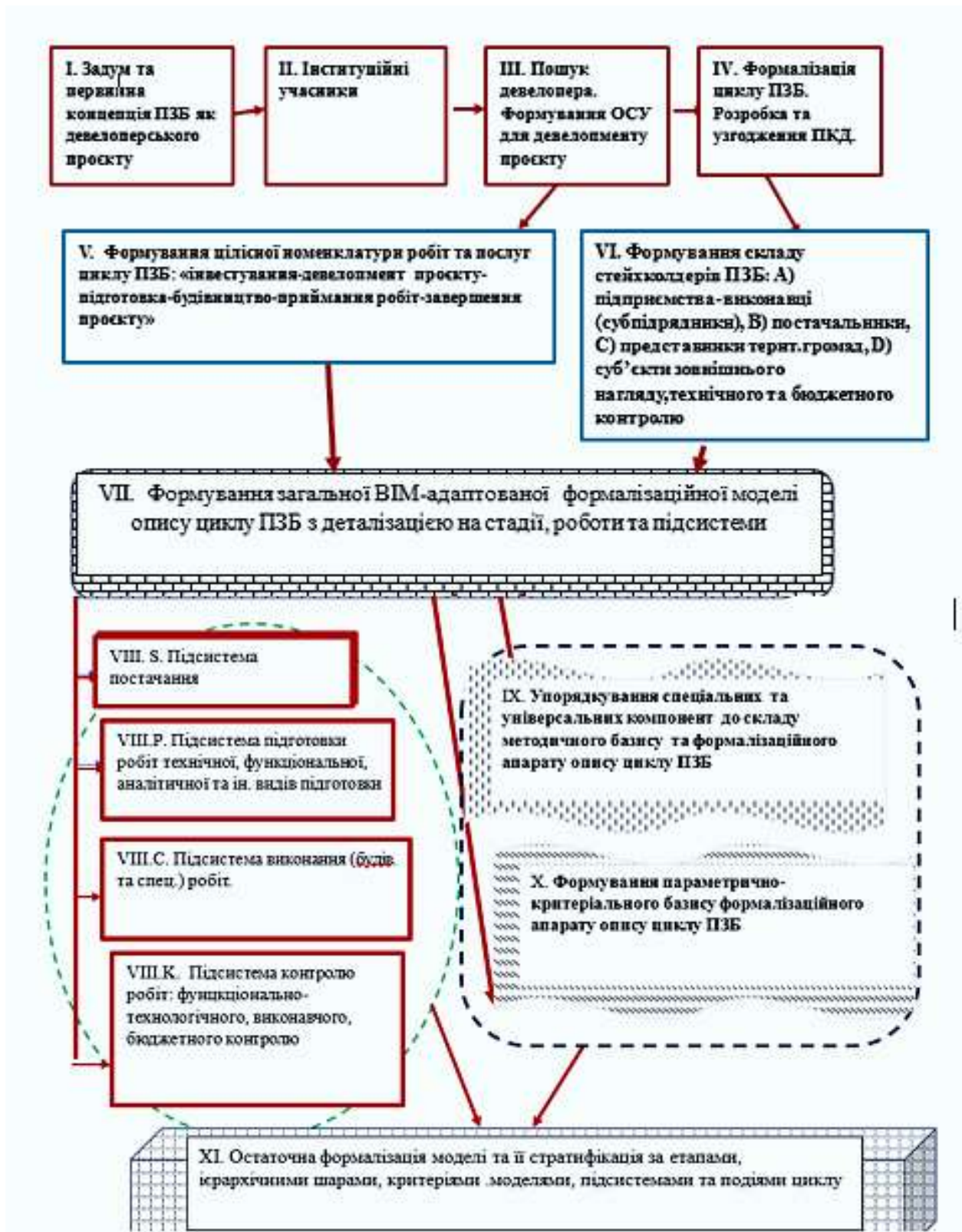


Рис. 2. Змістовно-процесна візуалізація циклу ПЗБ у вигляді BIM-адаптованої моделі (Джерело: розроблено автором)

Сьомий рівень – критеріально-параметрична основа моделі, пристосована як до формату BIM-технологій, так і до формату мережевої моделі оновленого типу.
Восьмий рівень – модель опису, формалізації та коригування ПЗБ на рівні

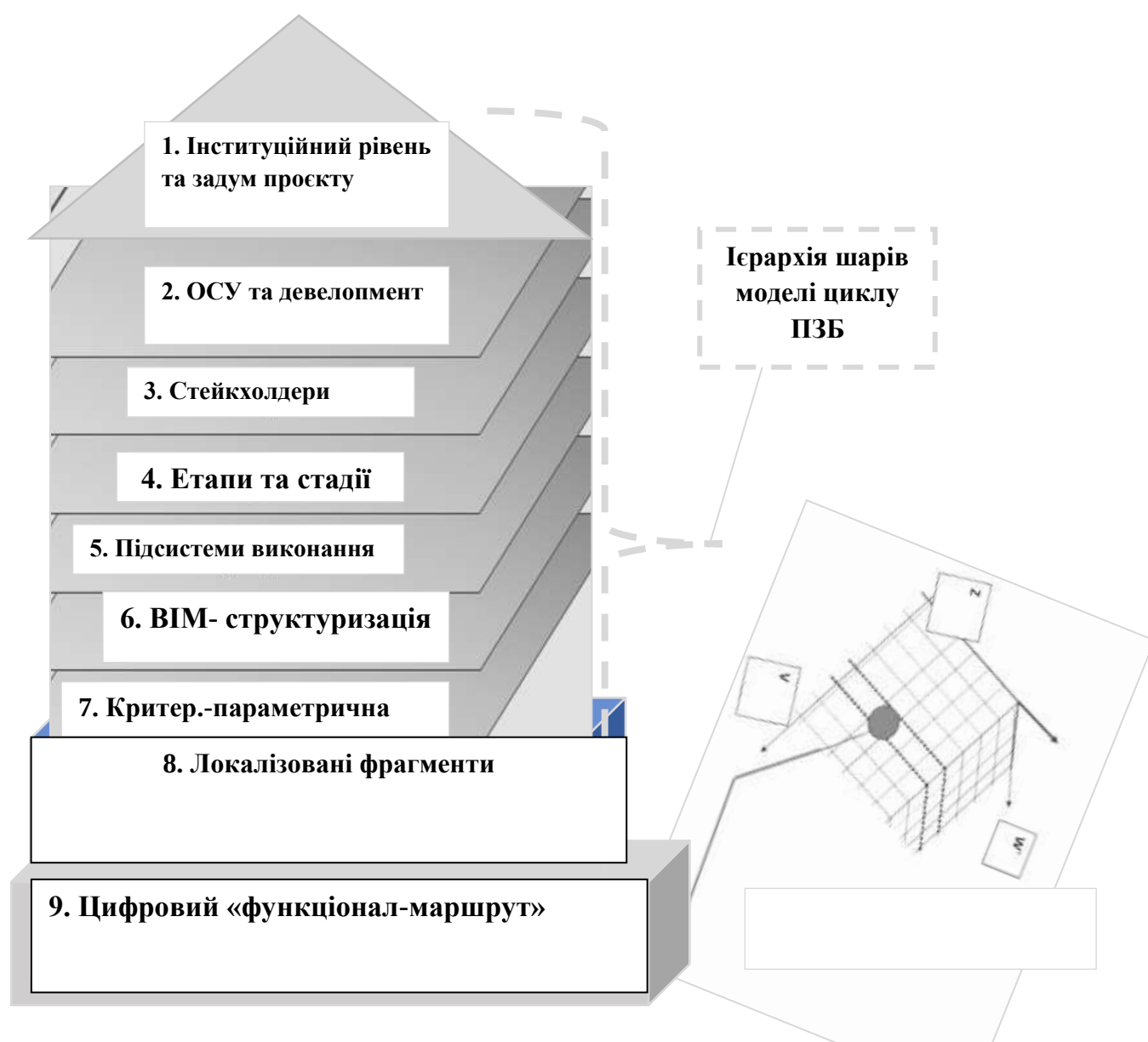


Рис. 3. Загальна 9-шарова ієрархія багатофункціональної організаційно-технологічної моделі цифрового опису ПЗБ-циклу. *Примітка:* дефрагментація моделі за осями z, v, w : z – вісь результуючого показника; v – вісь варіативного показника (аргументу); w – вісь цифрового маршруту в межах обсягів ПЗБ

окремих «функціоналів» ПЗБ (локалізованими фрагментами) за роботами та подіями циклу. Параметри, події проєкту, частини «візуалізованого конструктиву» досліджуваних «локацій проєкту» у віднесенні до певного «комплексу робіт та стейкхолдера утворюють «локалізований цифровий фрагмент» (8-ий рівень), в цифровому просторі проєкту утворюють *дев'ятий рівень* – «цифровий функціонал-маршрут». Окрему увагу в складі досліджень другого розділу віддано перевагам застосування платформи IPD в адаптації системи постачання в проєкті та організації будівництва в цілому до умов ПЗБ. Для оцінки переваг концепції інтегрованої реалізації проєкту було застосовано

методи статистичної регресії (для побудови графіка щільності) та методи інтегрального числення (для вияву переваг). Загальні витрати на внесення змін до проекту залежать від обраного методу реалізації проекту (традиційні методи або IPD) та витрат на внесення відповідних змін. Отже, щоб розрахувати загальні витрати на виправлення всіх виявлених недоліків потрібно: а) знайти добуток кривої інтенсивності подачі пропозицій $f(t)$ та експоненти $g(t)$, яка відображає зростання витрат на внесення змін в проєкт із часом; б) знайти площу криволінійної трапеції між графіком функції $f(t) \cdot g(t)$ і віссю ОХ. Ця площа (визначений інтеграл) покаже загальні витрати на внесення змін до проекту. Таким чином, загальні витрати на внесення змін до проекту визначаються як часовим графіком внесення змін (функція $f(t)$) так витратами на впровадження змін (функція $g(t)$) і виражаються функціоналом $W(f, g)$ наступного виду:

$$W(f, g) = \int_0^T f(t) \cdot g(t) dt \quad (1)$$

Вигляд функції $h_1(t) = f_1(t) \times g(t)$, яка відображає часову щільність вартості внесення змін до початкового проекту при класичному методі реалізації проекту, представлений на рис. 4 (зліва).

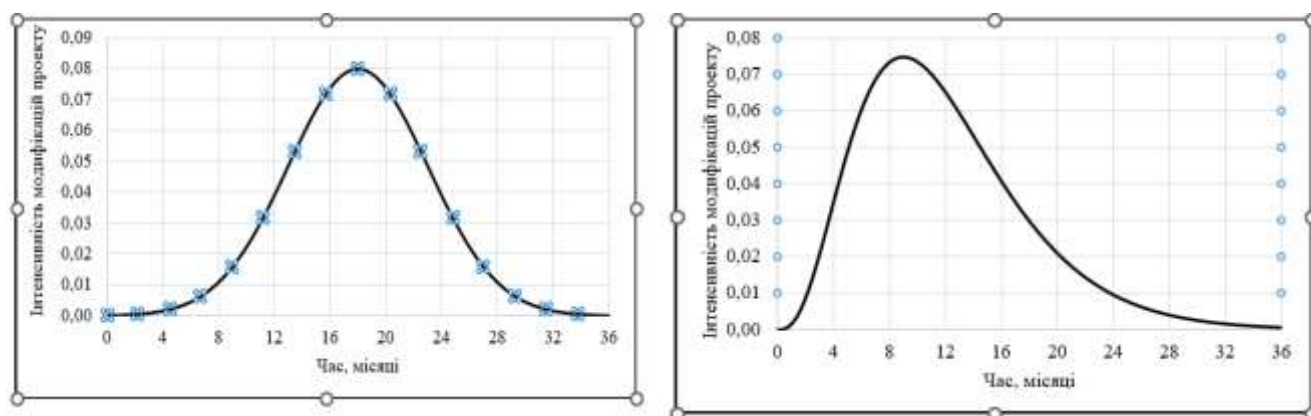


Рис. 4. Функція щільності вартості внесення змін до проекту при класичному методі реалізації проекту (зліва) та за умов IPD (справа)
(Джерело: розроблено автором)

Вигляд функції $h_2(t) = f_2(t) \times g(t)$, яка відображає часову щільність вартості внесення змін до початкового проекту при інтегрованій концепції реалізації проекту, представлений на рис. 4 справа. Отже, загальні витрати на внесення змін виражаються співвідношенням:

- при традиційних методах реалізації проекту

$$W_1 = \int_0^T f_1(t) \cdot g(t) dt \quad (2)$$

- при інтегрованій реалізації проекту

$$W_2 = \int_0^T f_2(t) \cdot g(t) dt \quad (3)$$

Чисельне інтегрування виразів (2) і (3) було виконано з використанням методу Сімпсона. при інтегрованій реалізації проекту більша частина пропозицій та рішень щодо вдосконалення проекту припадають на початковий часовий період реалізації проекту, що дозволяє зекономити час та кошти на їх реалізацію. Нормуючий множник k був підібраний таким чином, що площа фігури під кривою прийняття рішень дорівнює одиниці ($k = 0,00206$).

$$S_2 = \int_0^T kt^3 \exp(-bt) dt = 1 \quad (4)$$

$$\int_a^b f(t)dt \approx \frac{h}{3} \left[f(x_0) + 4 \sum_{i=1}^n f(x_{2i-1}) + 2 \sum_{i=1}^{n-1} f(x_{2i}) + f(x_{2n}) \right] \quad (5)$$

де $[a; b]$ – відрізок на якому функція неперервна; x – вузлові точки на осі ОХ; $i = 1, 2, \dots, n$ – довжина відрізків; h – крок обчислень (0,1 місяця). Опрацювання функції (5) дало підстави вважати, що використання інтегрованої моделі реалізації дозволяє зменшити сукупні витрати внесення змін до проекту на 33,3%.

В третьому розділі роботи «Аналітичний базис залучення інформаційних технологій у формування девелоперського середовища та організації постачання в проектах збірного будівництва» було вирішено завдання побудови аналітичного базису, для чого було обґрунтовано процедури наступного змісту **A.I.- A.IV**. На етапі A.I. відбувається формування мережевої моделі нового типу – побудова графової структури взаємодії стейкхолдерів, етапів виконання робіт у межах циклу БДП та з відповідною структуризацією системи постачання щодо номенклатури, логістичних організацій, тарифів, графіків та бюджетів (рис. 5). Подана на рис. 5 мережева модель є функціонально-агрегованим графом, який сполучає ознаки: BIM-

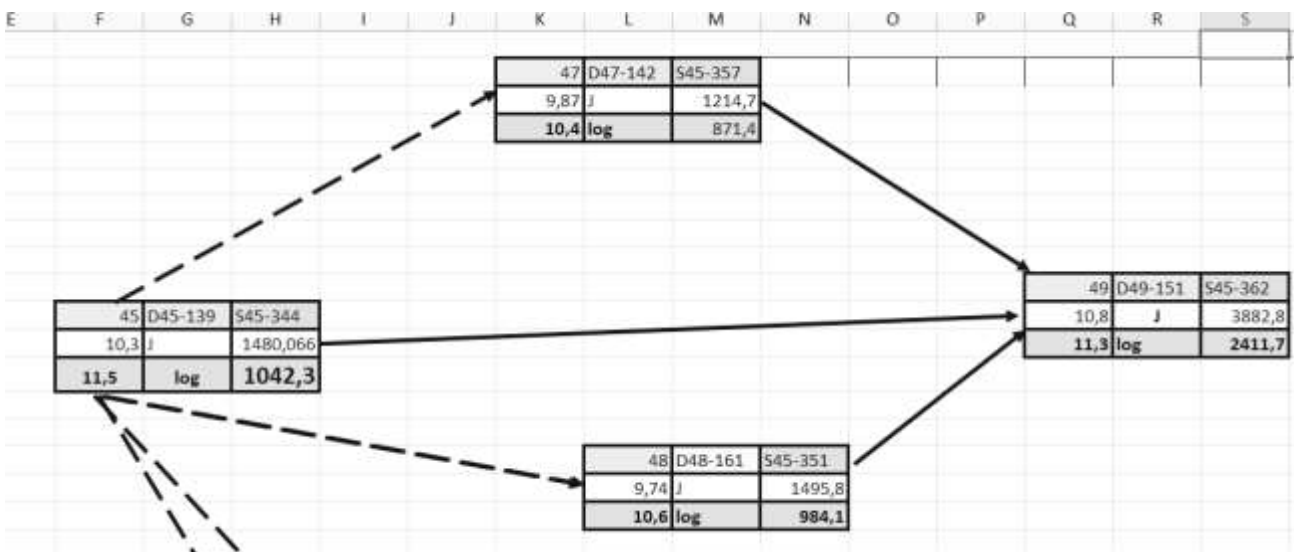


Рис. 5. Цифровий граф мережевої моделі циклу ПЗБ з відображенням стану системи постачання (Джерело: розроблено автором)

технологій, мережевих моделей «роботи-матриці», методу скінченних елементів та Fuzzy-технологій. Зокрема, щодо окремого елементу циклу ПЗБ та відповідно щодо стану системи постачання на рис. 5 (для елементу, поданого на фрагменті зліва) вжито такі позначення: 45 – порядковий номер роботи (стадії ПЗБ), виконання, підготовка та постачання щодо якої віддано окремим виконавцям – субпідрядникам, логістичним та спеціалізованим організаціям; B45-139 – код посилання на цифровий архів щодо змісту угод девелопменту із стейкхолдерами цієї роботи, в тому числі щодо угод з логістичними компаніями; S45-344 – код посилання на компоненту цифрового архіву, де надано цифровий опис номенклатури, бюджету, часу та інших параметрів постачання; *log* – рядок, що визначає загальні характеристики системи постачання; 1042,3 – обсяг бюджету постачання по даній роботі; 11,5 – нечітко-логічна оцінка відповідності системи постачання сумісним директивним вимогам замовника і девелопера; *J* – рядок, що відповідає за організацію-виконавця даної роботи (стадії); 10,3 – нечітко-логічна оцінка стану організації-виконавця (провідного субпідрядника); 1480,07 – загальний бюджет щодо виконання роботи.

А.ІІ. Змістом процедур цього етапу є ідентифікація ключових параметрів оцінки стану системи постачання – виокремлення натуральних та цифрових показників для аналізу процесів. Запроваджено наступну *систему індикаторів подано щодо системи постачання в межах даної роботи*:

$$QS(m) = NS_f(m)/NS_z(m), \quad (6)$$

де m – порядковий номер показника натурального виміру; $NS_f(m)$ – фактичне значення показника натурального виміру щодо системи постачання в межах даної роботи; $NS_z(m)$ – еталонне (директивне) значення m -го показника, складене з врахуванням кращих вітчизняних або галузевих стандартів та вимог; $QS(m)$ – локальна міра досягнення стандартів системи постачання. Перелік показників натурального виміру для оцінки системи постачання подано нижче:

Таблиця 2

№ з/п	Зміст показників натурального виміру для оцінки системи постачання в межах окремої роботи циклу ПЗБ	Од. виміру
1.	Час виробництва збірних елементів – середній час виготовлення будівельних конструкцій на заводі	Год., доба
2.	Час транспортування до будівельного майданчика – період між відвантаженням з виробництва та доставкою на об'єкт	Год., доба
3.	Кількість відвантажених елементів – загальна кількість модулів, панелей або інших конструкцій, що передані на об'єкт	Од./тиждень (Од./місяць).
...		...
15.	Час реагування на зміну замовлення – період від моменту коригування потреби до початку виконання змін	Год., діб

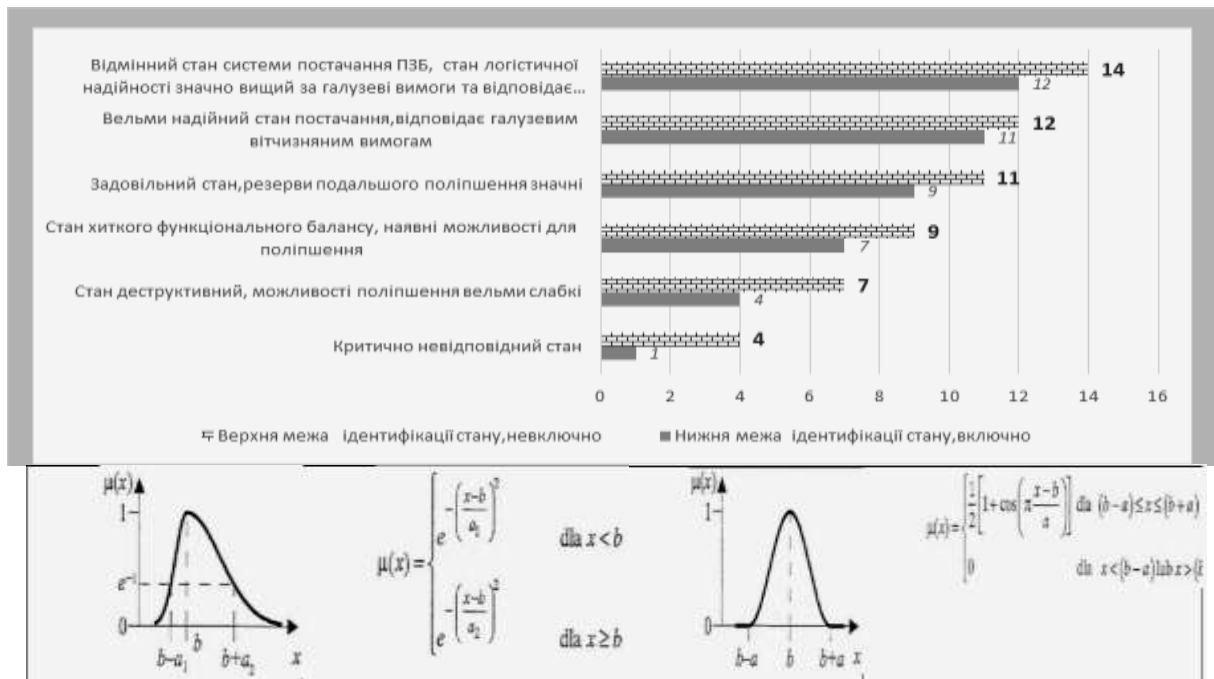


Рис. 6. Ідентифікація станів системи постачання ПЗБ з використання нечіткої логіки: вгорі – бальна шкала оцінювання, внизу – фрагменти застосування шаблонів належності (Джерело: розроблено автором)

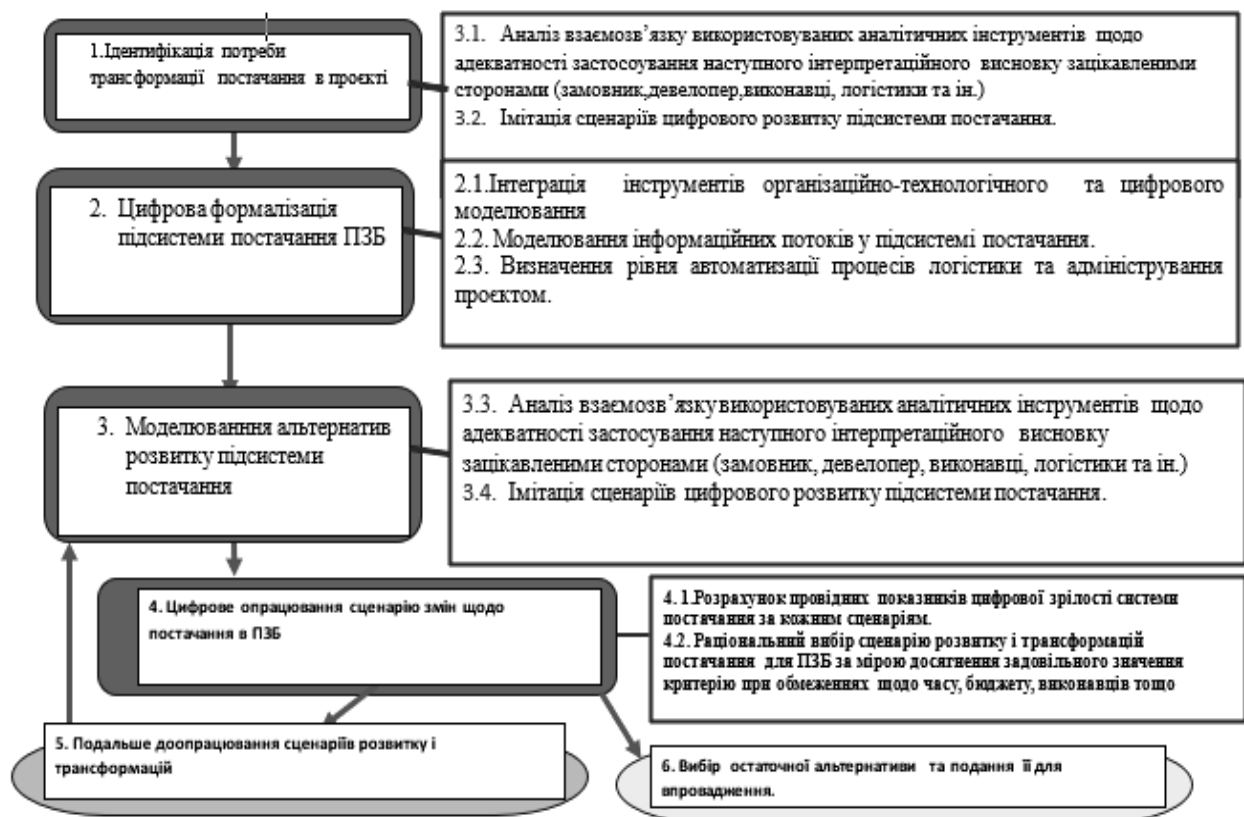


Рис. 7. Застосування алгоритму цифрової зрілості для вдосконалення системи постачання ПЗБ (Джерело: розроблено автором)

А.ІІІ. На цьому етапі методи нечіткої логіки, Fuzzy-технологій (в т.ч. процедури фазифікації та агрегування) застосовуються для оцінки системи постачання ПЗБ за *бально-семантичними показниками*. Застосовано бальну оцінку від 1 до 14 балів, за умови що стану 14 балів відповідає стан задоволенню вищих стандартів щодо всієї системи постачання ПЗБ. Подана нижче система нечітко-логічного оцінювання (рис. 6) разом із інструментами фазифікації та агрегування дозволяє оцінити стан системи постачання в цілому. Ідентифікований в цілому стан системи постачання дозволяє розробити варіанти поліпшення (збереження) стану надійності системи постачання ПЗБ. В разі вияву критичних чи хитких станів системи постачання на наступному етапі – **А.ІV** – здійснюється формування потенційно рекомендованих варіантів структурних змін та моделювання сценаріїв змін для прогнозування варіантів розвитку системи (рис. 7). Завершальним етапом аналітичного базису – **А.ІV** – є застосування алгоритму цифрової зрілості щодо можливостей адаптації цієї підсистеми під динамічні умови циклу ПЗБ (рис. 7). У відповідності з цим алгоритмом відбувається вибір сценарію подальшої зміни, вибір і впровадження коригувальних заходів поліпшення постачання для ПЗБ.

Четвертий розділ «Прикладний інструментарій організації постачання в проєктах збірного будівництва на ґрунті цифрових технологій» присвячено розробці прикладного інструментарію супроводу процесів організації постачання для ПЗБ. Зміст компонент інструментарію подано в табл. 3.

Таблиця 3

**Зміст і призначення компонент прикладного інструментарію
вдосконалення постачання в проєктах збірного будівництва на ґрунті
цифрових технологій**

№ з/п	Найменування підсистеми інструментарію	Зміст і цільове призначення підсистем інструментарію
1.	Адаптація оргструктури підготовки і впровадження до сучасних вимог цифрового адміністрування та логістики	Адаптація організаційної структури управління (ОСУ) для ПЗБ до сучасних вимог цифрового адміністрування та логістики є критично важливою складовою ефективного впровадження цифрових технологій у систему постачання. Це передбачає трансформацію традиційних процесів управління шляхом інтеграції автоматизованих систем адміністрування, цифрових платформ координації та інтелектуальних технологій управління ланцюгами постачання. Цифрова трансформація організаційної структури передбачає перехід від ієрархічних до адаптивних і гнучких моделей управління, які базуються на використанні BIM (ERP (Enterprise Resource Planning) та SCM (Supply Chain Management) систем. Впровадження цифрових технологій дозволяє автоматизувати процеси планування, розподілу ресурсів, моніторингу та аналізу ефективності логістичних операцій. Ключовим компонентом цієї адаптації є створення <i>єдиної цифрової платформи управління логістикою</i> збірного будівництва, що інтегрує всі етапи постачання – від вибору постачальників до доставки матеріалів на будмайданчик.

№ з/п	Найменування підсистеми інструментарію	Зміст і цільове призначення підсистем інструментарію
2.	BIM-планування та моделювання	BIM-планування та моделювання є ключовою підсистемою цифрового управління постачанням у збірному будівництві, що забезпечує інтеграцію, координацію та автоматизацію всіх процесів постачання на основі сучасних інформаційних технологій. Створення цифрової моделі проєкту передбачає формування єдиної інформаційної бази, що містить повний комплекс даних про матеріали, їхні характеристики, строки постачання, виконавців і логістичні маршрути, що дозволяє значно підвищити точність планування та контролювати виконання постачання на кожному етапі реалізації будівельного проєкту. Використання 4D BIM (час) і 5D BIM (вартість) забезпечує прогнозування ефективності постачань через динамічну прив'язку будівельного графіка до реальних процесів логістики, дозволяючи аналізувати взаємозв'язки між графіком будівництва та фактичними строками постачання, а також оцінювати фінансові витрати на кожному етапі процесу. Інтеграція BIM-моделей з ERP-системами дозволяє автоматизувати управління ресурсами, оновлюючи інформацію про залишки матеріалів, виконання постачань, зміни в логістиці та відстеження виконання контрактних зобов'язань постачальників у режимі реального часу, що сприяє оперативному коригуванню планів постачання у відповідь на можливі відхилення чи форс-мажорні обставини. Додатково впровадження цифрових двійників (Digital Twins) забезпечує моделювання альтернативних сценаріїв постачання та дозволяє оцінювати ризики затримок, оптимізуючи транспортні маршрути з використанням алгоритмів машинного навчання та геоаналітики. Використання IoT-технологій (сенсори, RFID-мітки, GPS-трекери) сприяє моніторингу стану матеріалів у реальному часі, забезпечуючи контроль умов зберігання та транспортування, що критично важливо для якісного виконання будівельних робіт. Таким чином, застосування інформаційних технологій у плануванні та моделюванні системи постачання в проєктах збірного будівництва дозволяє досягти комплексної цифрової трансформації логістичних процесів, підвищити їхню ефективність, забезпечити гнучкість та адаптивність ланцюга постачань, а також мінімізувати ризики, що можуть негативно вплинути на терміни та вартість реалізації будівельного проєкту
3.	Цифровий контроль постачань	Ця підсистема забезпечує точність, надійність та оперативність управління матеріальними потоками дозволяє забезпечити наскрізний контроль постачань на всіх етапах – від моменту виробництва чи складування матеріалів до їхнього транспортування, розвантаження та монтажу (рис.8). Важливу роль у цьому процесі відіграють трекінгові системи, що використовують RFID-мітки, QR-коди та IoT-сенсори для безперервного відстеження місцеперебування та стану матеріалів і конструкцій у реальному часі. Ці технології дозволяють ідентифікувати кожен елемент постачання, оперативно оновлювати базу даних BIM-моделі та автоматизувати перевірку відповідності фактичних постачань проєктним вимогам

№ з/п	Найменування підсистеми інструментарію	Зміст і цільове призначення підсистем інструментарію
4.	Оптимізація логістичних процесів.	Оптимізація логістичних процесів у збірному будівництві передбачає використання штучного інтелекту для динамічного аналізу та вибору найефективніших маршрутів перевезення, що дозволяє мінімізувати витрати часу та ресурсів. Алгоритми машинного навчання оцінюють різні фактори, такі як стан доріг, прогнозовані затримки, завантаженість транспортних шляхів та погодні умови, щоб автоматично коригувати логістичні маршрути в режимі реального часу. Застосування SCM-систем та автоматизованих систем управління транспортом (TMS – Transportation Management System) допомагають ефективно розподіляти транспортні ресурси, зменшуючи кількість холостих рейсів і оптимізуючи використання автопарку. Цифрові платформи на базі штучного інтелекту дозволяють синхронізувати логістичні процеси з графіками будівельних робіт, що значно зменшує ймовірність простоїв на будмайданчику та підвищує продуктивність постачання
5.	Інтелектуальний аналіз ризиків	Цільове призначення підсистеми «Інтелектуальний аналіз ризиків» полягає в автоматизації процесу виявлення, оцінки та моніторингу ризиків, що можуть впливати на постачання в проєктах збірного будівництва. З використанням сценарно-ігрового моделювання, штучного інтелекту, платформи блок-чейн прогнозуються потенційні загрози та їх вплив на продуктивність постачання ПЗБ, мінімізуючи можливі затримки або збитки.
6.	Забезпечення гнучкості та адаптивності постачання"	Підсистема забезпечує здатність швидко реагувати на зміни в умовах реалізації проєкту, зокрема на коливання попиту, зміни в поставках або перебої в ланцюгу постачання. сприяє оптимізації логістичних процесів, мінімізації затримок та зниженню витрат, забезпечуючи високий рівень адаптації до змін у зовнішньому середовищі, що є критичним у умовах воєнного та повоєнного відновлення
7.	Підсумкова оцінки ефективності системи управління постачанням в складі ПЗБ	Завершальним блоком у складі прикладного інструментарію цифрового адміністрування постачанням в проєктах збірного будівництва. Цей блок відповідає за збір та аналіз даних щодо виконання планів постачання, забезпечення своєчасності поставок, а також за оцінку результативності прийнятих рішень і застосованих методів управління. Він включає в себе впровадження механізмів для постійного відстеження ключових показників ефективності (KPI), що дозволяють оперативно виявляти відхилення від плану, вносити коригування та вдосконалювати процеси постачання

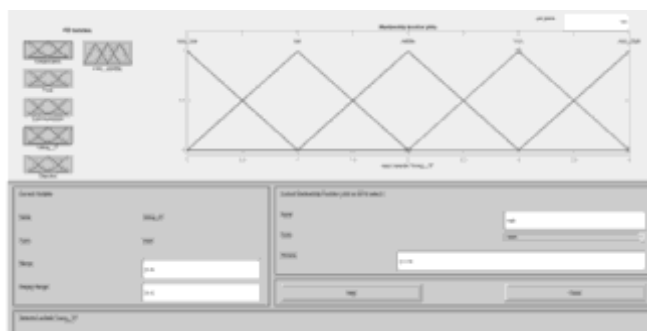


Рис. 8. Блок 3: оцінка станів постачання ПЗБ за фактором «Якість використання цифрових технологій»
(Джерело: розроблено автором)

В завершальному, п'ятому розділі роботи «Прикладне забезпечення супроводу процесів постачання в проєктах збірного будівництва» відображено: зміст і призначення комплексу прикладених програм (КПП), створеного на ґрунті трансформації інноваційних результатів, що викладені в попередніх розділах; підсумки практичного впровадження в практику адміністрування будівництва та раціоналізації постачання в циклі ПЗБ. КПП побудований як інтеграція шести прикладних модулів (табл. 4).

Таблиця 4

Цільове призначення модулів в складі комплексу прикладних програм

№	Найменування модуля	Зміст і цільове призначення модуля в складі КПП
1.	Адміністративно-управлінського регламенту циклу ПЗБ	Виконує функцію формалізації управлінських процесів у проєкті збірне будівництво». Забезпечує інтеграцію середовища ПЗБ, цифрових інструментів (BIM, ERP, CRM), ролей та стейкхолдерів. Визначає взаємодію між підсистемами (девелопмент, проєктування, постачання, будівництво, підготовчі та спеціальні роботи).
2.	Цифрової формалізації та оптимізації змісту постачання	Реалізує математичну постановку задачі оптимізації з урахуванням нечітких критеріїв. Забезпечує вибір найкращої конфігурації ланцюга постачання з урахуванням обмежень.
3.	Цифрового планування та диспетчеризації логістики	Синхронізує дані BIM-моделі з графіком поставок. Генерує оптимізовані логістичні маршрути. Інтегрує дані про транспорт, склади, етапи спорудження.
4.	Моделювання сценаріїв, прогнозування стану стійкості постачання	Формує індикатори стійкості до збоїв, ризиків, змін умов. Працює з динамічними сценаріями відхилень у ланцюзі постачання.
5.	Візуалізації взаємодій, поліпшення комунікацій та партнерських відносин	Моделювання функціонально-технологічних та соціально-економічних зв'язків між учасниками постачання. Виявляє «вузлові» компанії, формує кластерну структуру ланцюга. Підтримує візуальне середовище для управління комунікаціями. Групування учасників. Підвищення узгодженості рішень у рамках окремих кластерів. Модуль забезпечує гнучке управління ресурсами у межах спільнот (рис. 10).
6.	Інтегрований цифровий моніторинг стану постачання для ПЗБ	Об'єднує ключові показники стану постачання, графіка, витрат. Надає дашборди реального часу. Використовує IoT-дані, телематику транспорту та статуси виробництва. Діагностує ефективність використання цифрових технологій щодо постачання в системі девелопменту ПЗБ. Оцінює вплив інтелектуальних систем на логістику. Генерує аналітичні звіти для девелоперів і менеджерів проєкту. Надає загальну оцінку щодо динаміки постачання в проєкті, з врахуванням коригувальних заходів щодо подолання факторів подолання ризиків та небезпек.

Перший з модулів в складі КПП надає *функціонально-управлінський регламент* процесами адміністрування, середовищем та стейкхолдерами ПЗБ, де постачання є складовою підсистемою. Наступний модуль реалізує вирішення завдання постановки та багатокритеріальну оптимізації стану підсистеми постачання в ПЗБ у вигляді (7), (8). Потрібно знайти (7) – вектор рішень x , який оптимізує (8) – вектор цільових рішень $F(x)$ за умов додержання системи обмежень (9):

$$x = (x_1, x_2, \dots, x_n) \in X \quad (7)$$

$$F_s = (f_1(x), f_2(x), \dots, f_n(x)) \quad (8)$$

$$g_j(x) \leq 0, \quad j = 1, \dots, p; \quad h_k(x) = 0, \quad k = 1, \dots, q \quad (9)$$

де f_i – нечітко-логічні критерії в задачі оптимізації; x_i ($i=1, 2, \dots, n$) – аргументи задачі оптимізації - рішення щодо комплектів транспорту та логістичного оснащення; варіанти рішень щодо розкладу; рішення щодо маршрутів; рішення щодо розкладу та термінів постачання; рішення щодо обсягів поставок; g_i – обмеження, які накладаються щодо аргументів і стосуються: ресурсних обмежень (транспорт, паливо); часові «вікон» доставки; допустимих меж вартості; графіків підприємств-постачальників.

Система аргументів (план задачі оптимізації) залишається єдиною для всіх 4 критеріїв. Прийнято нечіткі критерії наступного змісту: f_1 – критерій своєчасності постачання; f_2 – рівень логістичної надійності всіх підприємств-стейкхолдерів постачання в проєкті; f_3 – критерій раціональності бюджету; f_4 – критерій узгодженості з сукупною організаційно-технологічною моделлю циклу підготовки та спорудження об'єкту; f_5 – рівень цифрової адаптованості та прозорості постачання. Кожен з критеріїв використовує вищезазначену нечітко-логічну бальну оцінку від 1 до 14. Критерії спрямовуються до максимуму. Критерії мають нерівно-значний пріоритет і вони через вектор пріоритетів $[Rg_i]$ (11) враховуються в сукупному рішенні (10):

$$F_s(x) = \sum_{i=1}^5 \eta_i \times f_i = \eta_1 \times f_1 + \eta_2 \times f_2 + \dots + \eta_5 \times f_5 \rightarrow \max \quad (10)$$

$$\eta_i = \frac{Rg_i}{\sum_i Rg_i} \quad (11)$$

Остаточним рішенням задачі нечіткої оптимізації буде таке рішення (10), яке надасть максимуму нечіткій сумі добутків значень локального критерію f_i та значення його пріоритету η_i у вигляді питомих часток в загальному рішенні (рис. 9).

Наступні модулі КПП забезпечуватимуть: розробку логістичних маршрутів та їх коригування (модуль 3), розробку сценаріїв очікуваних порушень стану постачання заходів щодо упередження цих порушень подолання цих порушень (модуль 5) та в рамках заходів стабілізації стану постачання складають і впроваджують в систему девелоперського проєкту процедури щодо поліпшення партнерських відносин між стейкхолдерами ПЗБ (модуль 5) Завершальний

модуль в складі КПП формує остаточно скориговану організаційно-технологічну і цифрову модуль ПЗБ (рис. 10).

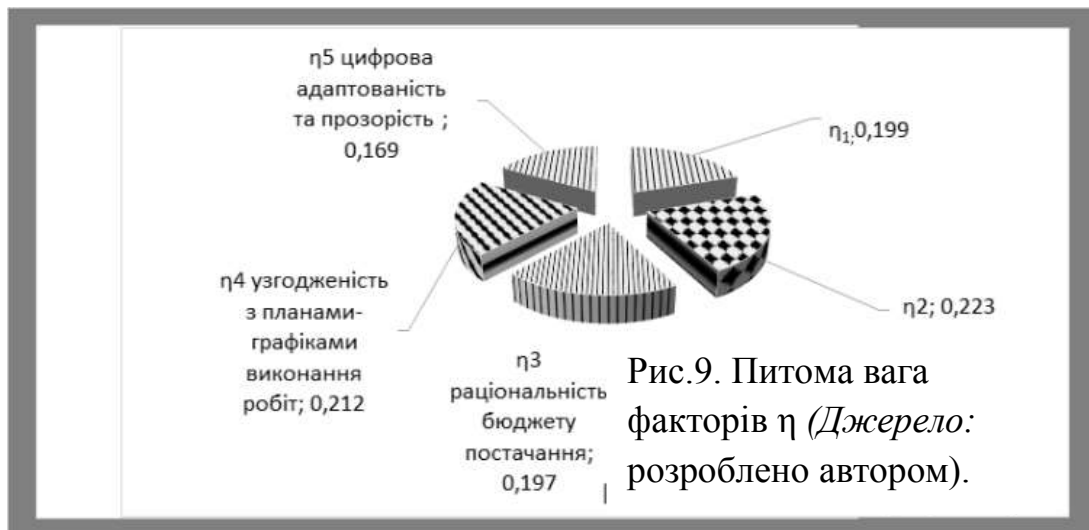


Рис.9. Питома вага факторів η (Джерело: розроблено автором).

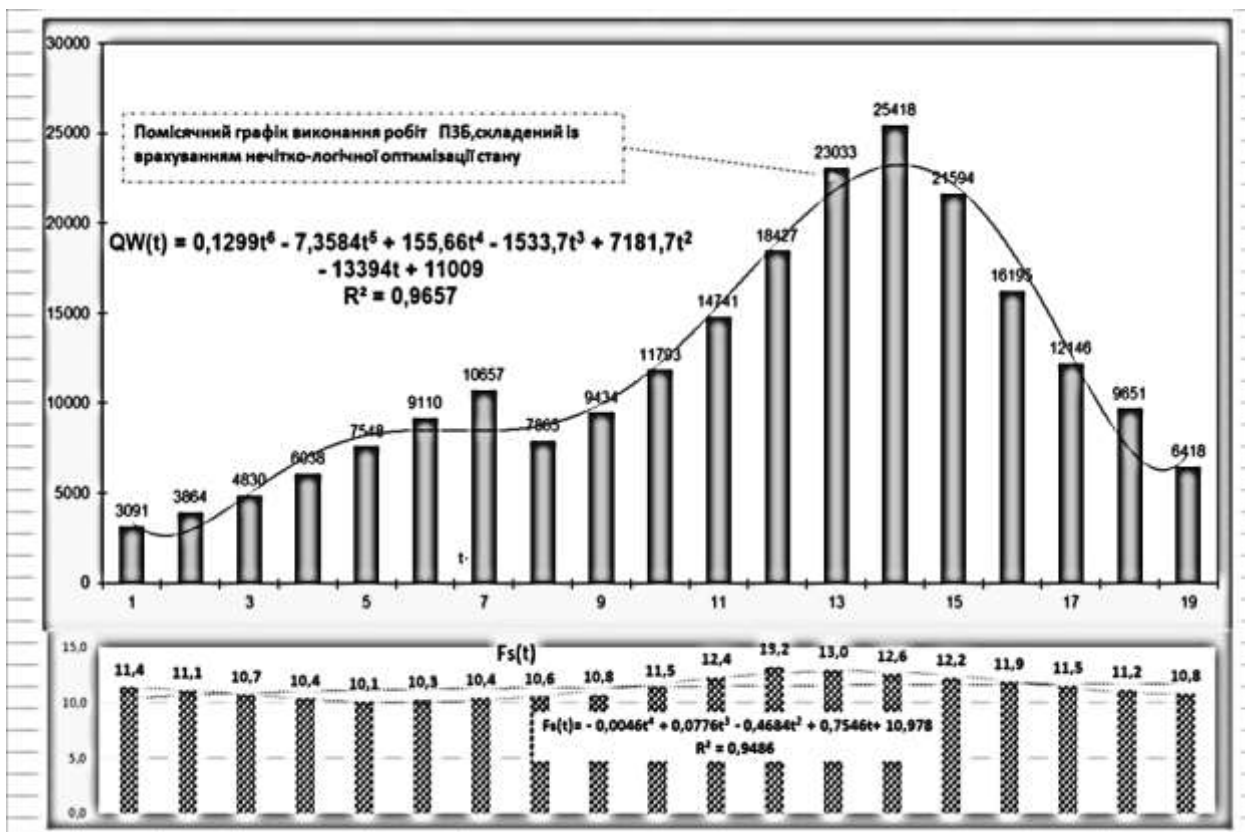


Рис. 10. Сформована комплексом програм цифрова модель циклу ПЗБ з остаточно оптимізованими характеристиками постачання:

$QW(t)$ – помісячна інтенсивність виконання робіт (тис. грн.);

$Fs(t)$ – сумарний нечітко-логічний критерій оптимізації постачання (бали);

t – часова координата циклу ПЗБ (Джерело: розроблено автором)

Зазначена модель відображає інтенсивність виконання робіт та послуг в ПЗБ, яка відповідає як завданням інтегрованої реалізації проекту (IPD), так і вимогам оптимізації за $F_s(t)$ – сумарним нечітко-логічним критерієм. В табл. 5 подано фрагмент застосування КПП для формування відомості обсягів робіт у вартісно-цифровому вигляді. Окремим стовпцем відображено первинно очікуваний стан постачання за відповідними комплексами робіт в проекті. Результати дослідження, втілені у вигляді комплексу програм, були застосовані в практику підготовки, організації та адміністрування ПЗБ (рис. 10, 11), які готувались та впроваджувались Департаментами з питань будівництва та архітектури Вінницької та Хмельницької облдержадміністрацій.

Таблиця 5

Застосування комплексу програм до формування вартісно-цифрової відомості

Порядковий номер комплексу робіт в циклі ПЗБ	Нормативна тривалість будівництва, роб. дні	521	Тривалість по ділянкам (питомі частки/роб.дні)		Кошторисна вартість, тис.грн	Кошторисна вартість виконання по ділянкам, тис.грн		Очікуваний стан підсистеми постачання в проекті в межах роботи)
	Частка в заг. тривалості, %		0,64	0,36	Всього	1	2	бали
1	2	3	4	5	6	7	8	9
8	0,4	3			160,18			12,1
9	0,29	2			978,64			11,4
10	0,09	1			313,16			11,4
11	0,19	1			469,75			11,4
12	0,19	1			391,45			11,4
13	0,58	4			1761,55			11,3
14	1,27	7	4	3	1790,25	895,12	895,12	10,8
15	1,2	7	4	3	596,75	298,37	298,37	12,1
16	9,22	49	31	18	15003,97	7501,99	7501,99	13,7
17	0,28	2	1	1	21,77	10,88	10,88	12,92
18	0,25	2	1	1	4603,49	2301,75	2301,75	12,4032
19	42,62	223	142	81	77918,37	38959,18	38959,18	13,2

Впровадження здійснено в умовах підготовки та організації будівництва для наступних проектів: «Посад-Покровський» (в рамках програми відбудови індивідуальних житлових будівель); проект ЖК «ДіамантХіл»; проект «Створення цифрової BIM-моделі підготовки, організації та цифрового адміністрування проектами збірного будівництва», міжнародний українсько-британський проект «Будівництво заводу із склофібробетону за участю компанії Power-Sprays Ltd».

Впровадження результатів роботи в практику організації будівництва засвідчує, що ці результати формують інноваційну теоретико-методичну основу для розвитку напряму цифрового функціонального супроводу у сфері організації промислового і цивільного будівництва. Запропонований

міждисциплінарний та діджитал-адаптований підхід реалізує формалізований супровід та інтегроване адміністрування підсистемою постачання в системі девелоперського управління ПЗБ. Шляхом поєднання BIM-моделювання, методів штучного інтелекту, нечіткої логіки та принципово модернізованих мережових моделей будівництва створено цілісну цифрову систему координації інструментів забезпечення успішності постачання та її узгодженості із змістом робіт та стадій проєктного циклу збірного будівництва.

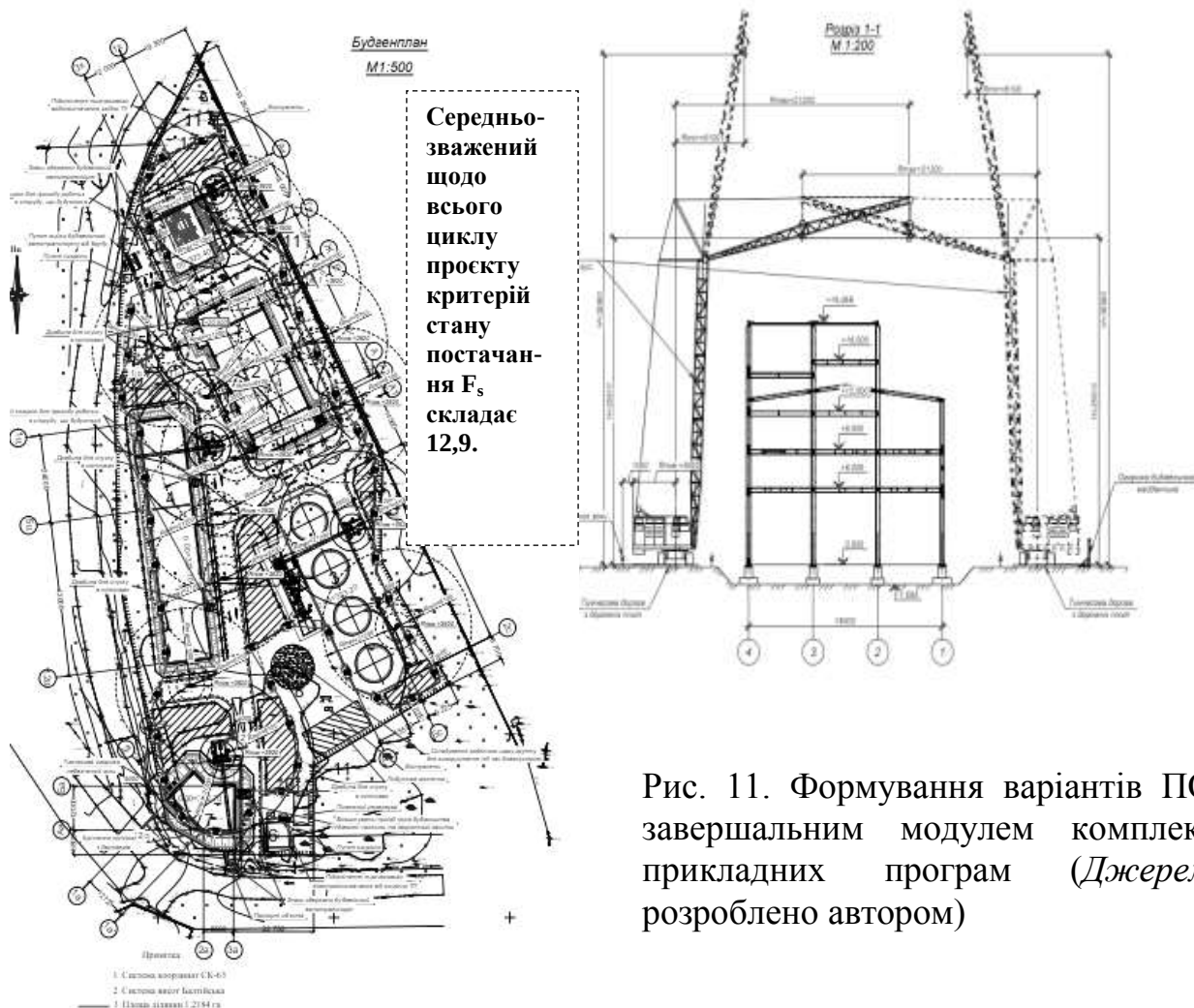


Рис. 11. Формування варіантів ПОБ завершальним модулем комплексу прикладних програм (Джерело: розроблено автором)

ВИСНОВКИ

Дисертацію присвячено вирішенню теоретико-методичної та прикладної проблеми формування системи функціонально-цифрового супроводу організації постачання в ПЗБ. Розроблена система виступає діджитал-адаптованим середовищем та інструментом поєднання цифрових інструментів, функціонально-організаційних та управлінських підходів – для успішного охоплення всіх етапів організації постачання в межах девелоперського циклу.

Значення *результатів дисертації для науки* полягає у формуванні цілісного теоретико-методичного підґрунтя для організації збірного будівництва з використанням цифрових технологій. Обґрунтовано концепт

функціонального супроводу проєктів збірного будівництва», заснований на цифровізації управлінських рішень, BIM-моделюванні, прогнозній аналітиці та авторській класифікації проривних цифрових технологій. Систематизовано інноваційні підходи до управління постачанням і інтегровано їх у єдину цифрову екосистему. Запропоновано загально-методичний базис моделювання та оптимізації проєктів, що об'єднує девелопмент, BIM, соціальний аналіз мереж і управління відносинами з клієнтами. Використано системний, процесний, ситуаційний підходи, реінжиніринг і графоаналітичні методи. BIM виступає цифровим фундаментом організаційно-технологічної моделі ПЗБ. Розроблено аналітико-прикладний інструментарій для оптимізації постачання. До його складу входять моделі оптимізації, система індикаторів, модулі оцінки впливу інтелектуальних систем. Результати дослідження слід оцінити як вагомий внесок у розвиток наукових підгалузей «Організація будівництва» та «Організація збірного будівництва в сучасних умовах будівельного девелопменту України», що є складовими науки «Технологія та організація промислового та цивільного будівництва». Це дослідження формує фундамент для цифрової трансформації галузі, сприяючи розвитку інтегрованих інтелектуальних рішень в організації збірного будівництва у форматі сучасного девелопменту.

Значення результатів дисертації для практики полягає в розробці комплексу прикладних програм, який реалізує успішну систему організації постачання як складової організації будівництва та середовища девелоперського ПЗБ. Практичне значення дисертаційного дослідження полягає у створенні комплексу прикладних програм, що забезпечує ефективну організацію постачання як ключової складової системи управління збірним будівництвом. Запропоновані рішення дають змогу успішно оптимізувати логістику, підвищити її надійність, обґрунтованість та узгодженість із організаційно-технологічною моделлю об'єкта. Результати сприяють трансформації сучасних практик девелопменту, логістики та управління взаємодією стейкхолдерів, забезпечуючи гнучкість, сталість і продуктивність будівельних процесів. Особливої актуальності ці підходи набувають в умовах воєнного та повоєнного відновлення інфраструктури. Практична ефективність роботи підтверджена її застосуванням у підготовці проєктів ПЗБ і впровадженням у навчальний процес КНУБА для підготовки студентів спеціальності 192 «Будівництво та цивільна інженерія».

Результати проведених досліджень створили підстави для наступних висновків:

1. Обґрунтовано нагальну потребу створення системи супроводу процесів постачання як ключового чинника підвищення ефективності організації циклу проєктів збірного будівництва (ПЗБ). Запропонована автором система функціонально-цифрового супроводу розглядається як комплексна модель управління проєктом, що має спиратись на інтеграцію організаційно-функціональних підходів з сучасними цифровими технологіями. Її основу становлять BIM-моделювання, удосконалені мережеві моделі будівництва, алгоритми аналізу та прогнозування, Fuzzy-технології та автоматизовані

рішення. Такий підхід забезпечує ефективну координацію усіх етапів реалізації ПЗБ, сприяє оптимізації логістичних процесів, зниженню ризиків та гнучкій адаптації до змін у зовнішньому середовищі. Опрацювати передовий вітчизняний та зарубіжний досвід інтеграції організаційно-технологічних підходів та цифрових технологій для раціоналізації системи організації та цифрового простору прийняття рішень в проєктах досліджуваного типу.

2. Для створення інноваційного формату формалізованого опису стану постачання в системі девелопменту ПЗБ обґрунтовано загально-методичний базис, що ґрунтується на міждисциплінарному підході. Базис поєднує будівельний девелопмент, BIM- та імітаційне моделювання, соціальний аналіз мереж, управління ланцюгами постачання та відносинами з клієнтами. Додатково використано системний, процесний та ситуаційний підходи, реінжиніринг управлінських структур і графо-аналітичні методи. Ключову роль відіграє застосування BIM-технологій як цифрового фундаменту для створення комплексної організаційно-технологічної моделі проєктів збірного будівництва».

3. На підставі опрацювання вітчизняного та зарубіжного досвіду організації циклу і середовища проєктів, що досліджуються, – модель циклу ПЗБ подано у вигляді інноваційної багаторівневої BIM-адаптованої системи, в якій постачання є окремою підсистемою. Перший рівень – це формування та регламентація проєктно-орієнтованої організаційної структури. Другий рівень – цифровий опис стейкхолдерів проєкту, включаючи субпідрядників та зацікавлені сторони. Третій рівень надає опис та ієрархію змісту робіт та послуг повного циклу проєкту – від ініціації до завершення з фокусом на підготовку, будівництво та постачання. Четвертий рівень містить чотири підсистеми: постачання, підготовки, виробництва та контролю. П'ятий – це BIM-модель, що аналізується за підсистемами, стейкхолдерами та бюджетно-часовими параметрами. Шостий рівень – параметрично-критеріальна основа для BIM- і мережових моделей. Сьомий – модернізована модель локального аналізу функціоналів ПЗБ. Восьмий рівень – модель опису, формалізації та коригування ПЗБ на рівні окремих «функціоналів» ПЗБ (локалізованими фрагментами) за роботами та подіями циклу. Дев'ятий рівень – «цифровий функціонал-маршрут», що відображає зміну характеристик проєкту у зв'язку з діями підсистем і стейкхолдерів.

4. Обґрунтовано, що для покращення партнерства та якості комунікацій між виконавцями, постачальниками та іншими стейкхолдерами доцільно застосовувати методи мережевого аналізу, зокрема підхід SNA (Social Network Analysis), що дозволяє виявити вузлові точки впливу, рівень взаємодії та потенційні комунікаційні розриви в мережі учасників проєкту. Важливими також є використання цифрових платформ для інтеграції інформаційних потоків, регулярне оновлення статусів учасників, імітаційне моделювання сценаріїв взаємодії та залучення CRM-систем для управління взаєминами. Доцільним визначено використання динамічних дашбордів і KPI-комплексів для прозорості виконання зобов'язань. Такі підходи сприяють

формуванню стійкої довіри, своєчасному реагуванню на зміни та підвищенню загальної ефективності комунікацій у проектах збірного будівництва.

5. Запроваджено аналітичний базис моделювання індикаторів успішності організації постачання з використанням цифрових інструментів та оновленого формату мережевої моделі. Основними процедурами базису є формування та застосування мережевої моделі нового типу, яка є функціонально-агрегованим графом, який сполучає ознаки: BIM-технологій, мережевих моделей «роботи-матриці», методу скінченних елементів та Fuzzy-технологій. Модель надає опис номенклатури та змісту робіт у межах циклу ПЗБ, що забезпечує відповідну структуризацією системи постачання щодо номенклатури, логістичних організацій, тарифів, графіків та бюджетів.

6. В складі аналітичного базису цифрового опису ПЗБ запроваджено інноваційну систему оцінки продуктивності процесів та підсистеми управління постачанням. До складу цієї системи включено 2 групи індикаторів. До складу першої групи включено 15 «натуральних» індикаторів виміру тривалості, часу реагування на заявку, прямі та супровідні витрати на «логістично-транспортний» комплект тощо. До другої групи відносяться нечітко-логічні показники оцінювання, що характеризуються за станами надійності (семантична шкала) та бальною оцінкою (від 1 до 14). Серед цієї групи показники, що визначають ступінь узгодженості між учасниками щодо логістики, виконання та підготовки робіт; надійність постачальника; обґрунтованість цін і тарифів на постачання за умовами «приоб'єктного складу»; надійність та безпека маршрутів; рівень забезпечення функціонально-технічних стандартів щодо матеріалів та виробів, які постачаються.

7. Інтеграцію науково-теоретичних та методичних інновацій дослідження подано у вигляді *прикладного інструментарію організації постачання в ПЗБ* на ґрунті цифрових технологій. Інструментарій сполучає 7 модулів. Першим є модуль адаптації організаційної структури до вимог цифрового адміністрування та логістики, що забезпечує належну підготовку проєктів. Наступні модулі виконують функції BIM-планування, візуалізації та цифрового контролю. Четвертий модуль сприяє мінімізації втрат часу та ресурсів у процесі постачання через логістичну оптимізацію. П'ятий і шостий модулі здійснюють інтелектуальний аналіз ризиків, аналізуючи можливі сценарії впливу деструктивних факторів на процес постачання та весь цикл ПЗБ, пропонуючи відповідні коригувальні заходи. Ці модулі дозволяють прогнозувати та зменшувати вплив негативних чинників. Завершальний модуль здійснює підсумкову оцінку ефективності системи управління постачанням у межах ПЗБ..

8. Забезпечено спрямування компонент прикладного інструментарію на вияв належності дотримання директивних вимог в організації постачання для умов ПЗБ, на формування дієвих партнерських відносин та успішних комунікацій у досліджуваних будівельних проєктах. Методи мережевого аналізу, зокрема алгоритм напів-синхронного поширення міток (Semi-Synchronous Label Propagation Algorithms), були застосовані для оптимізації

комунікацій і партнерства у проєктах збірного будівництва. Ці методи дозволяють аналізувати та моделювати взаємодії між стейкхолдерами, виявляючи ключові зв'язки і потоки інформації, що підвищує ефективність комунікації. Ці методи допомагають автоматизовано класифікувати та визначати оптимальні шляхи для передачі важливої інформації, зменшуючи ризики та забезпечуючи стабільність постачання. Застосування таких компонент інструментарію дозволило створити адаптивну і стійку систему, що забезпечило швидке реагування на зміни та підтримку ефективного співробітництва серед усіх учасників проєкту.

9. Трансформація змісту науково-теоретичних та аналітичних результатів дослідження в *комплекс прикладних програм* для супроводу процесів постачання в складі циклу організації ПЗБ. Комплекс сполучає *6 програмних модулів*, кожен з яких з використанням різних цифрових інструментів виконує специфічні функції для оптимізації постачання в умовах ПЗБ. Перший модуль відповідає за адміністративно-управлінський регламент, інтегруючи стейкхолдерів і цифрові інструменти (BIM, ERP, CRM). Другий модуль орієнтований на вирішення задачі багатокритеріальної оптимізації стану підсистеми постачання в умовах нечіткої постановки. Нечітко-логічними критеріями визначено: своєчасність постачання; рівень логістичної надійності усіх підприємств-стейкхолдерів постачання; раціональність бюджету; узгодженість підсистеми постачання з організаційно-технологічною моделлю циклу підготовки та будівництва об'єкта; рівень цифрової адаптованості та прозорості постачання. Кожен критерій оцінюється за нечітко-логічною бальною шкалою від 1 до 14, де 1 позначає незадовільний стан, а 14 – абсолютно надійний стан. Всі критерії намагаються досягти максимуму, а їхні пріоритети враховуються через вектор пріоритетів що дозволяє формувати сукупне оптимальне рішення для поліпшення стану підсистеми постачання. *Третій* модуль синхронізує BIM-моделі з графіками поставок та генерує логістичні маршрути. *Четвертий* працює з динамічними сценаріями прогнозування стану постачання та стійкості до змін. *П'ятий* модуль моделює функціональні та соціально-економічні взаємодії між учасниками, підвищуючи комунікацію та партнерство. *Шостий*, завершальний, модуль в складі комплексу програм КПП формує остаточно скориговану організаційно-технологічну та цифрову модель організації постачання в складі циклу ПЗБ.

10. Обґрунтовано, що формування організаційно-технологічного та індикативно-цифрового простору функціональної стійкості середовища ПЗБ доцільно здійснювати шляхом інтеграції BIM-технологій, нечіткої логіки (Fuzzy Logic), штучного інтелекту та мережевого аналізу. BIM-модель виступає основою цифрової репрезентації всього циклу ПЗБ, дозволяючи візуалізувати логістику, ресурсне забезпечення та критичні вузли. Fuzzy-моделі застосовуються для адаптивної оцінки стійкості, логістичної надійності та узгодженості рішень. Алгоритми кластеризації та графового аналізу ідентифікують ключові спільноти в ланцюзі постачання та прогнозують можливі ризики. Впровадження цифрового моніторингу та машинного

навчання забезпечує оперативне реагування на зміни умов проєкту, дозволяючи зберігати продуктивність і стійкість організації циклу навіть за умов невизначеності.

11. Визначено пріоритети подальшого розвитку дослідження полягають у подальшому розвитку інструментів формалізованого моделювання системи організації будівництва девелоперського проєкту – шляхом комбінування таких моделей та аналітичних інструментів, що забезпечують належну вимірність завдань, функціональну стійкість і адаптивність досліджуваних проєктних систем. Науковий вектор спрямований на синтез моделей, які враховують невизначеність, взаємодію суб'єктів у логістичних мережах, а також застосування комбінацію засад поєднання інтелектуального моделювання, цифрової аналітики, реінжинірингу структур адміністративного управління проєктами, вартісно-орієнтованого менеджменту та сучасних управлінських концепцій. У прикладному аспекті пріоритетом є створення гнучких цифрових платформ в організації будівництва, що реалізують принципи багато-цільової модернізації структур управління та узгодженості дій всіх організацій-учасників проєкту. Це забезпечить функціонально-технологічну надійність та стратегічну стійкість проєктів збірного будівництва в умовах швидкоплинних змін і викликів повоєнного відновлення.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Монографії:

1. Дружинін М.А. Ідентифікація базових елементів техніко-економічних інновацій в сучасній системі будівельного девелопменту. *Машини, процеси, екологія, економіка та технологія будівництва (теорія, експеримент, ефективність застосування)*: кол. монографія / П.М. Куліков, Н.Є. Журавська, Д.О. Чернишев, М.А. Дружинін, О.М. Малихіна; Київ. нац. ун-т буд-ва і архітектури, Вінниц. нац. аграр. ун-т, Одес. нац. акад. зв'язку ім. О.С. Попова; уклад. І.І. Назаренко. Київ: Вид-во Людмила, 2020. С. 18-33. *Особистий внесок: автору належить формування складових теоретичного концепту адаптації будівельного девелопменту до функціонально-технічної специфіки проєктів збірного будівництва.*

2. Дружинін М.А. Використання інноваційних платформ для мінімізації опору змінам при реалізації стратегічних трансформацій у будівельних компаніях. Колективна монографія: Економіко-управлінський та організаційно-технологічний інструментарій стратегічних інновацій в будівництві. Київ, 2025. С. 213-238. *Особистий внесок: автору належить опис методико-прикладного підходу подолання ризиків опору змінам при підготовці та організаційно-технологічному обґрунтуванні проєктів збірного будівництва.*

3. Дружинін М.А. Інновації в організації функціонально-цифрового супроводу процесів постачання в проєктах збірного будівництва (розділ 5.1) / Колективна монографія: Організаційно-технологічний девелопмент та інтегрована реалізації проєктів в будівництві. К.: ПП Сердюк В.Л., 2024. - С.113-124. *Особистий внесок: автор обґрунтував необхідність розробки*

системно-технічного підходу та інструментарію до проектування, виготовлення, зведення та експлуатації будівельних систем у форматі «збірне будівництво», що дозволяє стандартизувати процеси, підвищити контроль якості та скоротити загальний час будівництва.

Статті у наукових періодичних виданнях, проіндексованих у базах даних Scopus та Web of Science Core Collection:

4. Rogovskii I.L., Reznik N.P., Druzhynin M.A., Titova L.L., Nychay I.M., Nikulina O.V. Non-uniform field of concrete deformations of circular crosssection columns under cross bending applying digital image correlation method. *Studies in Systems, Decision and Control*, 2024, vol 489. pp 939–951. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-36895-0_79 (SCOPUS). *Особистий внесок: автору належить опис процедур застосування методу кореляцій цифрових зображень при обґрунтуванні організаційно-технологічних рішень щодо організації збірного будівництва.*

5. Trach R., Khomenko O., Trach Yu., Kulikov O., Druzhynin M. Application of Fuzzy Logic and SNA Tools to Assessment of Communication Quality between Construction Project Participants. *Sustainability*, 2023, 15(7), 5653. <https://doi.org/10.3390/su15075653>. (SCOPUS) *Особистий внесок: автору належить відображення аналітичних процедур нечіткої логіки для поліпшення комунікацій між девелопером та виконавцями проєктів збірного будівництва.*

6. Ryzhakov D., Dikiy O., Druzhynin M., Petrenko H., Savchuk T. Innovative Tools for Management the Lifecycle of Strategic Objectives of the Enterprise-Stakeholder in Construction. *International Journal of Emerging Trends in Engineering*. 2020. Vol. 8. No 8. Pp. 4526-4532. <http://www.warse.org/IJETER/static/pdf/file/ijeter78882020.pdf>. <https://doi.org/10.30534/ijeter/2020/78882020>. (SCOPUS). *Особистий внесок: автору належить виклад цифрових інструментів адаптації циклу проєктів збірного будівництва до життєвого циклу організації-виконавця.*

7. Ryzhakova G., Chernyshev D., Druzhynin M., Petrenko H., Savchuk T., Honcharenko T. Methodological Regulation of Business Processes Reengineering in the Modern Construction Development System. *International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE)*. 2020. Vol. 8. Issue 5. Pp. 5046-5053. DOI:10.35940/ijrte.E6947.018520. (SCOPUS). *Особистий внесок: автору належить формалізація опису процесів адаптації організаційних структур управління будівельної організації до діяльності у функціональних умовах будівельного девелопменту.*

Статті в наукових фахових виданнях України категорії Б, що входять до наукометричних баз даних:

8. Чернишев Д., Дружинін М., Шпакова Г. Визначення динамічних характеристик складних просторових конструкцій в частотно-часовому просторі проєктів біосферосумісного будівництва. *Будівельні конструкції: теорія і практика*. 2019. Вип. 4. С. 21-27. DOI: <https://doi.org/10.32347/2522-4182.4.2019.21-27>. *Особистий внесок: автору належить врахування складаних*

просторових характеристик об'єкту при формуванні організаційно-технологічних параметрів девелоперського проєкту.

9. Чернишев Д., Дружинін М., Шпакова Г. Застосування методу скінченних елементів в практиці організаційно-технологічного моделювання девелоперських проєктів. *Будівельні конструкції: теорія і практика*. 2019. Вип. 5. С. 4-7. DOI: <https://doi.org/10.32347/2522-4182.5.2019.4-7>. *Особистий внесок: автору належить виклад можливостей застосування методу скінченних елементів до формалізації цифрового простору девелопменту в проєктах збірного будівництва.*

10. Чернишев Д.О., Дружинін М.А., Малихіна О.М., Предун К.М., Петруха С.В. Модернізація методичних підходів до організаційно-технологічного та економіко-адміністративного супроводу проєктів біосферосумісного будівництва. *Містобудування та територіальне планування*. 2019. Вип. 71. С. 409-433. DOI: <https://doi.org/10.32347/2076-815x.2019.71.409-433>. *Особистий внесок: автору належить відбір методичних компонент для здійснення організаційно-технологічного супроводу проєктів збірного будівництва.*

11. Чернишев Д.О., Дружинін М.А., Малихіна О.М., Предун К.М., Петруха С.В. Формування методичного підґрунтя інвестиційного контролінгу на платформі BIM-технологій: сучасна практика містобудівних інновацій. *Сучасні проблеми архітектури та містобудування*. 2019. Вип. 55. С. 243-260. DOI: <https://doi.org/10.32347/2077-3455.2019.55.243-160>. *Особистий внесок: автору належить розробка щодо оптимізації зв'язків між організаціями-учасниками ПЗБ із використанням BIM-технологій.*

12. Чернишев Д.О., Дружинін М.А., Кондрацький В.О. Економіко-адміністративна та структурна топологія взаємодії підприємств-учасників проєктів житлового будівництва. *Управління розвитком складних систем*. 2019. Вип. 39. С. 164-170. DOI: [10.6084/m9.figshare.11340713](https://doi.org/10.6084/m9.figshare.11340713). *Особистий внесок: автору належить застосування мережевого аналізу для вдосконалення партнерських відносин між виконавцями проєктів збірного будівництва.*

13. Чернишев Д.О., Дружинін М.А., Предун К.М., Приходько Д.О., Горбач М.В. Вдосконалення системи функціональних економіко-технологічних та екологічних оцінок біосферосумісного розвитку. *Управління розвитком складних систем*. 2019. Вип. 40. С. 193-201. DOI: [10.6084/m9.figshare.11969760](https://doi.org/10.6084/m9.figshare.11969760). *Особистий внесок: автору належить побудова системи організаційно-технологічних індикаторів успішності будівельних девелоперських проєктів.*

14. Предун К.М., Чернишев Д.О., Дружинін М.А., Малихін М.О. Економічні, організаційно-технологічні та управлінські аспекти екологізації діяльності стейкхолдерів енергопостачання на ґрунті біосферосумісності. *Управління розвитком складних систем*. 2020. Вип. 42. С. 193-198. DOI: [10.32347/2412-9933.2020.42.193-198](https://doi.org/10.32347/2412-9933.2020.42.193-198). *Особистий внесок: автору належить налаштування організаційно-технологічних параметрів організацій-учасників проєкту до сучасних вимог біосферосумісності.*

15. Дружинін М.А., Геращенко О.П., Кошельний І.А., Костенко Д.В. Операційно-виробничі та управлінсько-адміністративні імперативи девелопменту інвестиційно-будівельних проєктів. *Просторовий розвиток*. 2022. Вип. 1. С. 183-196. DOI: <https://doi.org/10.32347/2786-7269.2022.1.183-196>. *Особистий внесок: автору належить трансформації страагем організаційно-технологічного девелопменту до специфіки проєктів збірного будівництва.*

16. Дружинін М.А., Жалдак Р.Ю., Ніколаєва М.Ю. Оновлення моделей організації будівництва в контексті адаптогенності до сучасних управлінських та цифрових технологій. *Управління розвитком складних систем*. 2022. Вип. 52. С. 73-83. DOI: [10.32347/2412-9933.2022.52.73-83](https://doi.org/10.32347/2412-9933.2022.52.73-83). *Особистий внесок: автору належить адаптація мережевої моделі «роботи-вершини» до специфіки девелоперського проєкту збірного будівництва.*

17. Хоменко О.М., Цзін Ц., Приходько О.О., Дружинін М.А. Сучасна технологія моделювання організаційної підготовки та девелоперського супроводу проєктів будівництва. *Просторовий розвиток*. 2023. Вип. 3. С. 162-172. DOI: <https://doi.org/10.32347/2786-7269.2023.3.162-172>. *Особистий внесок: автору належить виклад змісту та порядок імплементації складових етапів цифрового обґрунтування до складу підготовки проєкту збірного будівництва.*

18. Мудра М.С., Кричевська Ю.В., Дружинін М.А., Хоменко О.М. Формування цифрових індикаторів та бізнес-процедур оцінки інноваційного розвитку будівельного підприємства. *Нові технології в будівництві*, 2023. № 43. С. 102-112. DOI: <https://doi.org/10.32782/2664-0406.2023.43.13>. *Особистий внесок: автору належить цифровий опис реалізації можливостей функціонального та технологічного розвитку для певної організації-виконавця в проєкті збірного будівництва.*

19. Антипенко Є.Ю., Жалдак Р.Ю., Дружинін М.А. Модернізація методологічних підходів до організаційно-технологічного та економіко-управлінського супроводу девелоперських проєктів. *Управління розвитком складних систем*. 2023. Вип. 56. С. 116-122. DOI: [10.32347/2412-9933.2023.56.116-122](https://doi.org/10.32347/2412-9933.2023.56.116-122). *Особистий внесок: автору належить опис процедур ідентифікації спільнот та використанням алгоритмів виділення кластерів в складі завдань організаційно-технологічного супроводу проєктів будівництва.*

20. Дружинін М.А. Формування загально-методичних вимог щодо запровадження та побудови інструментарію організаційно-технологічного супроводу проєктів будівництва. *Просторовий розвиток*. 2024. Вип. 7. С. 221-232. DOI: <https://doi.org/10.32347/2786-7269.2024.7.221-232>.

21. Дружинін М.А. Методологічні та прикладні компоненти впровадження девелоперських проєктів об'єктно-цільових реновацій в будівництві. *Містобудування та територіальне планування*. 2024. Вип. 85. С. 146-158. DOI: <https://doi.org/10.32347/2076-815x.2024.85.146-158>.

22. Зайчук С.В., Дружинін М.А., Хоменко О.М. Економічні та функціонально-операційні імперативи формування господарського портфеля підприємства-девелопера в будівництві. *Управління розвитком складних*

систем. 2024. № 57. С. 130–138. DOI: 10.32347/2412-9933.2024.57.130-138. *Особистий внесок: автору належить застосовування вимог цифрової трансформації, екологічної стійкості та впровадження модульного будівництва як основи трансформацій та підвищення ефективності девелоперських проєктів.*

23. Дружинін М.А., Малихін М.О., Степанюк Р.Б. Інтеграція прикладних модулів IPD до складу організаційно-технологічних інструментів управління будівництвом. *Містобудування та територіальне планування*. 2024. Вип. 86. С. 261-271. DOI: <https://doi.org/10.32347/2076-815x.2024.86.261-271>. *Особистий внесок: автору належить обґрунтування переваг Integrated Design Process до вимог цифрової формалізації проєктів збірного будівництва та зростання узгодженості між учасниками.*

24. Дружинін М.А., Малихін М.О., Степанюк Р.Б. Науково-прикладні засади організаційно-технологічного моделювання девелоперських проєктів у форматі стратегічних інновацій. *Містобудування та територіальне планування*. 2024. Вип. 87. С. 193-205. DOI: <https://doi.org/10.32347/2076-815x.2024.87.193-205>. *Особистий внесок: автору належить систематизація науково-прикладні підходи щодо залучення сучасних цифрових технологій до завдань підвищення ефективності управління ланцюгом постачання при реалізації ПЗБ.*

25. Дружинін М.А., Хоменко О.М., Рижакова Г.М. Методологічний концепт і прикладні засади адаптогенної організації будівництва з урахуванням сучасних інноваційно-інвестиційних трендів. *Управління розвитком складних систем*. 2024. № 59. С. 182–190. DOI: 10.32347/2412-9933.2024.59.182-190. *Особистий внесок: автору належить розробка методичних основ та аналітичної системи формалізованого адміністрування в проєктах збірного будівництва.*

26. Дружинін М.А., Степанюк Р.Б. Цифрові моделі організації будівництва на ґрунті інтеграційного підходу та SMART-управління. *Управління розвитком складних систем*. 2024. № 60. С. 165–173. DOI: 10.32347/2412-9933.2024.60.165-173. *Особистий внесок: автором обґрунтовано шляхи та інструменти адаптації мережесих моделей до вимог проєктів збірного будівництва, що впроваджують на ґрунті SMART-управління.*

27. Онікієнко Н.В., Дружинін М.А., Кончаківський О.І. Структурно-динамічні виміри функціонування підприємств-учасників інтеграційних формувань на платформі будівельного девелопменту. *Просторовий розвиток*. 2024. Вип. 9. С. 387-401. DOI: <https://doi.org/10.32347/2786-7269.2024.9.387-401>. *Особистий внесок: автору належить визначення концептуально-теоретичних аспектів трансформації середовища будівельних девелоперських проєктів до формату цифрової екосистеми.*

28. Дружинін М.А., Степанюк Р.Б., Антипенко Є.Ю. Формування аналітичних компонент інтегрованої реалізації будівельного проєкту як цифрової екосистеми. *Просторовий розвиток*. 2024. Вип. 10. С. 287-300. DOI: <https://doi.org/10.32347/2786-7269.2024.10.287-300>. *Особистий внесок: автору*

належить обґрунтування аналітичних компонент інтегрованої реалізації будівельного ПЗБ у форматі цифрової екосистеми, з використання BIM-модельовання, Інтернету речей та штучного інтелекту.

29. Дружинін М.А., Малихіна О.М., Гергі М.С. Базові функціонали організації та управління будівництвом в концепті цифрової трансформації операційних систем підприємств-стейкхолдерів. *Будівельне виробництво*, 2024, (78), С. 22-29. DOI: <https://doi.org/10.36750/2524-2555.78.22-29>. *Особистий внесок: автору належить шлях оптимізації системи підготовки та цифрового адміністрування в проєктах збірного будівництва.*

30. Дружинін М.А. Інноваційні напрями організації збірного будівництва в умовах нестабільного середовища девелопменту у воєнний та післявоєнний періоди. *Просторовий розвиток*. 2025. Вип. 11. С. 354-367.

Статті в наукових періодичних виданнях інших держав:

31. Khomenko O., Druzhynin M., Prykhodko O., Zhaldak R., Zaichuk S. Organization and management of digital transformation of business structures in construction development. *News of Science and Education*, 2022, № 1(9). UR: <https://journals.indexcopernicus.com/search/journal/issue?issueId=323990&journalId=3231>. *Особистий внесок: автору належить визначення етапів реалізації стратегії цифрової трансформації діяльності будівельного підприємства для підвищення «цифрової готовності» учасників девелоперських проєктів.*

Матеріали конференцій, де здійснено апробацію роботи:

32. Дружинін М.А. Практика організації біосферосумісного будівництва в контексті реалізації концепції «sustainable development». *Зелене будівництво: Матеріали I Міжнародної науково-практичної конференції*. (12-13 листопада 2019 р., м. Київ). Миколаїв: Видавець Торубара В.В., 2019. С. 204-206.

33. Дружинін М.А. Реорганізація організаційно-технологічного інструментарію енергоощадного девелопменту в будівництві. *Просторовий розвиток територій: традиції та інновації*: Матеріали I Міжнар. наук.-практ. конф. Київ: ДКС Центр, 2019. С. 196-198.

34. Дружинін М.А. Оновлення функціонально-технічних підходів до землевпорядкування та ревіталізації територій міської забудови із залученням єврокодів. *Сучасний стан та перспективи розвитку економіки, логістики та технологій в Україні*: програма та тези доповідей Всеукраїнської науково-практичної конференції. Ніжин: Північний міжрегіональний науковий центр НААН України, 2019. С. 9.

35. Дружинін М.А. Модернізований методико-прикладний підхід щодо планування заходів ревіталізації постіндустріального простору міського середовища. *Економіко-управлінські та інформаційно-аналітичні новації в будівництві*: міжнародна наук.-практ. конференція (23-24 травня 2019 р., м. Київ). К.: Вид-во Ліра-К, 2019. С.63- 64.

36. Дружинін М.А. Стратегічна параметризація та інституціональні важелі нової архітекτονіки просторово-локалізованих систем. *Просторовий розвиток*

територій: традиції та інновації: матеріали II міжнар. наук.-практ. конференції. Київ: ДКС Центр, 2020. С.181-194.

37. Дружинін М.А. Імплементация індикаторів біосферосумісності до системи формалізованого управління територіями. *Актуальні проблеми управління соціально-економічними системами: матеріали VI Міжнар. наук.-практ. інтернет-конференція, 11 грудня 2020 р., Луцьк: ІВВ Луцького НТУ, 2020. С. 103-104.*

38. Дружинін М.А. Сучасні предиктори інвестиційних програм девелопменту збірного будівництва. *Актуальні проблеми освітнього процесу в контексті європейського вибору України: матеріали IV Всеукраїнського круглого столу з міжнародною участю (17 листопада 2021 року) до 75-річчя з дня створення Організації Об'єднаних Націй з питань освіти, науки і культури (ЮНЕСКО)». К.: КНУБА, 2021. С. 293-295.*

39. Дружинін М.А. Діагностика рівня управлінсько-технологічної зрілості підприємств в складі міжгалузевого територіально-будівельного кластера. *Проблеми генезису економіки інтелектуально-інноваційного капіталу: матеріали IV Міжнародної науково-практичної конференції, К, КНУБА, 2021. С. 16*

40. Druzhynin M. The modern scientific and applied format of the functional-digital support system for prefabricated construction organization. *Економіко-управлінські та інформаційно-аналітичні новації в будівництві: матеріали міжнародної науково-практичної конференції. К.: КНУБА, 2022. ч.2. С. 48-51.*

41. Дружинін М.А. Модернізація методико-аналітичних інструментів функціонально-цифрового супроводу організації збірного будівництва *Програма круглого столу «Налаштування освітніх траєкторій в підготовці менеджерів будівництва в контексті відбудови України».* К.: КНУБА, 2023. С. 22.

42. Дружинін М.А. Сучасні підходи до цифрового управління та методологічні основи моделювання організаційно-технологічних процесів у логістиці для забезпечення будівельних проєктів у сфері девелопменту. *Бізнес-форум Вектори управлінських, операційних, цифрових та технологічних трансформацій будівництва в умовах викликів воєнного часу".* К.: КНУБА, 2024, С. 14.

43. Дружинін М. Конкурентоспроможність підприємства в сучасних умовах. *Американські стандарти освіти в Україні» в рамках проєкту «Впровадження американських стандартів освіти в Україні: громадянська участь, підвищення якості та демократичний розвиток: матеріали III міжнародної науково-практичної конференції. 14-15 червня 2024 року, Київ. С. 31-33.*

44. Дружинін М.А. Сучасні технології моделювання організаційної підготовки та девелоперського супроводу проєктів будівництва. *Проблеми генезису економіки інтелектуально-інноваційного капіталу: матеріали V міжнародної науково-практичної конференції . К.: КНУБА, 2024. С. 387-390.*

45. Дружинін М. Сучасна парадигма цифрового адміністрування та загально-методологічний базис організаційно-технологічного моделювання логістичного забезпечення проєктів будівельного девелопменту. V Міжнародна науково-практична конференція «Енергоощадні машини і технології», присвячена 60-річчю від дня заснування факультету автоматизації і інформаційних технологій. К.: КНУБА, 2024. С. 34

46. Дружинін М. Передумови модернізації організаційно-технологічних та логістичних моделей девелоперських будівельних проєктів. *Маркетингові стратегії, підприємництво: сучасний стан, напрямки розвитку*: матеріали V міжнар. наук.-практ. інтернет-конференції: тези доповідей. Київ: 2024. С. 170-174.

47. Дружинін М. Сучасні підходи до цифрового управління та загальні методологічні засади моделювання організаційно-технологічних процесів у логістиці для підтримки будівельних проєктів девелопменту. *Управлінські, економічні, облікові, організаційно-технологічні, цифрові та комунікаційні аспекти поліпшення освітнього та наукового процесів як імперативи трансформації будівельної галузі*: програма та тези доповідей круглого столу. Київ: КНУБА, 2024. С. 12.

АНОТАЦІЯ

Дружинін М.А. Система функціонально-цифрового супроводу організації збірного будівництва. – *Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.*

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.23.08 – технологія та організація промислового та цивільного будівництва. Київський національний університет будівництва і архітектури Міністерства освіти і науки України, Київ, 2025.

У дисертації розв'язано актуальну теоретико-методичну та науково-прикладну проблему – обґрунтовано й сформовано систему функціонально-цифрового супроводу організації постачання як ключового елементу організації циклу в девелоперських проєктах збірного будівництва (ПЗБ). Запропонована система представлена у вигляді інноваційного діджитал-адаптованого середовища для прийняття організаційно-технологічних рішень, яке поєднує цифрові інструменти, управлінські підходи та організаційні технології з метою забезпечення ефективної координації, стійкості та гнучкості логістичних процесів у межах реалізації ПЗБ.

Визначальною інновацією роботи є обґрунтування наукових засад та прикладного базису системи функціонально-цифрового супроводу організації постачання в ПЗБ. Запропонована система спирається на міждисциплінарний підхід, який охоплює BIM-моделювання, цифрові технології, метод скінченних елементів, нечітку логіку, машинне навчання та мережевий аналіз. Використано суттєво модернізовану цифрову модель «елементи-роботи», нечітко-логічні критерії, алгоритми кластеризації для виявлення спільнот у ланцюзі постачання та інструменти прогнозування стійкості логістичних зв'язків. Всі науково-методичні та аналітичні компоненти дослідження інтегровано у єдиний цифровий простір, що забезпечує комплексну оптимізацію процесів організації постачання в системі девелопменту ПЗБ.

В роботі вперше обґрунтовано: теоретичний концепт функціонального супроводу девелоперських проєктів збірного будівництва на основі цифрових технологій, що передбачає інтегроване управління всіма етапами життєвого циклу ПЗБ - від проектування до експлуатації. Сформовано міждисциплінарний методичний базис опису, моделювання та оптимізації ПЗБ, що поєднує інструменти будівельного девелопменту, імітаційного моделювання, мережевого аналізу, управління ланцюгами постачання та клієнтськими відносинами. У роботі застосовано також системний, процесний, ситуаційний підходи та принципи реінжинірингу. Окремо розроблено аналітико-прикладний інструментарій для цифрової оптимізації управління постачанням, до складу якого входять Fuzzy Logic-моделі, мережевий аналіз партнерських взаємодій і модулі оцінки впливу інтелектуальних систем. Усі компоненти інтегровано у цифрову екосистему підтримки збірного будівництва.

Реалізовано суттєве удосконалення науково-методичного підходу до застосування BIM-технологій у формалізації та цифровому супроводі

девелоперських проєктів збірного будівництва. BIM використано як основу для створення комплексної моделі, що охоплює весь життєвий цикл об'єкта й інтегрує всіх учасників у єдине цифрове середовище. Удосконалено методичні підходи до застосування нечіткої логіки, зокрема через розробку моделей оцінки стійкості ланок постачання з урахуванням невизначеності та динаміки проєктного середовища. Важливою інновацією є вирішення задачі багатокритеріальної оптимізації стану підсистеми постачання ПЗБ в умовах нечіткої постановки. В якості нечіто-логічних критеріїв визначено: своєчасність постачання; рівень логістичної надійності усіх підприємств-стейкхолдерів постачання; раціональність бюджету; узгодженість підсистеми постачання з організаційно-технологічною моделлю циклу підготовки та будівництва об'єкта; рівень цифрової адаптованості та прозорості постачання. Кожен критерій оцінюється за нечітко-логічною бальною шкалою від 1 до 14, де 1 позначає незадовільний стан, а 14 – абсолютно надійний стан. Всі критерії намагаються досягти максимуму, а їхні пріоритети враховуються через вектор пріоритетів, що дозволяє формувати сукупне оптимальне рішення для поліпшення стану підсистеми постачання. Застосовано алгоритми кластеризації для оптимізації ресурсів і взаємодій, а мережевий аналіз і машинне навчання забезпечують стратегічну стійкість, точність прогнозів та автоматизацію управлінських рішень у логістиці.

Науково-теоретичні, методичні та аналітичні результати дослідження були реалізовані у вигляді комплексу з 6 прикладних програмних модулів. Перший модуль інтегрує стейкхолдерів і цифрові інструменти (BIM, ERP, CRM). Другий модуль вирішує задачу багатокритеріальної оптимізації підсистеми постачання в умовах нечіткої постановки. Третій синхронізує BIM-моделі з графіками поставок. Четвертий моделює динамічні сценарії прогнозування постачання. П'ятий покращує комунікацію між учасниками, а шостий формує скориговану цифрову модель постачання в рамках ПЗБ.

Практична цінність одержаних результатів полягає у їх спрямуванні для успішної підготовки та організації постачання в збірному будівництві: забезпечено адаптивність до змін, зниження ризиків та підвищення стійкості логістичних мереж, що є важливим інструментом для цифрової трансформації будівельної галузі, особливо в контексті відновлення інфраструктури України. Практичне значення результатів дисертації підтверджено їх впровадженням у підготовку та реалізацію проєктів збірного будівництва, зокрема в проєктах: «Посад-Покровський», «ДіамандХіл», «Будівництво заводу із склофібробетону за участю компанії Power-SpraysLtd», та в науково-дослідній тематиці КНУБА. Окремі компоненти дослідження інтегровані в освітній процес КНУБА для підготовки фахівців за спеціальністю 192 «Будівництво та цивільна інженерія».

Ключові слова: проєкт збірного будівництва (ПЗБ); організація будівництва, підсистема постачання в циклі ПЗБ; функціонально-цифровий супровід; міждисциплінарний підхід, BIM-технології; інструменти формалізованого опису постачання в циклі ПЗБ; алгоритми кластеризації; оптимізація стану постачання в ПЗБ на ґрунті нечітко-логічних критеріїв.

ABSTRACT

Druzhynin M.A. System of functional and digital support of the organization of prefabricated construction. – *Qualification scientific work in the form of a manuscript.*

Dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences in the specialty 05.23.08 – technology and organization of industrial and civil construction. – Kyiv National University of Construction and Architecture of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2025.

The dissertation solves a topical theoretical, methodological and scientific-applied problem – it substantiates and forms a system of functional and digital support for the organization of supply as a key element of the cycle organization in prefabricated construction (PCP) development projects. The proposed system is presented in the form of an innovative digital-adapted environment for making organizational and technological decisions, which combines digital tools, management approaches and organizational technologies in order to ensure effective coordination, stability and flexibility of logistics processes within the framework of the implementation of PCP.

The defining innovation of the work is the substantiation of the scientific principles and applied basis of the system of functional and digital support of the supply organization in prefabricated construction projects. The proposed system is based on an interdisciplinary approach that includes BIM modelling, digital technologies, the finite element method, fuzzy logic, machine learning and network analysis. A significantly modernized digital model of “elements-robots”, Fuzzy-logical criteria, clustering algorithms for identifying communities in the supply chain and tools for predicting the stability of logistics connections were used. All scientific, methodological and analytical components of the study are integrated into a single digital space, which provides comprehensive optimization of supply organization processes in the PCP development system.

The work substantiates for the first time: the theoretical concept of functional support of development projects of prefabricated construction based on digital technologies, which provides for integrated management of all stages of the life cycle of prefabricated construction – from design to operation. An interdisciplinary methodological basis for the description, modelling and optimization of prefabricated construction has been formed, combining tools of construction development, simulation modelling, network analysis, supply chain management and customer relations. The work also applies systemic, process, situational approaches and principles of reengineering. Separately, an analytical and applied toolkit for digital optimization of supply management has been developed, which includes Fuzzy Logic models, network analysis of partner interactions and modules for assessing the impact of intelligent systems. All components are integrated into a digital ecosystem for supporting prefabricated construction.

A significant improvement of the scientific and methodological approach to the application of BIM technologies in the formalization and digital support of

prefabricated construction development projects has been implemented. BIM has been used as the basis for creating a comprehensive model that covers the entire life cycle of the facility and integrates all participants into a single digital environment. Methodological approaches to the application of fuzzy logic have been improved, in particular through the development of models for assessing the stability of supply chains, taking into account the uncertainty and dynamics of the project environment. An important innovation is solving the problem of multi-criteria optimization of the state of the PCP supply subsystem in conditions of fuzzy formulation. The following fuzzy-logical criteria have been defined: timeliness of supply; level of logistical reliability of all supply stakeholder enterprises; budget rationality; consistency of the supply subsystem with the organizational and technological model of the facility preparation and construction cycle; level of digital adaptability and transparency of supply. Each criterion is evaluated on a fuzzy-logical scoring scale from 1 to 14, where 1 indicates an unsatisfactory state, and 14 – a completely reliable state. All criteria try to achieve a maximum, and their priorities are taken into account through a vector of priorities, which allows forming an aggregate optimal solution to improve the state of the supply subsystem. Clustering algorithms are used to optimize resources and interactions, and network analysis and machine learning provide strategic stability, forecast accuracy and automation of management decisions in logistics.

The scientific-theoretical, methodological and analytical results of the study were implemented in the form of a complex of 6 applied software modules. The first module integrates stakeholders and digital tools (BIM, ERP, CRM). The second module solves the problem of multi-criteria optimization of the supply subsystem under fuzzy conditions. The third synchronizes BIM models with supply schedules. The fourth models dynamic supply forecasting scenarios. The fifth improves communication between participants, and the sixth forms an adjusted digital supply model within the framework of the PCP.

The practical value of the results obtained lies in their direction for successful preparation and organization of supply in prefabricated construction: adaptability to changes, risk reduction and increased resilience of logistics networks are ensured, which is an important tool for the digital transformation of the construction industry, especially in the context of the restoration of Ukraine's infrastructure. The practical significance of the dissertation results is confirmed by their implementation in the preparation and implementation of prefabricated construction projects, in particular in the projects: "Posad-Pokrovsky", "Diamond Hill", "Construction of a glass fiber concrete plant with the participation of the company Power-Sprays Ltd", and in the scientific and research topics of KNUCA. Separate components of the study are integrated into the educational process of KNUCA for the training of specialists in specialty 192 "Construction and Civil Engineering".

Keywords: prefabricated construction project (PCP); construction organization, supply subsystem in the PCP cycle; functional and digital support; interdisciplinary approach; BIM technologies; tools for formalized description of supply in the PCP-cycle; clustering algorithms; optimization of supply status in PCP based on fuzzy-logical criteria.