

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ**

Кваліфікаційна наукова праця  
на правах рукопису

**ДАНІЛОВ СЕРГІЙ ЮРІЙОВИЧ**

УДК 69.003:005.52:004.94:519.86

**ДИСЕРТАЦІЯ**

**МОДЕЛІ ТА МЕТОДИ МУЛЬТИАГЕНТНОГО РОЗПОДІЛУ  
ТРУДОВИХ РЕСУРСІВ В СЕРЕДОВИЩІ БУДІВЕЛЬНИХ  
ДЕВЕЛОПЕРСЬКИХ ПРОЄКТІВ В УМОВАХ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ**

192 – Будівництво та цивільна інженерія

19 – Архітектура та будівництво

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

\_\_\_\_\_ С.Ю.Данілов

Науковий керівник: Приходько Дмитро Олександрович, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри менеджменту в будівництві Київського національного університету будівництва та архітектури

Київ – 2026

## АНОТАЦІЯ

**Данілов С. Ю. Моделі та методи мультиагентного розподілу трудових ресурсів в середовищі будівельних девелоперських проєктів в умовах невизначеності. - Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.**

Дисертація на здобуття ступеня доктора філософії з галузі знань 19 «Архітектура та будівництво» за спеціальністю 192 «Будівництво та цивільна інженерія». - Київський національний університет будівництва і архітектури. – Київ, 2026.

Дисертаційне дослідження присвячене науково-методичному обґрунтуванню, розробленню та практичній перевірці моделей і методів мультиагентного управління трудовими ресурсами в умовах будівельних девелоперських проєктів за невизначених умов. Робота спрямована на створення інтелектуальної системи управління персоналом — як підсистеми організації будівництва в девелоперському проєкті — компоненти, здатної до адаптації, самонавчання та оптимізації взаємодії агентів з урахуванням динамічних змін внутрішнього та зовнішнього середовища. Реалізація поставленої мети передбачає формування методичного інструментарію, що забезпечує цифрову інтегрованість, гнучкість та підвищення ефективності організаційно-трудова процесів у будівельному девелопменті на принципах інноваційності та сталого розвитку.

*Нагальність проведення дослідження обумовлюється потребою модернізації систем управління трудовими ресурсами в будівельній галузі з урахуванням принципів цифрової економіки та сучасних практик будівельного девелопменту. У контексті переходу до інтелектуалізованих девелоперських процесів зростає значення мультиагентних моделей, що забезпечують ефективну координацію розподілу праці між учасниками проєктів, знижуючи рівень невизначеності та підвищуючи продуктивність. Для будівельних підприємств актуальним стає впровадження ІТ-інструментів управління персоналом у цифрові платформи BIM, ERP та PLM, що формують нову організаційну архітектуру праці. Цифровий працівник виступає*

активним агентом інформаційної взаємодії, носієм даних та аналітичним учасником управлінських рішень. У таких системах зростає роль цифрового лідерства, алгоритмізації процесів і розвитку когнітивної гнучкості персоналу. Це створює умови для адаптації підприємств до вимог енергоефективного, екологічного та технологічно інтегрованого будівництва. Поєднання мультиагентних моделей із концепцією цифрового працівника формує підґрунтя для переходу від ієрархічного до децентралізованого управління. Такий підхід підвищує конкурентоспроможність і стійкість девелоперських структур у цифровому середовищі.

*У першому розділі дисертації представлено результати концептуально-теоретичних досліджень, спрямованих на формування наукових основ розробки моделей і методів мультиагентного розподілу трудових ресурсів у середовищі будівельних девелоперських проєктів за умов невизначеності. Проведено системний аналіз розвитку підходів до управління персоналом у будівництві, що здійснювався під впливом цифрової трансформації та динаміки сучасних ІТ-систем. Висвітлено роль інтеграції інноваційних та цифрових технологій у HR-менеджмент будівельних компаній як чинника підвищення продуктивності, адаптивності та стабільності проєктних команд. Розроблено теоретичні засади концепції «цифрового працівника девелоперського проєкту», що виступає активним агентом мультиагентної взаємодії та забезпечує узгодженість процесів планування, координації та прийняття рішень у BIM- і ERP-середовищах. Систематизовано типи невизначеності, притаманні будівельним девелоперським проєктам, визначено їх вплив на поведінкові стратегії агентів та організаційні моделі розподілу трудових ресурсів. Обґрунтовано необхідність трансформації ієрархічних структур управління персоналом у гнучкі, мережеві форми, орієнтовані на цифрову взаємодію та самоорганізацію. Висвітлено ключові принципи цифрового лідерства, розвитку інноваційного потенціалу та адаптивності як основи стійкості мультиагентних систем управління трудовими ресурсами. Показано, що застосування мультиагентних моделей у*

поєднанні з цифровими технологіями створює умови для ефективної координації дій учасників проєктів, підвищення продуктивності команд та забезпечення стратегічної стійкості девелоперських структур у цифровому середовищі.

*Другий розділ* дисертаційної роботи присвячено формуванню методичного базису дослідження моделей і методів мультиагентного розподілу трудових ресурсів у середовищі будівельних девелоперських проєктів за умов невизначеності. Методичний базис розроблено із застосуванням комплексу універсальних та спеціальних методів, що забезпечують системність та гнучкість дослідження. До універсальних методів віднесено системний, структурно-функціональний, порівняльний та економіко-математичний аналіз, моделювання і експертні оцінки. Спеціальні методи охоплюють мережеве моделювання, мультиагентне програмування, цифрову симуляцію, а також інструменти адміністративного менеджменту, що дозволяють формалізувати управлінські процеси девелоперського циклу. Інтеграція цих методів забезпечує створення єдиної аналітичної платформи, яка поєднує цифрові технології, управлінські рішення та механізми стратегічної адаптації. У межах розділу обґрунтовано методику оцінювання інноваційної спроможності підприємств-учасників будівельних девелоперських проєктів як ключового чинника їх здатності до управлінських змін. Розроблено інтеграційну модель механізмів нарощування інноваційного потенціалу, що включає технологічні, кадрові, інформаційні, організаційні, фінансові та культурні складові. Значна увага приділена формуванню моделей реактивної адаптації агентів, які імітують поведінку трудових ресурсів у змінних умовах, з урахуванням параметрів нечіткої логіки, сценарного аналізу та ймовірнісних залежностей. На основі цих положень сформовано архітектуру агентної взаємодії, що забезпечує гнучкість і самонавчання системи. Досліджено конфігурацію операційної діяльності девелоперських структур як багаторівневу динамічну систему, яка інтегрує логістичні, фінансові, інформаційно-аналітичні та технологічні модулі. Такий підхід

дозволяє розглядати операційне середовище як мережу взаємодіючих підсистем із різним рівнем автономності та когерентності. Формалізація зв'язків і потоків між модулями здійснена за допомогою топологічних і метричних методів, що дозволяють моделювати структуру у вигляді графа  $G=(H,B)$  з оцінкою інтегрованості через коефіцієнт структурної когерентності. Особливу увагу приділено часовій динаміці конфігурації, де зміни операційної структури моделюються через концепт стратегічно залежної реконфігурації, описаної диференціальними моделями перерозподілу ресурсів. Це створює підґрунтя для прогнозування адаптацій до ринкових, технологічних та фінансових змін. Досліджено взаємозв'язки між конфігурацією операційної діяльності підприємства та його стратегічними орієнтирами, що дозволило визначити оптимальні сценарії ресурсного розподілу. У результаті другий розділ методично обґрунтував побудову інтегрованої мультиагентної моделі, орієнтованої на цифрову трансформацію управління трудовими ресурсами у будівельному девелопменті.

*Третій розділ* дисертаційної роботи узагальнює результати розробки моделей і методів мультиагентного розподілу трудових ресурсів у середовищі будівельних девелоперських проектів, зосереджуючи увагу на інтеграції інтелектуальних технологій у процес прийняття управлінських рішень. У роботі доведено, що за умов динамічного та невизначеного зовнішнього середовища найбільш ефективним є застосування гібридних підходів, які поєднують мультиагентне моделювання, нечітку логіку, ймовірнісний аналіз і сценарне управління. Інтегрована модель дозволяє моделювати взаємодію автономних агентів — працівників, підрозділів та цифрових систем — з урахуванням їхніх індивідуальних цілей, мотивацій та обмежень. Штучний інтелект у системі виконує роль аналітичного ядра, забезпечуючи адаптивне навчання агентів, прогнозування сценаріїв розвитку подій та оптимізацію стратегічних управлінських рішень.

Особлива увага приділена формуванню інтегрованої функції ефективності, яка об'єднує оцінку ризиків, мотиваційні чинники та

ймовірності сценаріїв. Це забезпечує баланс між автономністю агентів і цілісністю управлінської системи, підвищуючи стійкість будівельних девелоперських проєктів до змін зовнішнього середовища. Розділ демонструє можливості використання моделі для прогнозування ресурсного забезпечення, планування робочих потоків та прийняття оптимальних рішень у цифрових середовищах BIM, ERP та PLM. Показано, що інтеграція мультиагентних моделей із інтелектуальними алгоритмами підвищує продуктивність, адаптивність і інноваційну спроможність команд. Аналіз результатів підтвердив практичну придатність запропонованої моделі для управління трудовими ресурсами на всіх етапах будівельного девелопменту. Крім того, обґрунтовано її ефективність для підтримки стратегічного планування, оптимізації ресурсних потоків і підвищення конкурентоспроможності підприємств у цифровому середовищі. Таким чином, третій розділ дисертації завершує логіку дослідження, демонструючи інтеграційний потенціал мультиагентних методів і штучного інтелекту в управлінні трудовими ресурсами будівельних проєктів.

*Інноваційною сутністю* представленого дослідження, що вирізняє його значення для науки, є розробка науково-методичного підґрунтя та аналітичного інструментарію для мультиагентного розподілу трудових ресурсів у середовищі будівельних девелоперських проєктів за умов невизначеності. Значного удосконалення набуло науково-методичне забезпечення побудови інтелектуалізованої системи управління трудовими ресурсами, здатної до адаптації, самоорганізації та самонавчання у динамічному цифровому середовищі. Розвинено концепцію «цифрового працівника девелоперського проєкту» як активного агента мультиагентної взаємодії у BIM- та ERP-системах. Вдосконалено методичний апарат оцінювання інноваційної спроможності підприємств-учасників девелоперських проєктів та запропоновано інтеграційну модель нарощування інноваційного потенціалу, яка поєднує технологічні, кадрові та організаційні

чинники, забезпечуючи підвищення ефективності та стійкості управлінських рішень.

*Наукова новизна* роботи полягає у створенні науково-методичного підґрунтя та аналітичного інструментарію, що вдосконалює адміністрування трудових ресурсів у будівельних девелоперських проєктах за умов неповної визначеності. Розвинено концепт «цифрового працівника» та інтелектуалізовану систему управління ресурсами з мультиагентною взаємодією, інтегровану з BIM- і ERP-системами. Удосконалено методіку оцінювання інноваційного потенціалу та архітектуру агентної взаємодії, що забезпечує баланс між автономністю агентів і цілісністю системи, підвищуючи адаптивність і стійкість проєктів у цифровому середовищі.

***Вперше:***

- сформульовано провідну концептуальну дефініцію дослідження — поняття «мультиагентне управління трудовими ресурсами в будівельній організації в умовах неповної визначеності». Дефініція охоплює процеси координації, розподілу та адаптивного використання трудових ресурсів із залученням цифрових агентів, здатних до самоорганізації та самонавчання. Дефініцію викладено таким чином: «Мультиагентне управління трудовими ресурсами в будівельній організації в умовах неповної визначеності — це система координації, розподілу та адаптивного використання трудових ресурсів із залученням цифрових агентів, які здатні до самоорганізації та самонавчання. Вона забезпечує баланс між автономністю агентів і цілісністю організаційної системи, враховуючи ймовірнісні, сценарні та нечіткі чинники. Поняття формалізує мультиагентну взаємодію у середовищі девелоперських проєктів, підвищує стійкість і ефективність управління ресурсами та слугує науковою основою для розвитку цифрових моделей планування та управління трудовим потенціалом».

***Удосконалено:***

- *науково-методичні та аналітичні підходи формування моделі управління трудовими ресурсами в умовах невизначеності в будівельній*

*організації*, яка є виконавцем будівельного девелоперського проєкту. Модель регламентує дії будівельного підприємства за наступним алгоритмом: спершу здійснюється аналіз потреб у трудових ресурсах та прогнозування їхньої динаміки з урахуванням невизначеності, формуються цифрові профілі «працівників-агентів» із характеристиками компетенцій, продуктивності та адаптивності. Далі відбувається мультиагентне призначення завдань із урахуванням автономності агентів, командної взаємодії та ресурсного балансу, застосовуються методи нечіткої логіки, ймовірнісного та сценарного аналізу. У процесі виконання робіт здійснюється моніторинг та динамічна адаптація ресурсів, включно з реконфігурацією операційної діяльності, інтеграцією технологічних, кадрових та організаційних факторів і підтриманням цифрової когерентності структур. Оцінюється ефективність управління та ризику, забезпечується самоорганізація та самонавчання агентів для підвищення продуктивності та інноваційного потенціалу. Наприкінці проводиться зворотний зв'язок та постпроєктний аналіз, що дозволяє удосконалювати методологію розподілу ресурсів і підвищувати стійкість організації в цифровому середовищі;

- *архітектуру агентної взаємодії, яка враховує нечіткість, ймовірності та сценарність поведінки трудових ресурсів.* Вдосконалено модель стратегічно залежної реконфігурації операційної діяльності та цифрової когерентності організаційних структур для прогнозування змін ресурсного балансу; методико-прикладний апарат оцінювання інноваційного потенціалу підприємств-учасників проєктів через побудову та обґрунтування інтеграційної моделі нарощування інноваційного потенціалу, що поєднує технологічні, кадрові та організаційні чинники, підвищуючи адаптивність та ефективність управлінських рішень.

#### **Одержав подальший розвиток:**

- *підхід до використання концепту «цифрового працівника девелоперського проєкту»* як активного агента мультиагентної взаємодії в BIM- та ERP-системах у процесі адміністрування будівельним проєктом. Це

дозволяє забезпечити когерентність процесів планування, координації та прийняття рішень у комплексних девелоперських проєктах;

- *методико-аналітичний підхід щодо виявлення та протидії відхиленням в інтегрованому стані трудових ресурсів компанії-виконавця девелоперського проєкту.* Підхід дозволяє оцінювати стан управлінського та робочого персоналу у динамічній взаємодії агентів та прогнозувати вплив цих відхилень на ефективність виконання будівельного проєкту. Підхід визначає зміст і спрямування комплексу заходів будівельного підприємства з адміністрування трудовими ресурсами, включаючи моніторинг завантаження працівників, коригування розподілу робочих потоків та своєчасну адаптацію стратегій агентів. До складу заходів включено механізми раннього попередження відхилень і забезпечення узгодженості дій між усіма підсистемами організаційної структури щодо персоналу. Враховано сценарну ймовірнісну оцінку ризиків, що виникають у процесі координації робочих і управлінських ресурсів. Інтеграція цих підходів підвищує адаптивність, самонавчання та стійкість системи управління трудовими ресурсами в умовах невизначеності. Реалізація запропонованих заходів забезпечує баланс між автономністю агентів та цілісністю операційної діяльності компанії;

- *науково-методичний підхід до протидії ризикам у мультиагентному розподілі трудових ресурсів будівельних девелоперських проєктів через комплексну оцінку ефективності та потенційних ризиків управління ресурсами.* Застосування інтегрованої функції ефективності дозволяє балансувати автономність агентів і цілісність системи, підвищуючи стабільність операцій. Використовується прогнозування ризиків, пов'язаних із нестачею або надлишком трудових ресурсів, що дає змогу своєчасно коригувати розподіл агентів. Аналіз сценаріїв різних умов проєкту підвищує його стійкість і адаптивність, інтегруючи технологічні, кадрові та організаційні чинники та посилюючи здатність системи до самонавчання і самоорганізації в умовах невизначеності;

- гібридний підхід у моделюванні процесів організації будівництва та адміністрування циклом девелоперського проєкту, що об'єднує мультиагентне моделювання, нечітку логіку, ймовірнісний та сценарний аналіз. Створено інтегровану функцію ефективності управління, яка забезпечує баланс між автономністю агентів і цілісністю системи, підвищуючи стійкість та адаптивність девелоперських проєктів у цифровому середовищі.

Результати наукового дослідження знайшли своє застосування в діяльності будівельних та девелоперських компаній ТОВ «Архітектурно-будівельні інновації», ТОВ «Фомальгаут-Полімін» та ТОВ «Українська академія інвестицій в науку і будівництво». Запропоновані моделі мультиагентного розподілу трудових ресурсів дозволили оптимізувати завантаження персоналу, прогнозувати сценарії змін у виробничому середовищі та підвищувати продуктивність праці в умовах невизначеності. Окремі результати роботи інтегровані в освітній процес КНУБА під час підготовки бакалаврів і магістрів за спеціальністю 192 «Будівництво та цивільна інженерія». Результати, представлені в роботі, були апробовані при виконанні науково-дослідних робіт в КНУБА (№0124U005196) та Академії будівництва України (№7АБ/МОБ-11.23, секція «Менеджмент інновацій та організація будівництва»).

**Ключові слова:** організація будівництва, мультиагентне моделювання, розподіл трудових ресурсів, будівельні девелоперські проєкти, цифрова інтеграція, адаптивність, агентна взаємодія, цифровий працівник, управління невизначеністю, BIM-системи, ERP-системи.

## ABSTRACT

**Danilov S.Yu. Models and methods of multi-agent distribution of labor resources in the environment of construction development projects under conditions of uncertainty. - Qualification scientific work in the form of a manuscript.**

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in the field of knowledge 19 "Architecture and Construction" in the specialty 192 "Construction and Civil Engineering". - Kyiv National University of Construction and Architecture. - Kyiv, 2025.

The dissertation research is devoted to the scientific and methodological substantiation, development and practical verification of models and methods of multi-agent labor resource management in construction development projects under uncertain conditions. The work is aimed at creating an intelligent personnel management system - as a subsystem of construction organization in a development project - a component capable of adaptation, self-learning and optimization of agent interaction taking into account dynamic changes in the internal and external environment. The implementation of the set goal involves the formation of methodological tools that ensure digital integration, flexibility and increased efficiency of organizational and labor processes in construction development on the principles of innovation and sustainable development.

*The urgency of conducting the research* is due to the need to modernize labor resource management systems in the construction industry taking into account the principles of the digital economy and modern practices of construction development. In the context of the transition to intellectualized development processes, the importance of multi-agent models is increasing, ensuring effective coordination of the division of labor between project participants, reducing the level of uncertainty and increasing productivity. For construction companies, the implementation of IT personnel management tools in digital BIM, ERP and PLM platforms, which form a new organizational architecture of work, is becoming relevant. The digital worker acts as an active agent of information interaction, a data carrier and an analytical participant in management decisions. In such systems, the role of digital leadership, algorithmization of processes and the development of cognitive flexibility of personnel is increasing. This creates conditions for adapting enterprises to the requirements of energy-efficient, environmentally friendly and technologically

integrated construction.. This approach increases the competitiveness and sustainability of development structures in the digital environment.

*The first section* of the dissertation presents the results of conceptual and theoretical research aimed at forming the scientific foundations for the development of models and methods for multi-agent distribution of labor resources in the environment of construction development projects under conditions of uncertainty. A systematic analysis of the development of approaches to personnel management in construction, which was carried out under the influence of digital transformation and the dynamics of modern IT systems, was conducted. The role of integrating innovative and digital technologies in the HR management of construction companies as a factor in increasing the productivity, adaptability and stability of project teams was highlighted. The theoretical foundations of the concept of a “digital employee of a development project” were developed, which acts as an active agent of multi-agent interaction and ensures the consistency of planning, coordination and decision-making processes in BIM and ERP environments. The types of uncertainty inherent in construction development projects were systematized, their impact on the behavioral strategies of agents and organizational models of labor resource distribution were determined. The need to transform hierarchical personnel management structures into flexible, networked forms focused on digital interaction and self-organization is substantiated. The key principles of digital leadership, development of innovative potential and adaptability as the basis for the sustainability of multi-agent labor management systems are highlighted. It is shown that the use of multi-agent models in combination with digital technologies creates conditions for effective coordination of project participants' actions, increasing team productivity and ensuring strategic sustainability of development structures in the digital environment.

*The second section* of the dissertation is devoted to the formation of a methodological basis for the study of models and methods of multi-agent distribution of labor resources in the environment of construction development projects under conditions of uncertainty. The methodological basis was developed

using a complex of universal and special methods that ensure the systematicity and flexibility of the study. Universal methods include systemic, structural-functional, comparative and economic-mathematical analysis, modeling and expert assessments. Special methods include network modeling, multi-agent programming, digital simulation, as well as administrative management tools that allow formalizing the management processes of the development cycle. The integration of these methods ensures the creation of a single analytical platform that combines digital technologies, management solutions and mechanisms of strategic adaptation. The section substantiates the methodology for assessing the innovative capacity of enterprises participating in construction development projects as a key factor in their ability to make managerial changes. An integration model of mechanisms for increasing innovative potential has been developed, which includes technological, personnel, information, organizational, financial and cultural components. Considerable attention has been paid to the formation of models of reactive adaptation of agents that simulate the behavior of labor resources in changing conditions, taking into account the parameters of fuzzy logic, scenario analysis and probabilistic dependencies. Based on these provisions, an architecture of agent interaction has been formed, which ensures flexibility and self-learning of the system. The configuration of the operational activities of development structures has been studied as a multi-level dynamic system that integrates logistical, financial, information-analytical and technological modules. This approach allows us to consider the operational environment as a network of interacting subsystems with different levels of autonomy and coherence. The formalization of connections and flows between modules has been carried out using topological and metric methods, which allow us to model the structure in the form of a graph  $G=(H,B)$  with an assessment of integration through the structural coherence coefficient. Particular attention is paid to the temporal dynamics of the configuration, where changes in the operational structure are modeled through the concept of strategically dependent reconfiguration, described by differential models of resource redistribution. This creates a basis for predicting adaptations to market, technological and financial

changes. The interrelationships between the configuration of the enterprise's operational activities and its strategic guidelines are investigated, which allowed us to determine optimal resource allocation scenarios. As a result, the second section methodically substantiated the construction of an integrated multi-agent model focused on the digital transformation of labor resource management in construction development.

*The third, final, section* of the dissertation summarizes the results of the development of models and methods for multi-agent labor resource allocation in the environment of construction development projects, focusing on the integration of intelligent technologies into the process of making managerial decisions. The work proves that in a dynamic and uncertain external environment, the most effective is the use of hybrid approaches that combine multi-agent modeling, fuzzy logic, probabilistic analysis and scenario management. The integrated model allows you to model the interaction of autonomous agents - employees, departments and digital systems - taking into account their individual goals, motivations and limitations. Artificial intelligence in the system plays the role of an analytical core, providing adaptive training of agents, forecasting scenarios of events and optimizing strategic managerial decisions.

Special attention is paid to the formation of an integrated efficiency function that combines risk assessment, motivational factors and scenario probabilities. This provides a balance between agent autonomy and the integrity of the management system, increasing the resilience of construction development projects to changes in the external environment. The section demonstrates the possibilities of using the model for forecasting resource provision, planning workflows and making optimal decisions in digital environments BIM, ERP and PLM. It is shown that the integration of multi-agent models with intelligent algorithms increases the productivity, adaptability and innovative capacity of teams. The analysis of the results confirmed the practical suitability of the proposed model for managing labor resources at all stages of construction development. In addition, its effectiveness for supporting strategic planning, optimizing resource flows and increasing the

competitiveness of enterprises in the digital environment is substantiated. Thus, the third section of the dissertation completes the logic of the study, demonstrating the integration potential of multi-agent methods and artificial intelligence in managing labor resources of construction projects.

*The innovative essence of the presented research*, which distinguishes its significance for science, is the development of a scientific and methodological basis and analytical tools for multi-agent distribution of labor resources in the environment of construction development projects under conditions of uncertainty. The scientific and methodological support for building an intellectualized labor resource management system capable of adaptation, self-organization and self-learning in a dynamic digital environment has been significantly improved. The concept of a “digital employee of a development project” has been developed as an active agent of multi-agent interaction in BIM and ERP systems. The methodological apparatus for assessing the innovative capacity of enterprises participating in development projects has been improved and an integration model for increasing innovative potential has been proposed, which combines technological, personnel and organizational factors, ensuring increased efficiency and sustainability of management decisions.

*The scientific novelty* of the work lies in the creation of a scientific and methodological basis and analytical tools that improve the administration of labor resources in construction development projects under conditions of incomplete certainty. The concept of a "digital worker" and an intellectualized resource management system with multi-agent interaction, integrated with BIM and ERP systems, have been developed. The methodology for assessing innovative potential and the architecture of agent interaction have been improved, which ensures a balance between agent autonomy and system integrity, increasing the adaptability and sustainability of projects in a digital environment.

***For the first time:***

- the leading conceptual definition of the study is formulated - the concept of "multi-agent management of labor resources in a construction organization under

conditions of incomplete certainty". The definition covers the processes of coordination, distribution and adaptive use of labor resources with the involvement of digital agents capable of self-organization and self-learning. The definition is stated as follows: "Multi-agent management of labor resources in a construction organization under conditions of incomplete certainty is a system of coordination, distribution and adaptive use of labor resources with the involvement of digital agents capable of self-organization and self-learning. It provides a balance between the autonomy of agents and the integrity of the organizational system, taking into account probabilistic, scenario and fuzzy factors. The concept formalizes multi-agent interaction in the environment of development projects, increases the stability and efficiency of resource management and serves as a scientific basis for the development of digital models of planning and management of labor potential".

***Improved:***

- scientific, methodological and analytical approaches to the formation of a model of labor resource management under conditions of uncertainty in a construction organization that is the executor of a construction development project. The model regulates the actions of a construction enterprise according to the following algorithm: first, an analysis of labor resource needs and forecasting their dynamics is carried out, taking into account uncertainty, digital profiles of "agent workers" are formed with the characteristics of competencies, productivity and adaptability. Next, multi-agent task assignment takes place, taking into account the autonomy of agents, team interaction and resource balance, fuzzy logic, probabilistic and scenario analysis methods are used. In the process of performing work, monitoring and dynamic adaptation of resources is carried out, including the reconfiguration of operational activities, the integration of technological, personnel and organizational factors and maintaining the digital coherence of structures. Management efficiency and risks are assessed, self-organization and self-learning of agents are ensured to increase productivity and innovative potential. At the end, feedback and post-project analysis are carried out, which allows improving the

resource allocation methodology and increasing the organization's resilience in the digital environment;

- the architecture of agent interaction, which takes into account the fuzziness, probabilities and scenario behavior of labor resources. The model of strategically dependent reconfiguration of operational activities and digital coherence of organizational structures for predicting changes in the resource balance has been improved; methodological and applied apparatus for assessing the innovative potential of enterprises participating in projects through the construction and substantiation of an integration model of increasing innovative potential, which combines technological, personnel and organizational factors, increasing the adaptability and effectiveness of management decisions.

***Further development has been made:***

- an approach to using the concept of a "digital employee of a development project" as an active agent of multi-agent interaction in BIM and ERP systems in the process of administering a construction project. This allows to ensure coherence of planning, coordination and decision-making processes in complex development projects;

- methodological and analytical approach to identifying and counteracting deviations in the integrated state of labor resources of the company-executor of the development project. The approach allows to assess the state of managerial and working personnel in the dynamic interaction of agents and to predict the impact of these deviations on the efficiency of the construction project. The approach determines the content and direction of the complex of measures of the construction enterprise for the administration of labor resources, including monitoring of employee workload, adjustment of the distribution of work flows and timely adaptation of agent strategies. The measures include mechanisms for early warning of deviations and ensuring consistency of actions between all subsystems of the organizational structure regarding personnel. Scenario-probabilistic risk assessment of the coordination of labor and management resources increases the adaptability, self-learning, and stability of their management system in conditions of uncertainty,

ensuring a balance between the autonomy of agents and the integrity of the company's operational activities;

- a scientific and methodological approach to countering risks in the multi-agent distribution of labor resources of construction development projects through a comprehensive assessment of the efficiency and potential risks of resource management. The use of an integrated efficiency function allows balancing the autonomy of agents and the integrity of the system, increasing the stability of operations. Forecasting of risks associated with a shortage or excess of labor resources is used, which allows for timely adjustment of the distribution of agents. In addition, the analysis of scenarios of various project conditions ensures its increased stability and adaptability. This approach integrates technological, personnel and organizational factors, strengthening the system's ability to self-learn and self-organize in conditions of uncertainty;

- a hybrid approach to modeling the processes of organizing construction and administering the development project cycle, which combines multi-agent modeling, fuzzy logic, probabilistic and scenario analysis. An integrated management efficiency function has been created, which provides a balance between agent autonomy and system integrity, increasing the stability and adaptability of development projects in a digital environment.

The results of the scientific research have found their application in the activities of construction and development companies LLC "Architectural and Construction Innovations", LLC "Fomalhaut-Polimin" and LLC "Ukrainian Academy of Investments in Science and Construction": the proposed models of multi-agent distribution of labor resources allowed to optimize personnel workload, predict scenarios of changes in the production environment and increase labor productivity in conditions of uncertainty. Some r

**Keywords:** construction organization, multi-agent modeling, labor distribution, construction development projects, digital integration, adaptability, agent interaction, digital worker, uncertainty management , BIM-systems, ERP systems.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

*Статті у наукових фахових виданнях України, які індексуються в міжнародних наукометричних базах:*

1. **Данілов С.** Принципи конфігурації агентних взаємодій у складному трудовому середовищі ІТ-проектів. Шляхи підвищення ефективності будівництва, 2025, 2(56), 3–13. [https://doi.org/10.32347/2707-501x.2025.56\(2\).3-13](https://doi.org/10.32347/2707-501x.2025.56(2).3-13) <https://ways.knuba.edu.ua/article/view/348032/334960>
2. Козак А., **Данілов С.**, Поліщук О., Устинов Є. Структура інтеграційного підходу до оптимізації критеріально-параметричної системи управління економікою та менеджментом будівельних проектів. Шляхи підвищення ефективності будівництва, 2025, 1(55), 201–216. [https://doi.org/10.32347/2707-501x.2025.55\(1\).201-216](https://doi.org/10.32347/2707-501x.2025.55(1).201-216).  
<https://ways.knuba.edu.ua/article/view/327012/316818> (Особистий внесок здобувача: розроблено інтеграційний підхід до оптимізації критеріально-параметричної системи управління будівельними проектами, який забезпечує узгодження економічних, ресурсних і управлінських рішень у цифровому середовищі)
3. **Данілов С.Ю.**, Стельмах О.В., Кривда К.Є., Науменко Є.В. Теоретичні основи мультиагентного моделювання у системах управління трудовими ресурсами з акцентом на міждисциплінарну інтеграцію та поведінкову складову. Просторовий розвиток, 2025, 14, С. 110-121 <https://doi.org/10.32347/2786-7269.2025.14.110-121> . <https://library.knuba.edu.ua/books/zbirniki/29/2025/SD2514.pdf> (Особистий внесок здобувача: сформовано теоретичні засади мультиагентного моделювання управління трудовими ресурсами з урахуванням поведінкових факторів та міждисциплінарної інтеграції, що підвищує ефективність організації будівництва).
4. Малихін М.О., **Данілов С.Ю.**, Іванина О.М., Зяхор Д.О. Трансформація економічних підходів до диверсифікації підприємницької діяльності в контексті будівництва. Просторовий розвиток, 2025, 13, С. 358-373 <https://doi.org/10.32347/2786-7269.2025.13.358-373>

<https://library.knuba.edu.ua/books/zbirniki/29/2025/SD2513.pdf> (Особистий внесок здобувача: обґрунтовано напрями трансформації економічних підходів до диверсифікації діяльності будівельних підприємств з урахуванням інвестиційних ризиків і умов ринкової нестабільності).

5. **Данілов С.Ю.** Класифікація типів невизначеності в управлінні іт-проєктами та їхній вплив на формування стратегій агентного розподілу трудових ресурсів. Просторовий розвиток, 2025, 15, С. 313-324 <https://doi.org/10.32347/2786-7269.2025.15.313-324> <https://library.knuba.edu.ua/books/zbirniki/29/2025/SD2515.pdf>

6. Стельмах О., **Данілов С.**, Кривда К., Науменко Є. Системний аналіз концептуальних основ управління трудовими ресурсами в іт-середовищі з урахуванням трансформації парадигм під впливом динаміки цифрової економіки. будівельне виробництво, 2025, 80, 77-85. <https://doi.org/10.36750/2524-2555.80.77-85>. <https://ndibv-building.com.ua/index.php/building/article/view/554/286> (Особистий внесок здобувача: узагальнено концептуальні засади управління трудовими ресурсами в умовах цифрової трансформації, зокрема із застосуванням ІТ-аналітики та гнучких моделей зайнятості в іт-орієнтованому середовищі).

7. **Данілов С.Ю.** Моделі реактивної адаптації агентів до контекстів невизначеності та зміни параметрів навколишнього середовища. Управління розвитком складних систем. 2025. № 64. С. 185 – 193 <https://doi.org/10.32347/2412-9933.2025.64.185-193> <https://urss.knuba.edu.ua/files/zbirnyk-64/185-193.pdf>

8. **Козак А.**, Герасимчук Я., Стельмах О., Данілов С. Шляхи модернізації системи організаційно-технологічного моделювання проєктів будівництва в бік подолання можливих невизначеностей та загроз циклу проєктів будівельного девелопменту. Будівельне виробництво, 2024, 77, 31-42. <https://doi.org/10.36750/2524-2555.77.31-42> <https://ndibv-building.com.ua/index.php/Building/article/view/506/238> (Особистий внесок здобувача: запропоновано підходи до модернізації організаційно-технологічного

моделювання будівельних проєктів, орієнтовані на зниження ризиків і підвищення ефективності управління проєктним циклом).

9. Козак А., Соболев Д., **Данілов С.**, Оксенчук Р., Шаршун Ф. Концептуалізація енергоадаптованих будівельних проєктів у контексті сталого розвитку, регуляторного поля та цифрової трансформації. Шляхи підвищення ефективності будівництва, 2022, 2(49), 305–319. [https://doi.org/10.32347/2707-501x.2022.49\(2\).305-319](https://doi.org/10.32347/2707-501x.2022.49(2).305-319) <https://ways.knuba.edu.ua/article/view/342154/330046> (Особистий внесок здобувача: обґрунтовано концепцію енергоадаптованих будівельних проєктів у контексті сталого розвитку та цифрової трансформації, із використанням BIM-технологій та інструментів енергетичної оптимізації).

*Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:*

*тези доповідей на конференціях:*

10. **Данілов С.Ю.** Алгоритмічне забезпечення самонавчання агентів і вибору стратегій взаємодії в умовах обмеженого доступу до інформації. Налаштування освітніх траєкторій в підготовці менеджерів будівництва в контексті відбудови України: матеріали круглого столу, 30 травня 2023 р. К.: КНУБА, 2023. С. 25. <https://lnk.ua/FL4IPeGIId>

11. **Данілов С.Ю.** Розробка варіативних моделей мультиагентного розподілу із залученням нечіткої логіки, сценарного аналізу та теорії ймовірностей. Енергоощадні машини і технології: програма V Міжнародної науково-практичної конференції, 22-24 травня 2024 р. К.: КНУБА, 2024. С. 44 <https://lnk.ua/wmbp18Yos>

12. Кричевська Ю.В., Грабчак П.В., **Данілов С.Ю.** Теоретико-методичні основи організації ресурсів та технологічного планування в проєктах зведення багатоповерхових будівель на основі девелоперських і мультиагентних моделей. Проблеми генезису економіки інтелектуально-інноваційного капіталу: матеріали доповідей V Міжнародної науково-практичної конференції (м. Київ, 4-5 листопада 2025 року) / за заг. ред. В. М. Лича, Л.О. Згалат-Лозинської. Київ: КНУБА, 2025. С. 653-655 [https://cf.knuba.edu.ua/wp-content/uploads/2026/01/Konference-program-KNUCA-4-5\\_11\\_2025.pdf](https://cf.knuba.edu.ua/wp-content/uploads/2026/01/Konference-program-KNUCA-4-5_11_2025.pdf)

13. Грабчак П.В., **Данілов С.Ю.** Інтеграція організаційно-технологічних рішень у девелоперських проєктах будівництва та моделей мультиагентного розподілу трудових ресурсів в умовах невизначеності на ґрунті наукового процесу. Актуальні проблеми освітнього процесу в контексті європейського вибору України: матеріали VIII Міжнародної конференції (12 листопада 2025 року). Київ: Видавництво Ліра-К, 2025. С. 620-621 <https://repository.knuba.edu.ua/items/d0b87d1f-fb32-4375-8961-42e490aeda9b>

14. **Данілов С.Ю.**, Кривда К.Є. Моделі та методи мультиагентного управління ресурсами та моніторингу стійкості ІТ-проєктів і будівельних мереж в умовах невизначеності. Архітектура, Будівництво, Дизайн: Виробництво, Інформатизація, Менеджмент: Міжнародний науково-технічний форум: програма та тези доповідей (24-25 листопада 2025 р., м. Київ). Київ : Видавництво Ліра- К, 2025. С. 522-523 <https://drive.google.com/file/d/1h5Zrq3IXNGrt06JuGw2-5oeijf26i8SX/view>

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	25
РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИКО-КОНЦЕПТУАЛЬНІ ЗАСАДИ МУЛЬТИАГЕНТНОГО УПРАВЛІННЯ ТРУДОВИМИ РЕСУРСАМИ В ІТ-ПРОЄКТАХ.....	35
1.1. Системний аналіз концептуальних основ управління трудовими ресурсами в ІТ-середовищі з урахуванням трансформації парадигм під впливом динаміки цифрової економіки.....	35
1.2. Теоретичні основи мультиагентного моделювання у системах управління трудовими ресурсами з акцентом на міждисциплінарну інтеграцію та поведінкову складову .....	48
1.3. Класифікація типів невизначеності в управлінні ІТ-проектами та їхній вплив на формування стратегій агентного розподілу трудових ресурсів.....	64
Висновки до 1-го розділу.....	77
РОЗДІЛ 2. АДАПТИВНІ МЕХАНІЗМИ РОЗПОДІЛУ ТРУДОВИХ РЕСУРСІВ У МУЛЬТИАГЕНТНИХ СИСТЕМАХ УПРАВЛІННЯ ІТ-ПРОЄКТАМИ.....	81
2.1. Принципи конфігурації агентних взаємодій у складному трудовому середовищі ІТ-проектів.....	81
2.2. Моделі реактивної адаптації агентів до контекстів невизначеності та зміни параметрів навколишнього середовища.....	90
2.3. Виявлення конфліктів та когнітивних бар'єрів у мультиагентному середовищі та формування механізмів їхньої нейтралізації.....	101
Висновки до 2-го розділу .....	117
РОЗДІЛ 3. ПОБУДОВА АНАЛІТИЧНИХ І ПОВЕДІНКОВИХ МОДЕЛЕЙ РОЗПОДІЛУ РЕСУРСІВ В ІТ-ПРОЄКТАХ В УМОВАХ ЗМІННОЇ СКЛАДНОСТІ.....	119
3.1. Розробка варіативних моделей мультиагентного розподілу із залученням нечіткої логіки, сценарного аналізу та теорії ймовірностей....	119
3.2. Алгоритмічне забезпечення самонавчання агентів і вибору стратегій взаємодії в умовах обмеженого доступу до інформації.....	133

3.3. Інтеграція мультиагентних моделей в системи підтримки прийняття рішень управлінського рівня для ІТ-проектів різної складності.....	145
Висновки до 3-го розділу .....	160
ВИСНОВКИ.....	164
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	171
ДОДАТКИ.....	184

## ВСТУП

**Актуальність теми** дисертаційного дослідження зумовлена необхідністю глибокої трансформації систем управління трудовими ресурсами в будівництві відповідно до принципів цифрової економіки та сучасних підходів девелопменту й ІТ-технологій. В умовах переходу до інтелектуалізованого формату будівельного девелопменту стрімко зростає роль мультиагентних моделей, які забезпечують ефективну координацію розподілу праці між учасниками проєктів, знижують рівень невизначеності та підвищують загальну продуктивність. Операційна система сучасного девелоперського будівельного проєкту дедалі частіше розглядається як складна мультиагентна система, у межах якої підрядники, постачальники, проєктанти, управлінці та цифрові платформи взаємодіють у режимі безперервної координації та обміну даними. Така структура вимагає впровадження інноваційних підходів до управління, орієнтованих на використання BIM-, ERP-, PLM-платформ, систем штучного інтелекту та інструментів цифрової аналітики, що забезпечують адаптивність, прозорість і синхронізацію процесів у реальному часі. Для будівельних підприємств особливої актуальності набуває інтеграція ІТ-методів управління персоналом у цифрові платформи, які формують нову архітектуру організації праці. Цифровий працівник у такій системі трансформується на активного агента інформаційної взаємодії, носія даних і аналітичного учасника управлінських рішень. У межах мультиагентного середовища зростає роль цифрового лідерства, алгоритмізації управлінських процесів, розвитку когнітивної гнучкості персоналу та формування командної синергії. Це створює передумови для адаптації підприємств до вимог енергоефективного, екологічного та технологічно інтегрованого будівництва. Модель складної операційної системи девелоперської компанії доцільно формалізувати у вигляді орієнтованого графа, вершини якого відображають функціональні підрозділи, технологічні платформи та управлінські центри, а зв'язки — потоки інформації, ресурсів і рішень. Використання коефіцієнта структурної

когерентності дозволяє кількісно оцінити рівень збалансованості внутрішніх взаємодій, своєчасно виявляти зони надмірної централізації або розбалансування ресурсного контролю. Водночас девелоперські процеси функціонують у проектному часі, що зумовлює необхідність урахування часової динаміки та стратегічно залежної реконфігурації операційної структури під впливом змін ринкового, технологічного й інституційного середовища.

Виявляється *актуальним* науково-методичне обґрунтування, розроблення та практична верифікація моделей і методів мультиагентного розподілу трудових ресурсів у середовищі будівельних девелоперських проектів в умовах динамічної невизначеності. Особливої значущості набуває дослідження процесів організації та управління трудовими ресурсами як управлінського, так і виробничого персоналу в умовах цифрової трансформації девелоперської діяльності. Водночас актуалізується потреба у вдосконаленні організаційно-технологічних та організаційно-структурних моделей, методів і алгоритмів мультиагентного розподілу праці, які забезпечують адаптивність, узгоджену взаємодію та цифрову когерентність учасників проекту. Поєднання мультиагентних моделей із концепцією цифрового працівника та динамічною реконфігурацією операційних структур формує науково-прикладну основу для переходу до децентралізованого управління й підвищення конкурентоспроможності девелоперських структур у цифровому середовищі.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами.** Тематика, зміст і результати дисертаційного дослідження виконані у відповідності з планами науково-дослідних робіт Київського національного університету будівництва і архітектури та Академії будівництва України. Автор є виконавцем науково-дослідної теми з державною реєстрацією №0124U005196 «Розробка науково-технічного інструментарію для формування та реалізації внутрішньовиробничих планів діяльності будівельної організації», а також учасником НДР Академії будівництва України №7АБ/МОБ-11.23 (секція «Менеджмент інновацій та організація

будівництва»). Результати дисертаційної роботи, зокрема положення щодо мультиагентного розподілу трудових ресурсів у девелоперських проєктах, використані при розробленні моделей адаптивного планування та координації діяльності учасників будівельного процесу. У межах зазначених НДР впроваджено сценарний підхід до обґрунтування діяльності девелоперських проєктів як мультиагентних систем, що дозволяє моделювати альтернативні варіанти розвитку подій з урахуванням невизначеності, ризиків і поведінкових характеристик агентів. Отримані результати використано для підвищення адаптивності управління, стійкості девелоперських структур і ефективності прийняття стратегічних рішень. Таким чином, дисертаційна робота безпосередньо інтегрована в реалізацію державних і галузевих наукових програм та відповідає актуальним завданням інноваційного розвитку будівельного девелопменту.

Зміст і тематика дослідження належно узгоджуються із цільовою спрямованістю:

- Закону України «Про інноваційну діяльність» — у частині впровадження інтелектуалізованих, цифрових та адаптивних моделей управління ресурсами в інноваційних проєктах будівельного девелопменту;
- Закон України «Про цифрову економіку та цифровізацію» (у складі стратегічних державних актів) — щодо розвитку цифрових платформ, мультиагентних систем та інтелектуальних технологій управління;
- розпорядження Кабінету Міністрів України «Про схвалення Концепції розвитку цифрової економіки та суспільства України» — у частині впровадження цифрових моделей управління трудовими ресурсами та ВІМ-орієнтованих платформ.

**Мета і завдання дослідження.** Метою дослідження є теоретично обґрунтоване формування, розроблення та практичне підтвердження ефективності моделей і методів мультиагентного розподілу трудових ресурсів у середовищі будівельних девелоперських проєктів за умов невизначеності. Дослідження зорієнтоване на формування інтелектуалізованої системи

управління трудовими ресурсами, спроможної до адаптивного функціонування, самонавчання та оптимізації взаємодії агентів у процесі динамічних змін зовнішнього й внутрішнього середовища. Реалізація поставленої мети передбачає створення методичного інструментарію для забезпечення цифрової узгодженості, гнучкості та зростання результативності організаційно-трудова процесів у будівельному девелопменті на засадах інноваційності та сталого розвитку.

*Для досягнення поставленої мети в дисертації поставлено та вирішено наступні завдання:*

1. Проаналізувати еволюцію підходів до управління трудовими ресурсами в будівельному девелопменті в умовах цифрової трансформації та обґрунтувати доцільність застосування мультиагентного підходу.

2. Розкрити сутність концепції «цифрового працівника девелоперського проєкту» та визначити принципи формування гнучкої мережевої системи управління трудовими ресурсами за умов невизначеності.

3. Розробити методичний базис дослідження моделей і методів мультиагентного розподілу трудових ресурсів із використанням економіко-математичного, мережевого, мультиагентного та імітаційного моделювання.

4. Сформувати моделі реактивної адаптації агентів і архітектуру агентної взаємодії з використанням нечіткої логіки, ймовірнісного та сценарного аналізу для забезпечення самонавчання й гнучкості системи.

5. Розробити аналітико-прикладний інструментарій мультиагентного розподілу трудових ресурсів на основі гібридних інтелектуальних підходів із залученням штучного інтелекту.

6. Обґрунтувати інтегровану функцію ефективності управління трудовими ресурсами та здійснити практичну верифікацію розроблених моделей в умовах невизначеності будівельних девелоперських проєктів.

**Об'єкт дослідження** - процеси організації та управління трудовими ресурсами у середовищі будівельних девелоперських проєктів в умовах динамічної невизначеності.

**Предмет дослідження** - організаційно-технологічні та організаційно-структурні моделі, методи й алгоритми мультиагентного розподілу трудових ресурсів, що забезпечують адаптивність, взаємодію та цифрову когерентність учасників будівельного девелоперського проєкту.

**Методи дослідження.** Для забезпечення наукової достовірності, обґрунтованості та високої результативності у розв'язанні теоретичних, методичних і прикладних завдань, визначених у роботі, використано комплексний підхід, що інтегрує міждисциплінарні та практико-орієнтовані методи дослідження, які виступають методологічною основою й інструментарієм наукового аналізу:

Із загальнонаукових методів використано методи: аналіз і синтез — для узагальнення теоретичних положень управління трудовими ресурсами в девелоперських проєктах; індукція і дедукція — для формування наукових гіпотез; системний та структурно-функціональний підходи — для дослідження мультиагентної природи операційних процесів; порівняльний аналіз — для зіставлення традиційних і цифрових моделей управління персоналом. Зі спеціальних методів використано: економіко-математичне та імітаційне моделювання — для формалізації процесів мультиагентного розподілу трудових ресурсів; апарат нечіткої логіки та ймовірнісного аналізу — для урахування невизначеності зовнішнього середовища; мережеве та мультиагентне програмування — для побудови архітектури взаємодії агентів; сценарний аналіз — для прогнозування альтернатив розвитку подій; метод експертних оцінок — для верифікації отриманих результатів і прикладних рішень.

*Наукова новизна* роботи полягає у формуванні цілісного науково-методичного підґрунтя та аналітичного інструментарію мультиагентного розподілу трудових ресурсів у середовищі будівельних девелоперських проєктів за умов неповної визначеності. Значного розвитку набуло методичне забезпечення побудови інтелектуалізованої системи управління трудовими ресурсами, здатної до адаптації, самоорганізації та самонавчання у

динамічному цифровому середовищі. Розвинено концепцію «цифрового працівника девелоперського проєкту» як активного агента мультиагентної взаємодії в BIM- та ERP-системах. Удосконалено методику оцінювання інноваційної спроможності підприємств-учасників проєктів і запропоновано інтеграційну модель нарощування інноваційного потенціалу, що поєднує технологічні, кадрові та організаційні чинники. Удосконалено архітектуру агентної взаємодії, яка забезпечує баланс між автономністю агентів і цілісністю системи. Реалізація запропонованих рішень підвищує адаптивність, ефективність і стійкість девелоперських проєктів у цифровому середовищі.

На підставі отриманих у дисертації результатів:

***Вперше:***

– обґрунтовано ключову концептуальну дефініцію дослідження — поняття «мультиагентне управління трудовими ресурсами в будівельній організації в умовах неповної визначеності». Запропоноване тлумачення охоплює процеси координації, розподілу та адаптивного використання трудових ресурсів із залученням цифрових агентів, здатних до самоорганізації та самонавчання. Дефініцію сформульовано у такій редакції: «Мультиагентне управління трудовими ресурсами в будівельній організації в умовах неповної визначеності — це система координації, розподілу та адаптивного використання трудових ресурсів із залученням цифрових агентів, спроможних до самоорганізації та самонавчання. Вона забезпечує баланс між автономністю агентів і цілісністю організаційної системи з урахуванням імовірнісних, сценарних та нечітких чинників. Поняття формалізує мультиагентну взаємодію у середовищі девелоперських проєктів, підвищує стійкість і результативність управління ресурсами та слугує науковою основою розвитку цифрових моделей планування й управління трудовим потенціалом».

***Удосконалено:***

- науково-методичні та аналітичні підходи до формування моделі управління трудовими ресурсами в умовах невизначеності в будівельній організації — виконавці девелоперського проєкту. Запропонована модель

регламентує дії підприємства за послідовним алгоритмом: на початковому етапі здійснюється аналіз потреб у трудових ресурсах і прогнозування їх динаміки з урахуванням невизначеності, формуються цифрові профілі «працівників-агентів» із параметрами компетентності, продуктивності та адаптивності. Далі реалізується мультиагентне призначення завдань з урахуванням автономності агентів, командної взаємодії та ресурсного балансу із застосуванням методів нечіткої логіки, ймовірнісного та сценарного аналізу. У процесі виконання робіт здійснюється моніторинг і динамічна адаптація ресурсів, включно з реконфігурацією операційної діяльності, інтеграцією технологічних, кадрових та організаційних чинників і підтриманням цифрової когерентності структур. Проводиться оцінювання ефективності управління та ризиків, забезпечується самоорганізація й самонавчання агентів з метою зростання продуктивності та інноваційного потенціалу. Завершальним етапом є зворотний зв'язок і постпроектний аналіз, що дає змогу удосконалювати методологію розподілу ресурсів і підвищувати стійкість організації у цифровому середовищі;

- архітектуру агентної взаємодії з урахуванням нечіткості, ймовірності та сценарності поведінки трудових ресурсів. Удосконалено модель стратегічно залежної реконфігурації операційної діяльності та цифрової когерентності організаційних структур для прогнозування змін ресурсного балансу; методико-прикладний апарат оцінювання інноваційного потенціалу підприємств-учасників проєктів шляхом побудови й обґрунтування інтеграційної моделі нарощування інноваційного потенціалу, що поєднує технологічні, кадрові та організаційні чинники, підвищуючи адаптивність і результативність управлінських рішень.

***Набуло подальшого розвитку:***

- підхід до застосування концепту «цифрового працівника девелоперського проєкту» як активного агента мультиагентної взаємодії у BIM- та ERP-системах під час адміністрування будівельним проєктом. Це

забезпечує узгодженість процесів планування, координації та прийняття рішень у комплексних девелоперських проєктах;

- методико-аналітичний підхід для виявлення та нейтралізації відхилень у інтегрованому стані трудових ресурсів компанії-виконавця девелоперського проєкту. Дозволяє оцінювати стан управлінського та робочого персоналу у динамічній взаємодії агентів та прогнозувати вплив цих відхилень на ефективність реалізації проєкту. Визначає зміст і спрямованість комплексу заходів будівельного підприємства з адміністрування персоналу, включно з моніторингом завантаження, коригуванням розподілу робочих потоків і адаптацією стратегій агентів. До заходів входять механізми раннього попередження відхилень та забезпечення узгодженості дій між усіма підсистемами організаційної структури щодо персоналу. Враховується ймовірнісна оцінка ризиків у процесі координації ресурсів. Інтеграція цих підходів підвищує адаптивність, самонавчання та стійкість управління трудовими ресурсами в умовах невизначеності. Реалізація заходів забезпечує баланс між автономністю агентів і цілісністю операційної діяльності компанії;

- науково-методичний підхід до протидії ризикам у мультиагентному розподілі трудових ресурсів девелоперських проєктів через комплексну оцінку ефективності та потенційних ризиків управління ресурсами. Застосування інтегрованої функції ефективності дозволяє балансувати автономність агентів та цілісність системи, підвищуючи стабільність операцій. Використовується прогнозування ризиків, пов'язаних із дефіцитом або надлишком трудових ресурсів, що забезпечує своєчасну корекцію розподілу агентів. Аналіз сценаріїв різних умов проєкту підвищує його стійкість та адаптивність. Підхід інтегрує технологічні, кадрові та організаційні чинники, посилюючи здатність системи до самонавчання та самоорганізації в умовах невизначеності;

- гібридний підхід до моделювання процесів організації будівництва та адміністрування циклом девелоперського проєкту, що поєднує мультиагентне моделювання, нечітку логіку, ймовірнісний і сценарний аналіз. Створено інтегровану функцію ефективності управління, яка забезпечує

баланс між автономністю агентів та цілісністю системи, підвищуючи стійкість і адаптивність девелоперських проєктів у цифровому середовищі.

**Практична цінність** результатів дисертації полягає у розробленні та впровадженні прикладного інструментарію управління трудовими ресурсами на основі мультиагентного підходу, який забезпечує цифрову інтеграцію, адаптивність і підвищення ефективності організаційно-трудова процесів у будівельному девелопменті. Запропоновані моделі та методи дозволяють будівельним підприємствам оптимізувати розподіл персоналу, прогнозувати сценарії змін у виробничому середовищі та підвищувати продуктивність праці в умовах невизначеності. Розроблена архітектура агентної взаємодії та алгоритми реконфігурації операційної діяльності впроваджені у практичну діяльність мультиагентних підприємств ЗАТ «Українська академія інвестицій в науку і будівництво», ТОВ «Фомальгаут-Полімін» та ТОВ «Архітектурно-будівельні новації», що підтверджує їхню ефективність у реальних умовах девелоперських проєктів.

Методичні рекомендації та цифрові рішення, розроблені в дисертації, інтегровані в освітній процес Київського національного університету будівництва і архітектури під час підготовки бакалаврів і магістрів за спеціальністю 192 «Будівництво та цивільна інженерія». Практична реалізація результатів дослідження сприяє підвищенню рівня цифрової компетентності управлінського персоналу, формуванню навичок роботи з інтелектуальними системами управління та поширенню сучасних методів мультиагентного будівельного девелопменту й цифрового HR-менеджменту.

**Публікації.** Передумови та гіпотеза дослідження, його основні етапи, результати та висновки належним чином представлені у 14 наукових працях, з яких 9 статей опубліковані у виданнях, що входять до переліку фахових видань, затверджених ДАК МОН України.

**Особистий внесок здобувача.** Дисертаційне дослідження виконане автором самостійно. Усі наукові положення, отримані результати, висновки та рекомендації, представлені у роботі та подані на захист, є безпосереднім

підсумком власної наукової діяльності здобувача. Внесок автора детально відображено у переліку опублікованих наукових праць.

**Апробація результатів дисертації.** Основні теоретичні та практичні результати дослідження були представлені на наукових конференціях і семінарах, де отримали схвалення фахової спільноти. Відомості про ці заходи наведено у списку опублікованих праць.

**Опис структури та обсягу роботи.** Структура роботи підпорядкована логіці вирішення поставлених завдань, етапам дослідження та отриманим результатам. Дисертаційна робота включає: анотації, список праць здобувача за темою дисертації, зміст, вступ, три розділи, висновки, список літератури та додатки. Загальний обсяг роботи становить 197 сторінок друкованого тексту, з яких основний текст займає 156 сторінок і містить 14 таблиць та 37 рисунків. а перелік використаних джерел налічує 121 позицію. Додатки представлені на 9 сторінках.

## **РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИКО-КОНЦЕПТУАЛЬНІ ЗАСАДИ МУЛЬТИАГЕНТНОГО УПРАВЛІННЯ ТРУДОВИМИ РЕСУРСАМИ В ІТ-ПРОЄКТАХ**

### **1.1. Системний аналіз концептуальних основ управління трудовими ресурсами в ІТ-середовищі з урахуванням трансформації парадигм під впливом динаміки цифрової економіки**

Управління трудовими ресурсами в ІТ-середовищі перестає бути лише сферою кадрової політики — воно перетворюється на багат шарову концептуальну систему, що вимагає врахування гнучких моделей організації праці, динаміки глобального ринку знань, цифрової мобільності та алгоритмізації управлінських рішень. З розвитком цифрової економіки класичні підходи до HR-менеджменту, побудовані на ієрархічних структурах і стабільному контракті, поступаються місцем концепціям гнучких компетенцій, платформеного працевлаштування, віддаленої самоорганізації та алгоритмічного контролю. Ці зміни формують нову парадигму управління, в межах якої трудовий ресурс уже не є просто «найманим працівником», а стає суб'єктом у цифровому контексті, який одночасно працює, навчається, адаптується та взаємодіє через дані.

Системний аналіз дозволяє виявити, що в ІТ-компаніях управління трудовими ресурсами все менше залежить від фізичної присутності працівника, а все більше — від ефективного менеджменту цифрових слідів, комунікаційної активності, когнітивної гнучкості та здатності інтегруватися в команду, не прив'язуючись до вертикалі управління. Структура трудових ресурсів ІТ-компаній часто має риси розподіленої, мікроагрегованої системи, де один фахівець може водночас бути залученим до кількох проєктів, а рольові функції змінюються залежно від проєктного циклу. Це ставить перед управлінцями нові виклики — як забезпечити контроль, мотивацію, залучення та інноваційність без надмірної централізації чи втручання в автономність [12].

З метою виявлення глибинних змін у концепціях управління трудовими ресурсами, доцільно здійснити порівняльний аналіз ключових характеристик, які формують управлінське середовище в умовах класичної та цифрової економіки.

Таблиця 1.1 дозволяє структурувати ці зміни, продемонструвати відмінності у підходах до мотивації, організації праці, контролю та адаптації, а також підкреслити, яким чином ІТ-середовище трансформує саму природу трудових відносин [68].

*Таблиця 1.1*

**Характеристика управлінських парадигм трудових ресурсів у класичній і цифровій економіці**

<b>Ознака</b>	<b>Класична економіка</b>	<b>Цифрова економіка (ІТ-середовище)</b>
Структура управління	Вертикальна, функціонально-ієрархічна	Гнучка, мережево-проектна
Форма зайнятості	Тривалий контракт, фіксований графік	Гібридні форми, гіг-праця, віддалене включення
Підходи до мотивації	Матеріальні стимули, премії	Мотивація через виклики, автономію, навчання
Інструменти контролю	Регламент, оцінка за KPI	Моніторинг активностей, AI-аналіз поведінкових патернів
Визначення ролей у команді	Статичні посадові інструкції	Динамічні ролі, що змінюються за фазами проєкту
Ключова мета управління	Виконання функцій	Генерація інтелектуального продукту
Інструменти адаптації	Профпідготовка, інструктажі	Онлайн-курси, менторинг, самонавчання

*(Джерело: розроблено автором на основі [68])*

У системному вимірі, нове управління трудовими ресурсами в ІТ-секторі базується на кількох фундаментальних принципах. По-перше, це принцип інтеграції людини й даних: працівник існує як «цифрова сутність» у корпоративному середовищі, і його продуктивність вимірюється не лише за результатами, а й за рівнем інтеграції в інформаційні потоки. По-друге, принцип мультиконтекстності: працівник не є закріпленим за одним процесом

— його цінність зростає в залежності від здатності адаптуватися до нових контекстів. І, по-третє, принцип самоорганізованого розвитку: знання та компетенції вже не нав'язуються зверху, а з'являються як результат особистісної траєкторії навчання, підтриманої цифровими інструментами й середовищами.

Системний аналіз управління трудовими ресурсами в ІТ-середовищі виявляє кардинальне переосмислення як ролі працівника, так і способу організації процесів. Цифрова економіка не просто трансформує моделі зайнятості — вона формує нову управлінську реальність, де найціннішим є не стабільність, а змінність, не підпорядкування, а самоорганізація, не виконання, а креативність і постійне переосмислення функцій.

У контексті цифрової трансформації будівельного сектору, поняття «концептуальні основи управління трудовими ресурсами в ІТ-середовищі» набуває принципово нового значення. Якщо традиційно трудові ресурси розглядалися як фізичний і технічний потенціал для реалізації будівельних проєктів, то в умовах інформаційного середовища акцент зміщується на інтелектуальну мобільність, цифрову компетентність, здатність до роботи в розподілених середовищах та взаємодію з аналітичними системами. Це передбачає появу нової системи управління, у якій функціональність працівника визначається не лише його технічними навичками, а й здатністю інтегруватися в ІТ-архітектуру підприємства: від BIM-платформ до ERP і SCM-систем [65].

Під концептуальними основами мається на увазі сукупність принципів, моделей і методологічних схем, що визначають логіку залучення, координації, розвитку та оцінювання працівників у середовищі з високою цифровою динамікою. У будівельному підприємстві це включає такі компоненти, як розподілена участь у цифрових проєктах (наприклад, через платформу Autodesk Construction Cloud), використання алгоритмів розподілу навантаження, динамічна атестація знань та цифрове планування трудових ресурсів. Тобто, йдеться не про зміну окремих практик, а про нову парадигму управління, де ключовою одиницею є не «кадрова одиниця», а інтегрований цифровий учасник проєктної діяльності.

Цей підхід є результатом багаторічної еволюції управлінської думки. Наприкінці ХХ століття домінував підхід, згідно з яким працівник був розглянутий як ресурс, що підлягає оптимальному використанню згідно з функціональною структурою підприємства. Пітер Друкер, один з найвпливовіших мислителів у сфері менеджменту, ще у 1990-х роках підкреслював важливість переходу від управління виробничими функціями до управління знаннями, називаючи працівника «носієм компетенції, а не інструментом виконання» [103].

У 2000-х роках Дейв Ульріх започаткував HR-концепцію, у якій трудовий ресурс розглядається як стратегічний партнер у створенні цінності. Він вводить поняття HR value proposition, що у контексті будівельного IT-середовища можна інтерпретувати як здатність працівника бути не просто виконавцем завдань, а джерелом цифрової ініціативи, носієм знань про процеси й учасником стратегічного прийняття рішень [72].

У 2010-х роках Джош Берсін провідний аналітик цифрового HR, акцентує увагу на переході до концепції People Experience, де управління персоналом ґрунтується на безперервному зворотному зв'язку, адаптивному навчанні та вбудованій у процеси аналітиці [11]. Для будівельних компаній це означає, що співробітники повинні бути не просто залученими до проєкту, а й повністю інтегрованими в цифрову інформаційну архітектуру підприємства — через інструменти типу Power BI, PlanRadar, Procore або Navisworks. Таблиця 1.2, яка знаходиться нижче, ілюструє еволюцію поглядів на управління трудовими ресурсами: від ієрархії та стабільності — до цифрової мобільності, самоорганізації й аналітичної інтеграції.

Сучасне будівельне підприємство, що впроваджує IT-рішення в операційні цикли, має розглядати своїх працівників як динамічні, контекстно-залежні компоненти цифрової системи, здатні до самонавчання, адаптації та гнучкої зміни функцій залежно від завдань. Це зумовлює потребу у створенні нових концептуальних моделей управління, що враховують не лише кваліфікацію чи зайнятість, а й здатність людини працювати у цифровій логіці. Таким чином, поняття концептуальних основ управління трудовими ресурсами в IT-середовищі перестає бути винятково HR-функцією — воно стає частиною

стратегічної архітектури підприємства, яка забезпечує його конкурентоспроможність у цифровій економіці.

Таблиця 1.2

**Етапи еволюції концептуальних підходів до управління трудовими ресурсами у цифровому середовищі**

Період	Автор/Школа	Основна концепція	Актуалізація для ІТ-будівництва
1990-ті роки	Пітер Друкер	Людина як носій знань, а не функцій	Інженер — не виконавець, а учасник моделювання рішень
2000-ні роки	Дейв Ульріх	HR як стратегічний партнер	Робітник — учасник цифрової екосистеми ERP та ВІМ
2010–2020 роки	Джош Берсін	Модель «досвіду працівника», People Analytics	Працівник — елемент даних, аналітичного середовища
З 2020-х років	Томас Девенпорт, Б. Зубофф [6]	Цифрова когнітивна праця, алгоритмічне управління	Працівник — гнучкий аналітичний агент у середовищі даних

*(Джерело: розроблено автором на основі [11, 65, 72, 103])*

Поняття цифрового трудового ресурсу в межах будівельного підприємства набуло якісно нового значення з переходом до індустрії 4.0, коли людський капітал перестав розглядатися лише як фізичний або інтелектуальний ресурс, а почав сприйматись як вбудований елемент цифрових інформаційних середовищ. У сучасному розумінні цифровий трудовий ресурс — це не лише працівник як суб'єкт дії, а й як генератор, носій та користувач цифрової інформації, що бере участь у багаторівневому відтворенні проектної, аналітичної й комунікаційної логіки підприємства. Він діє не ізольовано, а у зв'язку з ERP-системами, ВІМ-платформами, AI-модулями, корпоративними хмарами, трекінговими панелями продуктивності та інструментами People Analytics [96].

У будівельній сфері поняття цифрового трудового ресурсу починає набирати ваги тоді, коли інженери, проєктанти, технічні менеджери та навіть виконроби стають частиною інтегрованих ланцюгів даних. Вони не лише

реалізують фізичну побудову об'єкта, а й у режимі реального часу взаємодіють із цифровими проектними оболонками, контролюють прогрес у середовищах типу Procore, Navisworks чи Dalux, фіксують невідповідності через QR-системи або мобільні додатки, підписують звітність у форматах PDF-сертифікації. Тобто трудова діяльність починає супроводжуватись не лише матеріальною дією, а й безперервною генерацією цифрового сліду.

Трансформація поняття розпочалася з теоретичних праць Томаса Девенпорта, який ще в 1998 році вказував на зростання ролі аналітики у роботі фахівців. У подальших роботах він підкреслював, що найефективніші організації — це ті, в яких працівники не просто виконують завдання, а створюють, аналізують і приймають рішення на основі даних. Цю думку розвинув Джон Будауер, який у 2015–2019 роках запропонував термін *digital labor architecture*, маючи на увазі не лише людей, а й спосіб їхньої цифрової залученості в систему: через API-інтеграції, онлайн-платформи, корпоративні мережі та розподілені інтерфейси [60]. Рисунок 1.1, який знаходиться нижче, демонструє взаємозв'язок між працівником будівельної сфери, його цифровою активністю та інфраструктурними цифровими системами підприємства: ERP, BIM, HRIS, мобільні трекери, системи планування.



Рисунок 1.1. Цифровий трудовий ресурс у будівельному IT-середовищі: структурна модель (Джерело: розроблено автором на основі [60])

Досить вагомий внесок у трактування цифрового трудового ресурсу зробила Шошана Зубофф, яка в своїй роботі обґрунтувала, що сучасні працівники є не лише об'єктами управління, а й «генераторами поведінкових даних», які можуть бути використані для прогнозування продуктивності, зміни інтенсивності, потенційних точок вигорання. У будівництві це проявляється, наприклад, у використанні wearable-технологій для моніторингу стану оператора техніки або будівельника, аналізу часу виконання завдань, маршруту переміщення на об'єкті.

Сучасні компанії, зокрема у сфері інженерного девелопменту, дедалі частіше застосовують концепції People Analytics, що базуються на аналізі цифрових слідів — активності у корпоративних системах, ефективності у виконанні завдань, комунікаційної інтеграції, ступеня залученості у командні процеси [15].

Цифровий трудовий ресурс у будівельному підприємстві — це не нове покоління фахівців, а нова форма взаємодії працівника зі змістом праці та інфраструктурою управління. Це ресурс, який не обмежується фізичною присутністю, а охоплює інформаційну участь, структуровану комунікацію, активну взаємодію з цифровими процесами, що дозволяє говорити про перехід до моделі «людина як компонент інформаційної системи управління проектом». У цій парадигмі ефективність оцінюється не лише через результат, а й через те, наскільки працівник здатен створювати, використовувати та інтерпретувати цифрову інформацію в межах життєвого циклу будівельного проекту.

В умовах глибокої трансформації глобальних економічних процесів, спричиненої цифровізацією, відбувається сутнісна зміна у підходах до розуміння трудового ресурсу. Якщо у ХХ столітті працівник переважно розглядався як фізичний або інтелектуальний виконавець завдань, підпорядкований певному робочому місцю в межах вертикальної ієрархії, то у ХХІ столітті, з переходом до цифрової економіки, ця парадигма починає стрімко втрачати актуальність. Трудовий ресурс більше не асоціюється лише з присутністю, годинами роботи або технічними інструкціями. Натомість формується нова конструкція – цифрова сутність працівника, що базується на

його поведінковому профілі, здатності працювати в розподілених командах, взаємодіяти через інформаційні системи й генерувати цінність у цифровому просторі [6].

Такий перехід має концептуальні наслідки. Він руйнує класичне уявлення про працю як фіксовану величину часу і заміщає його ідеєю динамічного, адаптивного, взаємозалежного цифрового учасника. Працівник перестає бути лише елементом операційної моделі — він перетворюється на носія функцій, що оновлюються в реальному часі, і є частиною безперервної комунікації з цифровими платформами. Особливо виразно це проявляється в ІТ-середовищі будівельних підприємств, де трудові ресурси діють у багатшарових структурах управління проектами, взаємодіють із BIM-моделями, планують задачі у хмарних системах, оцінюються через системи КРІ-аналітики, відображаються у візуальних дашбордах і цифрових потоках [21]. На рисунку 1.2 представлено п'ять послідовних етапів трансформації образу трудового ресурсу: від фізичного виконавця – до цифрово-аналітичного агента, що функціонує у зв'язку з ІТ-системами, створює поведінкові дані та виступає учасником цифрового проєктного циклу.



Рисунок 1.2. Трансформація уявлення про трудовий ресурс: від інструменту до цифрової сутності (Джерело: розроблено автором на основі [21])

Парадигмальні зрушення у визначенні трудового ресурсу мають не лише філософське, але й прикладне значення для сучасного управління. Вони призводять до зміни логіки побудови кадрової політики: замість набору посадових обов'язків організації створюють рольові моделі, фокусуються не

на контролі, а на взаємодії через інтерфейси — HRIS, CRM, комунікаційні хаби. Новий трудовий ресурс не лише виконує функцію, а є учасником процесу моделювання своєї праці: через гнучкі графіки, персоналізоване навчання, цифрову аналітику ефективності. У цьому контексті індивідуальна цифрова траєкторія працівника — це не просто дані про його роботу, а й відображення його впливу на результативність підприємства [35].

У науковому дискурсі цю зміну активно підтримують такі автори, як Люсі Кюллер, яка у своїй праці досліджує, як цифрові архітектури змінюють соціальну природу праці, і як в умовах автоматизації зростає значення когнітивної самостійності працівника. У свою чергу, А.Касілі вказує на те, що капіталізація праці у цифрову добу перестає бути пов'язаною з інституційною належністю — основною одиницею стає «індивід у цифровій структурі виробництва» [9]. Таблиця 1.3 відображає контраст між класичною моделлю трудового ресурсу та сучасною цифровою концепцією, що базується на інтеграції працівника у цифрові процеси управління, проектування та координації.

*Таблиця 1.3*

### **Порівняння традиційної та цифрової парадигми трудового ресурсу**

<b>Критерій</b>	<b>Традиційна парадигма</b>	<b>Цифрова парадигма</b>
Основна роль працівника	Виконавець інструкцій	Автономний цифровий учасник процесу
Форма присутності	Фізична, в офісі	Віртуальна, розподілена
Спосіб фіксації результатів	Регламентований звіт, керівник	Цифрові сліди, аналітика систем
Структура взаємодії	Ієрархічна	Платформено-мережева
Інструменти оцінювання	Табелі, формальні КРІ	Дані з ВІ, трекери ефективності, поведінкова аналітика
Тип розвитку	Заплановане навчання	Самонавчання, модульні цифрові курси
Джерело цінності	Виконання завдань	Інтеграція у цифрове середовище підприємства

*(Джерело: розроблено автором на основі [9])*

Цифрова парадигма трудового ресурсу відкриває перед підприємствами принципово нові можливості, але водночас вимагає зміни мислення щодо

управлінських механізмів. У будівельній галузі, де історично домінували матеріальні, технічні та адміністративно-ієрархічні моделі, перехід до цифрової сутності працівника вимагає перегляду цілого ряду управлінських практик: від адаптації і навчання до участі в ухваленні рішень, цифрового аудиту активності й побудови нових метрик ефективності. Більше того, нова модель потребує впровадження середовища, в якому цифровий працівник буде не лише відслідковуваним, а й підтриманим — через аналітичні інструменти розвитку, гнучкі структури відповідальності, можливості самостійного керування траєкторією професійного росту.

Особливо важливим стає поняття цифрової довіри — наскільки працівник готовий і здатен взаємодіяти із цифровою інфраструктурою підприємства без зовнішнього тиску. Тут мова йде не лише про технічні навички, а про зміну управлінського мислення: сучасні організації мають створювати простори, в яких працівник відчуває себе частиною цифрової структури, а не її об'єктом. Це передбачає прозорість алгоритмів, зрозумілість інтерфейсів, доступність навчання, інтерпретованість метрик оцінки [7].

В умовах високої конкуренції на ринку праці будівельні компанії, які не інтегрують концепцію цифрової трудової сутності в свою HR-стратегію, втрачають не лише ефективність, а й довгострокову здатність адаптуватися до змін. Адже працівник, що діє як цифровий агент, не лише виконує завдання — він формує дані, приймає рішення, взаємодіє з платформами, генерує знання й інтерпретує ризики. Саме тому парадигмальні зрушення у визначенні трудового ресурсу є не модою, а структурною реальністю, яка визначає майбутнє управління в будівельній цифровій економіці.

Після концептуального усвідомлення працівника як цифрової сутності, логічним кроком розвитку цифрової управлінської практики в будівельному підприємстві є побудова моделі цифрового працівника — функціонального, аналітичного та поведінкового образу, який об'єднує трудову активність особи з її цифровим слідом, інтерфейсною присутністю, інформаційною інтеграцією та роллю в платформеному середовищі компанії. Така модель передбачає системну візуалізацію не лише традиційних компетенцій працівника, а й його цифрових зв'язків: доступу до систем, аналітичних навичок, ступеня

включеності в проєктні цикли, відповідальності за обробку та трансляцію даних [104].

У сучасному будівельному IT-середовищі працівник вже не обмежується робочим місцем або ділянкою. Він функціонує у просторі даних: завантажує звіти через мобільні додатки, взаємодіє із BIM-моделями, відповідає за цифрову документацію, залишає сліди у CRM і ERP, використовує віртуальні кабінети для погодження рішень. Відтак виникає потреба у чіткому структуруванні його цифрової ролі: які дані він генерує, як впливає на процеси, яка в нього зона доступу, і як його діяльність формує загальну інформаційну архітектуру підприємства.

Для кращого розуміння багаторівневої структури цифрової присутності працівника в сучасному будівельному середовищі доцільно візуалізувати модель цифрового працівника як комплекс взаємозалежних параметрів. Рисунок 1.3 демонструє, як окремі елементи — цифрові компетенції, ролі в інформаційних системах, канали взаємодії з даними та рівні доступу — формують цілісну модель працівника, що функціонує не лише як ресурс, а як активний учасник цифрової архітектури управління підприємством.



Рисунок 1.3. Структура цифрової моделі працівника будівельного підприємства (Джерело: розроблено автором на основі [104])

Побудова моделі цифрового працівника ґрунтується на системі ролей, що виходить за межі посадових інструкцій. Замість фіксованих функцій, кожна

цифрова роль — це набір повноважень, зон відповідальності, доступу до інформаційних систем, включеності в комунікаційні петлі, та рівня аналітичного впливу. Наприклад, одна роль може передбачати внесення даних у BIM, інша — їх верифікацію, ще інша — погодження з технічним наглядом або інтеграцію з контрактною частиною. Саме такий підхід дозволяє створити гнучку, масштабовану структуру, в якій кожна цифрова дія є частиною загального проєктного ланцюга.

Одним із ключових структурних параметрів цифрової моделі працівника є інформаційна взаємодія — здатність не лише передавати або отримувати дані, а й працювати з ними на рівні їх аналітики, очищення, трансляції в рішення. Наприклад, виконроб, що щодня оновлює графік виконання через мобільний додаток, не просто фіксує факт — він впливає на проєктний таймлайн, бюджет, логістику, управлінські рішення. Високий рівень інформаційної взаємодії передбачає участь працівника в автоматизованих процесах, де дані, зібрані ним, згодом потрапляють у BI-панелі, HR-системи, фінансові симуляції [50].

З метою систематизації основних параметрів, що формують модель цифрового працівника в контексті будівельного підприємства, доцільно подати їх у структурованому вигляді. Таблиця 1.4 дозволяє детально проаналізувати ключові компоненти цієї моделі — від компетенцій до ролей і каналів взаємодії — та розкрити їхній вплив на організаційні процеси, управління ресурсами і якість реалізації цифрових стратегій у будівництві.

Модель цифрового працівника в будівельному середовищі — це не просто опис функціоналу, а інтегрована структура, в якій працівник є вузловим елементом інформаційного обміну, джерелом даних, користувачем аналітики та активним агентом у прийнятті рішень. Її впровадження дозволяє підприємству перейти від хаотичного управління персоналом до системної цифрової архітектури трудових ресурсів, у якій забезпечується прозорість, контрольованість і масштабованість усіх процесів. Така модель є фундаментом цифрової зрілості будівельної організації і важливою складовою її стратегічної конкурентоспроможності.

**Компоненти моделі цифрового працівника будівельного підприємства**

<b>Компонент моделі</b>	<b>Змістове наповнення</b>	<b>Вплив на організацію</b>
Цифрові компетенції	Вміння працювати з BIM, ERP, CRM, мобільними додатками	Забезпечення безперервності процесів і цифрових оновлень
Цифрова роль	Функція у цифровому середовищі: оператор даних, погоджувач, редактор	Формує розподілення відповідальності у цифрових процесах
Інформаційна взаємодія	Канали передачі, обробки, модифікації даних	Зумовлює прозорість, швидкість і надійність прийняття рішень
Рівень цифрового доступу	Обсяг і глибина прав у платформах: читання, запис, адміністрування	Регулює ризики, підвищує кібербезпеку і структурованість
Відображення в системах обліку	Наявність і повнота цифрового профілю, активність у середовищі	Джерело для аналітики HR, ресурсного планування, оцінювання

*(Джерело: розроблено автором на основі [50])*

Подальший розвиток моделі цифрового працівника у будівельному підприємстві передбачає поглиблення не лише технічного, але й організаційно-поведінкового виміру. Від інтеграції у цифрове середовище залежить не лише доступ до ресурсів або швидкість виконання завдань, а й рівень залученості працівника, його ідентифікація з командою, відчуття впливу на результат. У цьому контексті все більшої ваги набуває поняття цифрового лідерства, коли працівник незалежно від посади демонструє ініціативу в управлінні цифровими процесами: бере на себе відповідальність за оптимізацію звітності, впровадження нових інструментів, координацію в середовищах спільної роботи.

Додатково важливо розглядати стійкість цифрового працівника — його здатність адаптуватися до змін платформ, нових аналітичних вимог, трансформацій у цифрових процесах. Така стійкість забезпечується не лише внутрішніми навичками, а й підтримкою з боку підприємства: регулярними тренінгами, цифровими менторськими програмами, інфраструктурою для самоосвіти, інтегрованими цифровими довідниками. Компанії, що ігнорують

цей аспект, стикаються з демотивацією, помилками в даних, цифровими розривами між поколіннями працівників [45].

Також слід звернути увагу на інституціалізацію цифрової моделі працівника в рамках управлінської політики. Це означає, що цифровий профіль працівника має бути не лише технічним елементом (входом у систему чи обліковим записом), а частиною HR-стратегії. Наприклад, в оцінюванні продуктивності має враховуватись не лише кількість виконаних завдань, а й якість цифрової взаємодії: швидкість обробки даних, своєчасність оновлень у ВІМ, коректність внесеної інформації. У перспективі цифровий профіль стане основою для автоматизованих кар'єрних траєкторій, персоналізованих навчальних маршрутів і прогнозування розвитку працівника.

Таким чином, модель цифрового працівника є не статичним шаблоном, а динамічним інструментом трансформації управління персоналом у будівельній компанії. Вона поєднує структурну логіку цифрового підприємства з людською гнучкістю, аналітикою та проєктним мисленням. Її впровадження дозволяє підприємствам не лише підвищити ефективність, а й створити кероване, прогнозоване, масштабоване середовище, де кожен працівник — це не просто ланка, а носій цінності в цифровій системі створення будівельного продукту.

## **1.2. Теоретичні основи мультиагентного моделювання у системах управління трудовими ресурсами з акцентом на міждисциплінарну інтеграцію та поведінкову складову**

У сучасних умовах цифровізації управлінських процесів усе більшої актуальності набуває концепція мультиагентного моделювання як інструменту системного аналізу та динамічної адаптації до змінних параметрів зовнішнього й внутрішнього середовища організації. У системах управління трудовими ресурсами ця технологія розглядається як спосіб відображення складної взаємодії між індивідуумами, підрозділами, інформаційними потоками та стратегічними цілями підприємства. Особливої ваги набуває здатність мультиагентних моделей враховувати поведінкові характеристики працівників,

а також відображати процеси колективного прийняття рішень, мотивації, координації та конфліктів.

Теоретичні засади мультиагентного моделювання ґрунтуються на уявленні про окремі агенти як автономні одиниці з визначеними цілями, правилами поведінки, алгоритмами прийняття рішень та механізмами комунікації. У контексті управління трудовими ресурсами агенти можуть репрезентувати як окремих працівників, так і функціональні групи, відділи або навіть стратегічні блоки підприємства. При цьому особливу увагу приділяють ролі агента у виробничому циклі, його адаптивним реакціям на зміни умов праці, соціальним впливам, конфліктним ситуаціям і впровадженню нових управлінських рішень. Важливо, що поведінка агентів моделюється не лише з точки зору алгоритмічного реагування, а й з урахуванням емоцій, рівня залучення, ступеня відповідальності й попереднього досвіду, що відкриває простір для поєднання точних наук з психологією праці, соціологією організацій та навіть нейроекономікою.

Міждисциплінарний підхід у побудові мультиагентних моделей дозволяє об'єднати методи комп'ютерного моделювання, теорію ігор, соціальні теорії взаємодії, економіко-математичні алгоритми та дані з HR-аналітики. Така інтеграція є необхідною умовою для розкриття складної системної природи трудових ресурсів у динамічному середовищі [77].

Наприклад, у моделюванні адаптації до змін умов праці важливо враховувати як прагматичні фактори (оплата, навантаження), так і латентні впливи — когнітивні дисонанси, ієрархічний тиск, соціальну інерцію чи наявність лідерів думок. Саме мультиагентна парадигма дозволяє з високою точністю відтворити ці гетерогенні взаємозв'язки. Щоб глибше розкрити внутрішню логіку мультиагентного моделювання у сфері управління трудовими ресурсами, варто звернутися до рисунку 1.4, який узагальнює взаємозв'язки між агентами, середовищем та міждисциплінарними елементами.



Рисунок 1.4. Структура мультиагентної моделі в системі управління трудовими ресурсами з поведінковими та міждисциплінарними елементами  
(Джерело: розроблено автором на основі [77])

Середовище моделі включає елементи політик підприємства, інформаційного впливу, технологічних змін і зовнішнього соціального тиску, що разом формують поле прийняття рішень для агентів. Включення в модель факторів з нейроповедінкових дисциплін дозволяє враховувати емоційні реакції, схильність до ризику, формування довіри або конфлікту.

Розширення таких моделей відбувається через додавання інструментів адаптивного навчання агентів (зокрема reinforcement learning), симуляцію групової динаміки за правилами соціометрії, а також через інтеграцію з HR-аналітикою для валідації симуляцій на основі реальних даних підприємства. Це перетворює мультиагентне моделювання не лише на інструмент стратегічного планування, а й на гнучку платформу поведінкового прогнозування з високим рівнем точності в управлінні персоналом [58].

Продовження моделі в напрямку передбачуваної поведінки дозволяє оцінювати ймовірність текучості кадрів, ефективність внутрішніх комунікацій, рівень довіри до управлінських рішень або ж потенціал до самоорганізації у

кризових умовах. Таким чином, мультиагентна методологія поступово формує нову епістемологію в дослідженнях трудових ресурсів — не як сукупності фіксованих одиниць праці, а як динамічної мережі суб'єктів з індивідуальною мотивацією, ціннісними установками та адаптивними патернами поведінки.

Упродовж розвитку мультиагентних підходів до моделювання організаційних систем ключовим концептом, який визначає контекст поведінки агентів, є поняття "середовище взаємодії". У випадку будівельного підприємства середовище взаємодії агентів відображає сукупність структурних, інформаційних та соціальних обмежень і впливів, які формують умови прийняття рішень, механізми координації та адаптивні реакції працівників. Це середовище є неоднорідним, динамічним і мультимірним — воно включає як формальні правила (організаційну ієрархію, політики безпеки, технічні регламенти), так і неформальні норми (соціальні зв'язки, внутрішні уявлення про справедливість, культуру взаємодії) [57].

Структурне тло охоплює формальну організаційну архітектуру: розподіл повноважень, інфраструктуру, матеріальні ресурси, підсистеми контролю, процедурні обмеження. У будівельному контексті це включає логістику постачання, технічну документацію, проектно-кошторисні модулі, техніко-технологічну ієрархію ділянок і бригад. Наприклад, Генрі Мінцберг ще у класифікував організаційні структури з урахуванням того, як вони визначають канали впливу на працівників, акцентуючи, що в умовах проектної структури, типової для будівництва, агенти мають високу автономію, але й високий ступінь взаємозалежності [36].

Інформаційне тло формує масив повідомлень, сигналів, даних і знань, до яких мають доступ агенти. У будівельному підприємстві це можуть бути системи ERP, BIM-моделі, графіки виконання, технічні звіти, канали комунікації між підрозділами. Ікіро Нонака та Хіротакі Такеучі у своїй концепції створення організаційного знання підкреслили важливість передання «мовчазного знання» через практичну взаємодію працівників, що потребує формування інформаційного середовища, в якому існує не лише доступ до даних, а й довіра, адаптивність і горизонтальні зв'язки [39].

Соціальне тло включає емоційні зв'язки, лідерство, субкультури, формальні та неформальні мережі, які можуть мати вирішальне значення для прийняття рішень агентами. Згідно з підходом Етьєна Венгера, описаним у його концепції «спільнот практики», організаційне навчання відбувається через спільні дії, взаємну підтримку та координацію в межах мікросоціальних структур [62]. У будівельному середовищі, де панують колективні форми виконання завдань, ця спільнотна взаємодія має критичне значення в умовах ризику або високої непередбачуваності.

Щоб узагальнити наукові підходи до трактування середовища агентної взаємодії, доцільно звернутися до таблиці 1.5, яка охоплює основні типи середовища, авторів і приклади застосування.

*Таблиця 1.5*

**Підходи до трактування середовища взаємодії агентів у мультиагентних моделях трудових систем**

Автор / Школа	Тип середовища	Основні положення	Приклад застосування (будівництво)
Генрі Мінцберг	Структурне	Формальні структури визначають автономію та координацію	Матрична структура бригад і підрозділів
Ікіро Нонака, Хіротака Такеучі	Інформаційне	Мовчазне знання поширюється через довіру та неформальні практики	Передача досвіду майстрів через комунікаційні платформи
Етьєн Венгер	Соціальне	Спільноти практики як джерело неформального навчання	Командна підтримка між інженерами та логістами
Девід Сноуден [100]	Комбіноване (Synefin)	Види середовищ формують стилі прийняття рішень – від простих до хаотичних	Вибір управлінської стратегії в умовах форс-мажору
Аксель Боррманн [69]	Інформаційне/структурне	ВІМ як основа для цифрового середовища взаємодії	Координація завдань через інтеграцію ВІМ-модулів

*(Джерело: розроблено автором на основі [36, 39, 62, 69, 100])*

Розширення уявлення про середовище взаємодії агентів у межах мультиагентного моделювання дозволяє перейти від статичної структурної інтерпретації до динамічного аналізу контексту, в якому трудові ресурси функціонують як адаптивні та чутливі до змін суб'єкти. У випадку будівельного підприємства це особливо важливо, адже взаємодія агентів відбувається у складних просторово-часових умовах, часто з обмеженим доступом до повної інформації, під тиском жорстких строків, технічних обмежень і високої вартості помилок. Саме тому кожен тип середовища — структурне, інформаційне та соціальне — потребує окремої конфігурації параметрів і алгоритмів впливу на поведінку агентів.

У структурному аспекті моделі можуть враховувати зміну конфігурації повноважень, появу нових посадових ролей, централізацію або децентралізацію управління. Наприклад, переведення певних функцій з ділянок до центрального штабу змінює рівень автономії агентів і перебудовує траєкторії прийняття рішень. Інформаційне середовище, у свою чергу, здатне істотно впливати на швидкість реагування та координацію — при запровадженні нових ERP-модулів, систем відстеження прогресу чи сенсорних платформ (наприклад, IoT-рішень на будмайданчику), агенти отримують нову логіку поведінки, яка базується на актуальній інформації, а не на припущеннях чи досвіді [53].

Соціальний контекст несе ще складнішу динаміку — зміна лідера, конфліктна ситуація або навпаки, поява сильного неформального лідера (прораба, якого поважають навіть без формальних повноважень), здатна різко змінити результативність усієї команди. У мультиагентних моделях такі впливи реалізуються через параметри індексу довіри, соціальної згуртованості, адаптивної здатності до колективної поведінки. За результатами досліджень Катіяра та Кумана, включення соціальних змінних до симуляцій будівельних проєктів підвищило точність прогнозу ефективності робіт майже на 27 %, що підтверджує важливість цієї складової [27].

Варто зазначити, що між окремими типами середовища існує не лише паралельне функціонування, а й активні перехресні зв'язки. Наприклад, зміна структурного розподілу повноважень може посилити або ослабити

неформальні соціальні зв'язки; введення нової інформаційної платформи здатне спричинити втрату довіри через непрозорі алгоритми або ж, навпаки, стимулювати активне спільне навчання. Ці взаємозв'язки потребують комплексного урахування у моделюванні, а не ізольованої реалізації окремих параметрів.

Саме тому сучасні мультиагентні моделі, що застосовуються в управлінні трудовими ресурсами будівельних підприємств, тяжіють до гібридних архітектур, у яких закладено можливість ієрархічного накладання середовищ, їхньої вагової інтеграції, зворотного зв'язку та рекурсивного навчання. Це дозволяє будувати адаптивні сценарії, що враховують зміну політики керівництва, варіативність людської поведінки та складну динаміку будівельного процесу.

У перспективі, поєднання трьох типів середовища у цифровому контурі організації дає змогу створити симбіотичну систему управління, яка не лише прогнозує поведінку працівників, а й активно формує її, враховуючи етику впливу, когнітивну складність рішень та соціальну легітимність управлінських дій. Таким чином, мультиагентне моделювання трансформується з інструменту аналізу у повноцінний засіб стратегічного управління людським капіталом.

У межах мультиагентного моделювання систем управління трудовими ресурсами будівельних підприємств, поведінкова економіка відіграє роль ключової методологічної основи для врахування нелінійної, емоційно забарвленої та когнітивно обмеженої поведінки агентів. Це поняття фокусується на вивченні того, як реальні люди (а в агентному моделюванні — програмні агенти, які їх імітують) ухвалюють рішення в умовах невизначеності, обмеженої раціональності, інформаційного шуму та соціального тиску. На відміну від класичної економіки, де вважається, що працівники діють виключно раціонально, поведінкова економіка припускає наявність упереджень, емоційних реакцій і рутинних моделей, що впливають на економічну активність.

Початок формування цього напрямку пов'язаний із працями Герберта Саймона, який запровадив термін "обмежена раціональність", підкреслюючи,

що люди рідко приймають оптимальні рішення через обмеження у сприйнятті, пам'яті та обробці інформації. Пізніше Деніел Канеману межах теорії перспектив (prospect theory) показали, що люди частіше переоцінюють втрати й недооцінюють вигоди, приймаючи рішення не на основі логіки, а під впливом когнітивних викривлень. Зокрема, Канеман у своїй книзі детально описав систему подвійного мислення, що стала основою для поведінкових алгоритмів у мультиагентному моделюванні [82].

У практиці будівельного підприємства це має безпосереднє застосування: працівники часто приймають рішення на основі інтуїції, попереднього досвіду, страху перед покаранням чи довіри до неформального авторитету, а не внаслідок аналізу показників ефективності чи нормативних документів. Поведінкова економіка дозволяє формалізувати такі патерни у вигляді наборів правил, які потім закладаються в агентні моделі. Наприклад, фактор втрати мотивації через надлишковий контроль або зміна реакцій через соціальне порівняння в бригаді можуть бути змодельовані через використання функцій втрат, емоційних коефіцієнтів або нейронних підсистем прийняття рішень у програмному агенті.

Щоб візуально представити інтеграцію поведінкової економіки в мультиагентні моделі управління трудовими ресурсами, розглянемо рисунок 1.5, що демонструє, як когнітивні та емоційні фактори формують поведінку агентів у середовищі будівельного підприємства.

Агенти (представлені як працівники, менеджери, бригади) взаємодіють не лише з інформаційним і структурним середовищем, а й з модулями, які відповідають за емоційний стан, когнітивну оцінку ситуації та соціальні впливи. Модель включає змінні, як-от рівень тривожності, страх санкцій, прагнення до справедливості, а також ефекти, пов'язані з довірою до керівництва чи реакцією на зміну політик.

Таке багатовимірне моделювання дозволяє спрогнозувати нестандартні реакції працівників, наприклад — масову демотивацію після зміни форми звітності або затримки виплат, навіть за умов стабільних обсягів робіт.

Сучасні автори, як-от Річард Талер, який отримав Нобелівську премію з економіки у 2017 році, активно просувають поняття "*nudge*", тобто м'якого підштовхування до певної поведінки без прямого примусу.



Рисунок 1.5. Роль поведінкової економіки в мультиагентному моделюванні трудових ресурсів будівельного підприємства (Джерело: розроблено автором на основі [83])

У контексті будівельного підприємства такі "підштовхування" можуть включати розробку інтерфейсів у мобільних додатках для робітників, які мотивують до заповнення звітів через гейміфікацію, візуалізацію успіхів бригади або надання зворотного зв'язку в реальному часі. У мультиагентному моделюванні ці елементи інтегруються як тригери впливу, що модифікують траєкторію поведінки агента.

Іншим важливим автором у цьому контексті є Касс Санстейн, який у співпраці з Талером розвинув концепцію поведінкових політик для державного управління. Ця ідея вже знаходить втілення в практиці будівельних консорціумів, де поведінкові підходи використовуються при впровадженні

змін у системах безпеки, оцінки продуктивності та корпоративної відповідальності.

Поведінкова економіка в мультиагентному моделюванні не є лише додатковим інструментом — вона перетворює модель з математичної структури в живу симуляцію, яка враховує психологічну і соціальну природу працівника. Усе це сприяє побудові гнучких управлінських сценаріїв, де модель не тільки відтворює реальність, а й дозволяє прогнозувати її зміни на основі поведінкових реакцій трудових ресурсів.

У мультиагентному моделюванні систем управління трудовими ресурсами будівельного підприємства ключовим параметром, що визначає динаміку симуляції, виступає тип взаємодії між агентами. Трудові відносини в межах будівельного проєкту не зводяться до простого обміну командами чи інформацією — це складна система колективних, суперечливих, залежних і багаторівневих зв'язків. Саме тому в моделях високої точності необхідно не лише відображати структуру процесів, а й типологізувати самі взаємодії. До найбільш репрезентативних типів взаємодій у будівельному середовищі належать: кооперативні, конфліктні, ієрархічні та мережеві. Їх правильне виявлення та моделювання визначає ступінь реалізму, адаптивності й діагностичної сили мультиагентної системи.

Кооперативна взаємодія передбачає спільну мету агентів, взаємну підтримку, узгодження рішень і можливість компромісу. У будівельному контексті це, наприклад, бригади з різних спеціалізацій, які працюють на одному об'єкті (бетонувальники й електрики), де узгодженість дій критично важлива для дотримання графіків. Кооперативна взаємодія реалізується в агентній моделі через правила спільного прийняття рішень, розподіл ресурсів, відстеження рівня довіри, мотивації й взаємної вигоди. При цьому важливими є параметри, як-от «індекс кооперації» або «спільне очікуване завершення задачі».

Конфліктна взаємодія виникає там, де агенти мають суперечливі цілі, конкурують за ресурси або діють в умовах обмеженої інформації. Це можуть бути приклади, коли технічна служба проєкту наполягає на внесенні змін до конструктиву, що затягує строки, у той час як підрядник має зобов'язання

перед замовником за фіксованим терміном. У мультиагентному моделюванні такі взаємодії моделюються через теорію ігор, механізми блокування дій, стратегічне приховування інформації, параметри ескалації або компромісу. Їх врахування дає змогу передбачити точки ризику — наприклад, коли одночасне виконання кількох задач призводить до системного збою. Для кращого розуміння взаємозв'язків між типами агентних взаємодій і специфікою трудових відносин у будівельному середовищі, розглянемо рисунок 1.6, який ілюструє динамічну систему взаємодії агентів за чотирма основними типами.



Рисунок 1.6. Типи агентних взаємодій у будівельному проєкті та їхній вплив на поведінку моделі (Джерело: розроблено автором на основі [54])

Ієрархічна взаємодія типова для будівельних підприємств зі складною структурою — наприклад, коли рішення про зміни в графіку робіт чи використання матеріалів приймається лише керівником проєкту або інвестором. В агентних моделях ієрархічна взаємодія реалізується через «агентів-регуляторів» або «центри впливу», які мають вищий пріоритет при розподілі рішень, а інші агенти дотримуються їх команд. Такий підхід дозволяє моделювати субординацію, інерційність ухвалення змін і затримки в комунікації. Ієрархічні моделі добре ілюструють вплив вертикалі управління на ефективність виконання критичних задач, але часто потребують додаткового шару для корекції зворотного зв'язку.

Мережева взаємодія базується на горизонтальних зв'язках, обміні інформацією без централізованого контролю, адаптивному реагуванні на дії інших агентів [54]. Це характерно для субпідрядників, IT-підтримки, технічного аудиту, які взаємодіють через цифрові платформи або за межами формальної ієрархії. У мультиагентному моделюванні така структура реалізується через децентралізовану мережу з можливістю динамічного утворення тимчасових альянсів, передачі знань, перерозподілу навантаження.

Важливою є здатність агентів навчатися в процесі симуляції, що робить мережеву взаємодію ключовою у сценаріях реагування на кризові ситуації чи зміни проєктного середовища [47]. Для порівняльного аналізу доцільно представити узагальнення у вигляді таблиці 1.6, де наведено основні характеристики кожного типу взаємодії та їхній вплив на параметри моделі.

*Таблиця 1.6*

**Характеристика типів агентної взаємодії у трудових моделях  
будівельного проєкту**

<b>Тип взаємодії</b>	<b>Основні ознаки</b>	<b>Приклади в будівництві</b>	<b>Вплив на мультиагентну модель</b>
<b>Кооперативна</b>	Спільна мета, компроміси, обмін ресурсами	Спільна робота бригад на об'єкті	Підвищення ефективності, прогнозованість, взаємодопомога
<b>Конфліктна</b>	Суперечливі цілі, конкуренція, прихована інформація	Суперечка між технаглядом і підрядником	Можливі збої в симуляції, поява «вузьких місць»
<b>Ієрархічна</b>	Централізоване управління, вертикаль рішень	Рішення керівника проєкту обов'язкове для усіх	Висока підконтрольність, але ризик затримок і жорсткості
<b>Мережева</b>	Горизонтальні зв'язки, обмін знаннями, гнучкість	Субпідрядники, які співпрацюють через BIM-системи	Гнучкість, адаптивність, але потребує механізмів самоорганізації

*(Джерело: розроблено автором на основі [47])*

Ефективне мультиагентне моделювання трудових процесів у будівельному середовищі повинно виходити з комплексного урахування всіх чотирьох типів взаємодій, із гнучким перемиканням логік у залежності від фази проекту, типу учасників і специфіки завдань. Включення цієї типології до структури моделі дозволяє не лише точно відтворити реальні умови праці, а й сформувати інструменти адаптивного управління — з урахуванням мотивації, конфліктності, структурної позиції агента й рівня залученості до мережі проекту.

Розширення агентного моделювання за рахунок типологізації взаємодій відкриває нові можливості для стратегічного управління трудовими процесами в будівельних проєктах. Насамперед це дозволяє не лише імітувати поточну організаційну динаміку, а й моделювати майбутні сценарії трансформацій — наприклад, перехід від жорстко ієрархічної моделі до мережевої з підвищеною гнучкістю або адаптацію до конфліктної поведінки в умовах ресурсного дефіциту. У таких симуляціях можна аналізувати вплив ключових змін — зміна керівника проєкту, впровадження нових регламентів або заміна субпідрядника — на всю модель у цілому, оцінюючи каскадний ефект на поведінку інших агентів.

Крім того, взаємодійні патерни мають безпосередній вплив на емоційно-когнітивні змінні, закладені в поведінкові модулі агентів. Наприклад, у конфліктному середовищі підвищується рівень стресу, зростає ризик ірраціональних рішень, знижується схильність до кооперації. У моделі це може бути реалізовано через зниження ймовірності обміну інформацією, підвищення «індексу недовіри» або появу тимчасових стратегій уникнення. Навпаки, у кооперативному середовищі зростає показник соціального капіталу, і модель демонструє ефекти взаємного підсилення [56].

Із подальшим ускладненням будівельних проєктів та зростанням вимог до якості, швидкості й точності виконання робіт, актуальним постає питання не лише координації дій виконавців, а й прогнозування змін у їх поведінці. Особливо критичними змінними в цьому контексті виступають мотивація, ефективність виконання завдань і рівень стресостійкості. Саме ці параметри, хоч і не мають безпосереднього матеріального виміру, можуть істотно

вплинути на збої в проєкті, якість рішень, командну синергію та управлінську адаптивність. Щоб забезпечити високий ступінь точності в мультиагентному моделюванні трудових ресурсів, доцільно інтегрувати спеціалізовані інструменти поведінкового моделювання та машинного навчання, які дозволяють імітувати не лише зовнішні дії агентів, а й внутрішні стани — зокрема зміни у психологічному фоні, когнітивному навантаженні й мотиваційних установках.

Поведінкове моделювання у сфері управління трудовими ресурсами в будівництві базується на гіпотезі, що працівники, зокрема агенти у цифровій моделі, не є повністю раціональними. Вони приймають рішення під впливом емоцій, минулого досвіду, рівня залученості до команди та ставлення до керівництва. Відтак в модель можуть інтегруватися індикатори, які дозволяють оцінювати й прогнозувати такі стани, як вигорання, апатія, збудження, тривожність або інтуїтивна реакція. Така інтеграція здійснюється шляхом побудови віртуального поведінкового профілю для кожного агента, який містить змінні типу “індекс мотиваційного балансу”, “емоційна дельта”, “тенденція до імітації дій інших агентів”.

Щоб реалізувати ці механізми у формалізованому вигляді, до моделі впроваджуються алгоритми машинного навчання, які здатні адаптувати поведінку агентів до змінних умов, зчитуючи, аналізуючи та узагальнюючи тренди в їх діях. На перших етапах йдеться про системи, які аналізують історію рішень та визначають, за яких умов агент діє найефективніше. У перспективі такі системи навчаються прогнозувати, в якому емоційному стані знаходиться агент на основі патернів поведінки, швидкості реакцій, часу бездіяльності або навпаки — надмірної активності [64]. Щоб ілюструвати інтеграцію поведінкових та машинних компонентів у мультиагентне середовище, нижче представлено рисунок 1.7, яка демонструє зв'язки між підсистемами, що відповідають за мотивацію, ефективність і стресостійкість у симуляції цифрового будівельного процесу.

Механізми машинного навчання, зокрема алгоритми підкріпленого навчання (Reinforcement Learning), дають змогу моделювати адаптацію агентів через систему “винагород і покарань”.

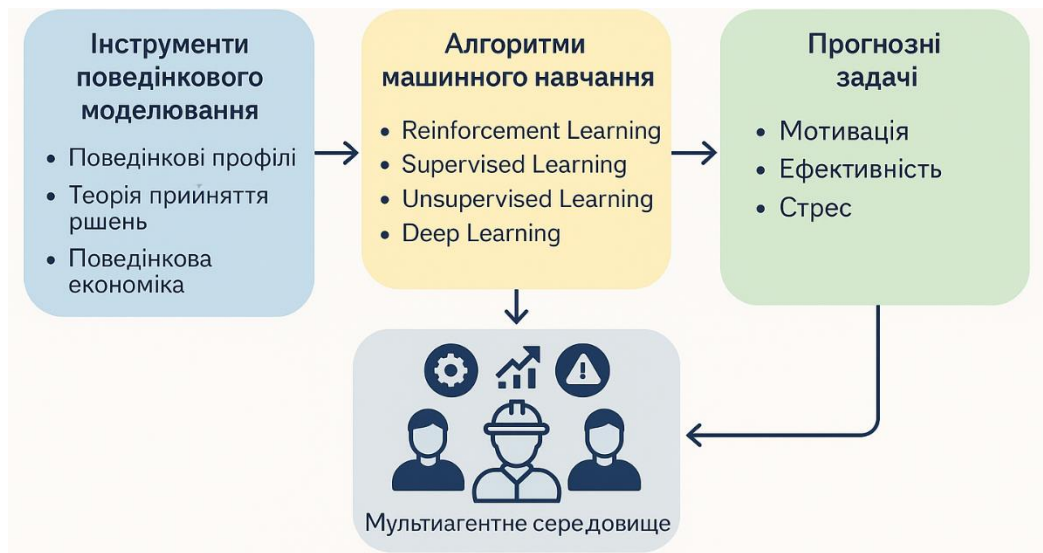


Рисунок 1.7. Інтеграція інструментів поведінкового моделювання та машинного навчання до мультиагентної архітектури будівельного підприємства (Джерело: розроблено автором на основі [64])

Така система в мультиагентній симуляції дозволяє агенту навчатися на основі результатів власних дій — наприклад, уникати перевантаження або змінювати підхід до взаємодії з іншими, якщо раніше обраний підхід призвів до затримки в циклі виконання. У свою чергу, контрольоване навчання (Supervised Learning) базується на історичних даних і дозволяє передбачати ймовірність зниження мотивації на основі подібних ситуацій у минулому — скажімо, у випадках зміни режиму роботи, зменшення бонусів чи конфліктів у команді [2].

Також варто виокремити роль кластеризації, що дозволяє автоматично групувати агентів за подібними поведінковими рисами — це може бути вкрай ефективним для розробки диференційованих управлінських стратегій: наприклад, одна й та сама модель управління буде стимулюючою для “ініціативних” працівників, але викличе супротив у “обережних” або “реактивних” працівників. А застосування глибинного навчання (Deep Learning) відкриває шлях до розпізнавання складних кореляцій — наприклад, виявлення зв’язку між тривалим перебуванням на одному етапі робіт і зниженням емоційної залученості. Щоб систематизувати наведені інструменти за критеріями призначення, типу реалізації та потенційного ефекту в мультиагентному середовищі, нижче наведено таблицю 1.7 з аналітичними характеристиками.

**Інструменти поведінкового моделювання та машинного навчання у  
мультіагентних системах для будівництва**

<b>Інструмент</b>	<b>Призначення</b>	<b>Реалізація в моделі</b>	<b>Тип прогнозу</b>
<b>Reinforcement Learning (RL)</b>	Оптимізація дій на основі нагороди	Навчання агентів через реакцію на події	Довгострокова ефективність
<b>Supervised Learning</b>	Прогнозування поведінки за минулими даними	Побудова моделей продуктивності	Мотивація, ризик вигорання
<b>Unsupervised Learning</b>	Кластеризація агентів за типами поведінки	Автоматичне виявлення профілів	Стиль керування, адаптація
<b>Deep Learning</b>	Аналіз складних патернів взаємодії	Інтеграція з датчиками, wearable-аналітикою	Стресостійкість, когнітивне навантаження
<b>Поведінкове моделювання</b>	Формалізація емоцій, упереджень, мотивації	Побудова мотиваційних і когнітивних модулів	Рівень залученості, емоційна реакція

*(Джерело: розроблено автором на основі [16])*

Результатом такої інтеграції є побудова моделі, здатної працювати не лише з зовнішніми умовами праці, а й із внутрішніми станами суб'єктів — тобто, модель, що розуміє, як агент "почувається", як він адаптується до змін, та як реагує на стрес чи підтримку. Це дозволяє мультіагентному середовищу не лише бути точним симулятором реального виробничого процесу, а й слугувати системою прийняття рішень, яка заздалегідь визначає, де саме і чому потенційно виникне ризик, зниження продуктивності або конфлікт. У цьому контексті мультіагентне моделювання трансформується у передбачувальну, розумну і динамічну систему управління трудовими ресурсами, що є одним із найбільш перспективних напрямів цифрової трансформації будівельної галузі.

### **1.3 Класифікація типів невизначеності в управлінні ІТ-проєктами та їхній вплив на формування стратегій агентного розподілу трудових ресурсів**

Управління ІТ-проєктами характеризується високим ступенем динамічності, складності й мінливості, що зумовлює постійну наявність різноманітних форм невизначеності, які прямо або опосередковано впливають на ефективність організаційних рішень, зокрема у сфері розподілу трудових ресурсів. Особливу складність становить поєднання технічної невизначеності, яка випливає з інноваційності рішень, із соціальною та управлінською невизначеністю, що пов'язана з поведінкою агентів — членів команд, експертів, замовників. У мультиагентних системах, які все частіше застосовуються для моделювання таких проєктів, необхідним є формалізований підхід до класифікації типів невизначеності з метою адаптивної побудови стратегій розподілу ресурсів. Адже кожен тип невизначеності вимагає особливої логіки планування, резервування та гнучкості в прийнятті рішень.

Сучасна наукова думка схильна розрізняти щонайменше чотири домінуючі типи невизначеності в управлінні ІТ-проєктами: технічна, ринкова, організаційна та поведінкова. Технічна невизначеність охоплює невпевненість у виборі технологій, наявності потрібних компетенцій, інтеграції нових рішень в архітектуру проєкту. Ринкова — пов'язана з невизначеним запитом клієнта, змінами в середовищі, конкуренцією або коливанням вартості реалізації. Організаційна невизначеність виникає внаслідок слабкої координації, нечіткого розподілу ролей, множинності контрагентів. Поведінкова невизначеність стосується неможливості точно передбачити реакції виконавців, рівень мотивації, опір змінам чи колективні ефекти. Усі ці форми впливають на динаміку мультиагентного середовища, яке має виявляти, адаптуватися й перебудовувати внутрішні алгоритми розподілу роботи в реальному часі [33].

Наявність таких різних форм невизначеності формує потребу в класифікованому підході до створення стратегій розподілу ресурсів. У рамках

мультиагентного моделювання це означає, що агенти повинні не лише володіти внутрішніми змінними, які реагують на зовнішнє середовище, а й мати вбудовані стратегії поведінки залежно від типу загрози: від стабільного перерозподілу задач до введення буферного резерву або коаліційної взаємодії з іншими агентами [17]. На основі класифікації невизначеностей формуються алгоритми адаптивного управління — наприклад, агент, що працює в умовах ринкової невизначеності, має підвищену здатність до сценарного аналізу та побудови альтернатив, тоді як у технічному середовищі акцент зміщується на взаємодію з експертними агентами та відкладання критичних рішень до отримання перевірених даних.

Щоб узагальнити класифікацію типів невизначеності та їхній вплив на структуру мультиагентного розподілу ресурсів, подаємо нижче рисунок 1.8.

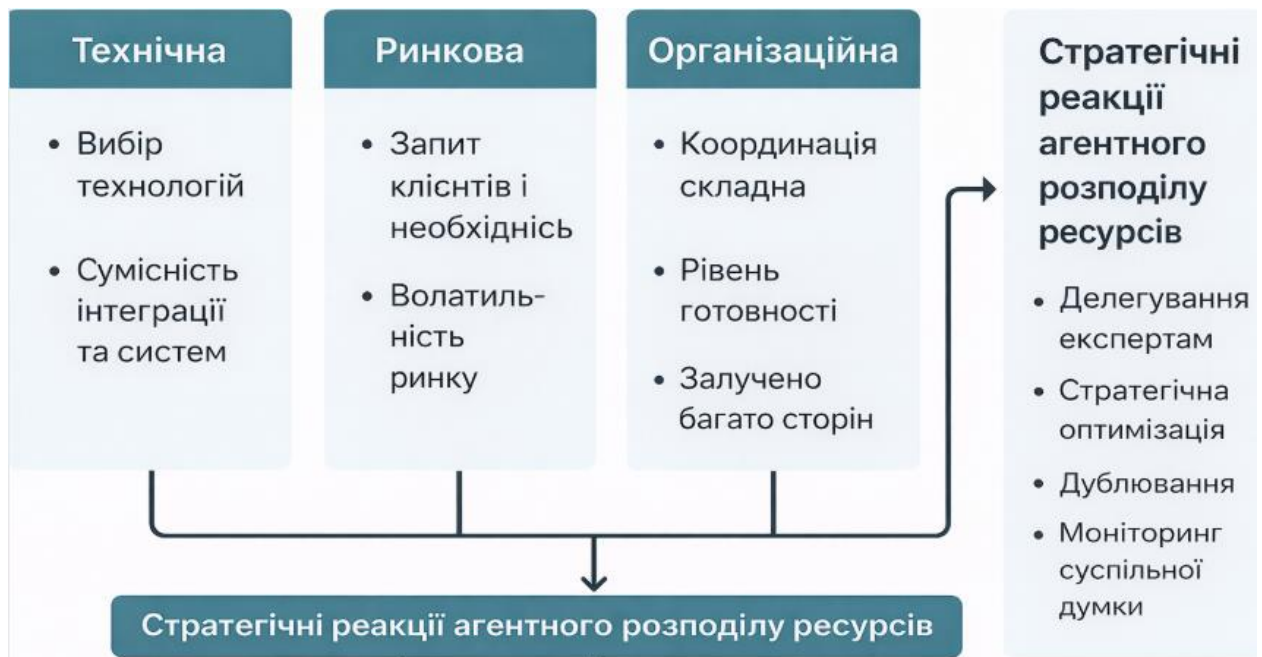


Рисунок 1.8. Класифікація типів невизначеності в ІТ-проектах і стратегічні реакції мультиагентної системи розподілу ресурсів (Джерело: розроблено автором на основі [17])

Кожен тип невизначеності пов'язаний із певною групою стратегічних реакцій, які в агентному середовищі реалізуються через локальні правила, спільні протоколи або централізовані директиви. При технічній невизначеності використовується стратегія делегування складних задач у вузькі експертні кластери агентів, організаційна невизначеність нейтралізується через тимчасове дублювання ролей, поведінкова — через

моніторинг соціальних сигналів і реконфігурацію команд у режимі реального часу. У випадку ринкової нестабільності мультиагентна система вибудовує розподіл за принципом мінімізації втрат при найгіршому сценарії — через стохастичну оптимізацію.

Впровадження класифікації невизначеності в агентну архітектуру дозволяє перейти від загального підходу до стратегій розподілу ресурсів до індивідуально адаптованої моделі, яка враховує контекст, рівень ризику та поточну здатність до самоорганізації всередині колективу. Це не лише підвищує стійкість системи до зовнішніх коливань, але й створює умови для формування внутрішнього балансу між централізованим управлінням і автономними рішеннями на рівні агентів. У підсумку, класифікована невизначеність трансформується з деструктивного чинника в керований простір прийняття рішень.

У контексті управління будівельними проєктами поняття "невизначеність проєктного середовища" означає наявність факторів, які унеможливають точне передбачення результатів, часових меж, вартості, ресурсного навантаження або реакцій виконавців у межах проєкту. Це складне системне явище, що поєднує як об'єктивні параметри (технічна складність, зовнішні ризики, нормативні обмеження), так і суб'єктивні (рівень поінформованості, когнітивні викривлення менеджерів, міжособистісна динаміка в командах). У будівельному середовищі невизначеність має посилену дію внаслідок великої кількості субпідрядників, постійної зміни умов, багаторівневих затверджень та впливу непередбачуваних фізичних факторів (погодні умови, ґрунтові коливання, технічні ускладнення на ділянках) [26].

Початкове трактування невизначеності в проєктному менеджменті було переважно пов'язане з ризиками і носило технократичний характер. Зокрема, американський дослідник Девід Хілсон у 1990-х роках увів диференціацію між ризиком (як вимірюваною ймовірністю) і невизначеністю (як неможливістю точної оцінки). Він підкреслював, що в умовах високої невизначеності необхідні не лише інструменти аналізу ризиків, а й гнучкі управлінські підходи, які враховують слабку передбачуваність середовища. Подальший

розвиток концепції пов'язаний із роботами Кетлін М. Ейзенгардт (Kathleen Eisenhardt), яка у 1999 році запропонувала розглядати невизначеність як структурну характеристику проєкту, що потребує спеціалізованих механізмів адаптації: наприклад, частішої комунікації, децентралізації рішень і експериментального тестування гіпотез [13].

На сучасному етапі невизначеність у проєктному середовищі розглядається не лише як виклик, а й як можливість для гнучкого управління. Дослідники, як-от Торгер Рів та Шазія Султан пропонують мультиміріні моделі, в яких невизначеність класифікується за рівнем джерела (внутрішня, зовнішня), природою впливу (системна або випадкова) та часовою динамікою (стабільна чи ескалаційна) [22, 44]. Вони доводять, що у складних інфраструктурних проєктах, таких як будівництво, спроба уникнути невизначеності шляхом жорсткої регламентації дає гірші результати, ніж стратегія адаптивного управління, де ключовими є вчасна реакція, поведінкова гнучкість та здатність мультиагентної системи до самоорганізації.

Щоб узагальнити еволюцію підходів до розуміння невизначеності проєктного середовища в будівництві, нижче подано таблицю 1.8, яка відображає авторські позиції, фокус трактування та практичні наслідки для моделювання трудових процесів.

*Таблиця 1.8*

**Трактування невизначеності проєктного середовища у дослідженнях різних авторів**

<b>Автор</b>	<b>Рік</b>	<b>Основний фокус трактування</b>	<b>Наслідки для управління трудовими ресурсами</b>
<b>Девід Хілсон [14]</b>	1997	Розмежування ризику і невизначеності	Необхідність інтуїтивного та резервного планування
<b>Кетлін Ейзенгардт [28]</b>	1999	Невизначеність як організаційна характеристика	Гнучкість у делегуванні, розширення зворотного зв'язку
<b>Торгер Рів</b>	2007	Невизначеність як функція зовнішньої складності	Адаптивне планування на основі сценаріїв і тенденцій
<b>Шазія Султан</b>	2019	Динамічна багатофакторна класифікація невизначеностей	Контекстно-чутливе формування команд і режимів роботи

*(Джерело: розроблено автором на основі [14, 22, 28, 44])*

Сучасне розуміння невизначеності проєктного середовища у будівництві все більше тяжіє до інтеграції поведінкових, стратегічних та цифрових компонентів. Мультиагентні моделі, які беруть до уваги зміну типу невизначеності протягом життєвого циклу проєкту, формують новий клас управлінських рішень, що базуються не лише на інструкціях, а й на симуляціях, еволюції внутрішніх станів агентів та можливості адаптації до подій, які ще не відбулися. Це дозволяє розширити рамки класичного проєктного менеджменту до динамічного управління в умовах постійної трансформації.

Подальший розвиток і практичне застосування концепції невизначеності проєктного середовища потребують переосмислення традиційної ролі проєктного менеджера та формальних структур планування. У класичних підходах передбачалось, що ключовим викликом є виключно брак інформації або зміна зовнішніх умов. Натомість сучасна парадигма, особливо у сфері будівництва, визнає, що значна частина невизначеності є системною, тобто невід'ємною від самої природи проєктного процесу — багатоетапного, колективного, територіально розподіленого, регульованого десятками акторів із власними інтересами. Саме тому зростає актуальність підходів, у яких невизначеність розглядається як константа, а не тимчасове виключення, що потребує окремих заходів.

Моделювання такої постійної невизначеності можливе саме через мультиагентну архітектуру, яка допускає виникнення непередбачених подій у рамках симуляції й формування на них адаптивної відповіді в режимі реального часу. Наприклад, зміна політики постачання або затримка у погодженні технічної документації може моделюватись не як "збій", а як вхідна змінна, що активізує інші ланки системи. Агентська стратегія розподілу ресурсів у цьому випадку змінюється з "оптимізаційної" на "буферно-рефлексивну" — тобто таку, що передбачає локальне резервування часу, людського ресурсу або гнучких компетенцій для покриття несподіваних провалів [55].

Крім того, зростає значення поведінкових і емоційно-когнітивних параметрів у відповідь на невизначеність. Наприклад, ситуації високої

нормативної невизначеності часто спричиняють не технічні, а психологічні реакції в командах — зниження впевненості, мотиваційне вигорання, зростання напруги. Мультиагентна система, яка вміє ідентифікувати такі стани, отримує перевагу в стабілізації проєкту: вона може запропонувати перерозподіл ролей, зміну черговості виконання завдань або навіть емоційно нейтральні інтерфейси взаємодії, що знижують когнітивне навантаження.

У межах складних ІТ-проєктів, де високий рівень інтегрованості технічних компонентів поєднується з мультиакторністю та непередбачуваністю ринкових вимог, невизначеність стає ключовим модулюючим чинником поведінки як менеджерів, так і виконавців. Особливо це актуально в мультиагентному середовищі, де кожен агент діє автономно, але взаємопов'язано з іншими, перебуваючи у постійній взаємодії з середовищем і змінними проєктного ландшафту. На відміну від лінійних моделей, мультиагентні структури дозволяють враховувати те, як тип і характер невизначеності змінює поведінкову стратегію кожного агента, включаючи його мотиваційні реакції, інтерпретацію цілей, готовність до співпраці або ізоляції, а також тактичні рішення щодо розподілу ресурсів [41].

У мультиагентних системах поведінка агента завжди є функцією середовища, але тип невизначеності суттєво впливає на патерн цієї функції. Наприклад, технічна невизначеність — пов'язана з новизною технологій, невідомими помилками або нестабільністю архітектури — змушує агента діяти обережно: ухвалення рішень відкладається, активується запит на додаткову інформацію, формується пріоритет на міжагентні консультації з більш досвідченими "експертними" агентами. У свою чергу, організаційна невизначеність (розмиті ролі, конфліктна ієрархія, відсутність прозорості) провокує в агентів зниження ініціативності, часте перемикання на "режим виживання" — вони починають дотримуватися формальних процедур, уникаючи будь-яких відхилень. Це радикально змінює траєкторії комунікацій, впроваджує затримки у зворотному зв'язку, пригнічує міжфункціональну координацію.

Натомість ринкова невизначеність впливає передусім на рівень стратегічної орієнтації агентів. Якщо очікується зміна запиту замовника, вимог

функціональності або бізнес-умов, агенти демонструють схильність до гнучких, сценарно-чутливих стратегій. Вони обирають структурування задач у вигляді модулів, зменшення прив'язки до цільового функціоналу, підготовку альтернативних версій та нарощування резервів часу або трудозатрат. Зовсім інший тип реагування виявляється у відповідь на поведінкову невизначеність, що пов'язана з непередбачуваними діями інших агентів — зміною мотивації, раптовими відмовами, конфліктами [43]. Тут активізуються соціальні реакції — ізоляція або, навпаки, прагнення до коаліцій, підвищення рівня запиту до інформаційної прозорості, інколи — виникнення неформальних структур (підгруп, неофіційних лідерів) для забезпечення внутрішньої стабільності. Для наочного представлення впливу типів невизначеності на поведінкові стратегії в агентному середовищі ІТ-проекту, нижче подано рисунок 1.9, що демонструє взаємозв'язок між джерелами невизначеності, агентною реакцією та ефектами на рівні моделі.



Рисунок 1.9. Взаємозалежність типів невизначеності та змін поведінкових стратегій у мультиагентному середовищі ІТ-проекту

(розроблено автором на основі [43])

У мультиагентному моделюванні передбачається, що кожен агент має набір потенційних стратегій, однак лише деякі з них активізуються залежно від наявного контексту. Саме тип невизначеності виконує функцію **тригера**, що визначає, яку з поведінкових ліній агент обере. При технічній невизначеності перевага надається стратегіям затримки ухвалення рішення, використанню "обхідних шляхів", зверненням до експертів або машинного навчання. Організаційна невизначеність формує поведінку уникання, мінімізації ризиків через формалізацію дій. Ринкова — стимулює проксі-планування,

багатоваріантність і створення умовної автономії функціональних блоків. Поведінкова — потребує додаткового обліку емоційних, соціальних і мотиваційних реакцій, які часто не піддаються формальному контролю, але критично важливі для стабільності агентної мережі.

Щоб систематизувати ці впливи та окреслити можливості їх моделювання в мультиагентних системах, нижче подано таблицю 1.9, яка пов'язує тип невизначеності з характерною агентною реакцією та потенційними ефектами на рівні ІТ-проєкту.

*Таблиця 1.9*

**Типи невизначеності та відповідні поведінкові стратегії агентів у ІТ-проєкті**

<b>Тип невизначеності</b>	<b>Аспекти невизначеності</b>	<b>Типова поведінкова стратегія агента</b>	<b>Потенційний ефект у моделі</b>
<b>Технічна</b>	Нові технології, нестабільність, відсутність досвіду	Затримка рішень, звернення до експертів	Зниження швидкості, підвищення точності рішень
<b>Організаційна</b>	Розмиті ролі, відсутність лідерства, подвійна ієрархія	Дотримання формальних процедур, уникання ініціативи	Затримка в комунікації, зменшення гнучкості системи
<b>Ринкова</b>	Зміна попиту, непередбачуваність вимог	Стратегічна гнучкість, сценарне планування	Підвищення адаптивності, зростання вартості резервування
<b>Поведінкова</b>	Конфлікти, коливання мотивації, людський фактор	Соціальна згуртованість або фрагментація	Зміна інтенсивності комунікації, виникнення неформальних структур

*(Джерело: розроблено автором на основі [43])*

Різні типи невизначеності детермінують не лише зміст рішень агентів, а й методологію взаємодії між ними. Це вимагає від мультиагентної системи не фіксованих правил, а адаптивного сценарного ядра, здатного перебудувати

структуру взаємозв'язків, пріоритети дій та навіть психологічні параметри агентів. Успішне управління такими моделями залежить не лише від точності вхідних даних, а й від здатності до когнітивної симуляції — розуміння того, як агент "відчуває", "інтерпретує" та "передбачає" дію інших, ґрунтуючись на обмеженому наборі сигналів. У цьому полягає унікальність агентно-поведінкового підходу, що забезпечує гнучкість, резильєнтність і передбачуваність в умовах багатовимірної невизначеності [63].

Поведінкові реакції агентів на невизначеність не є статичними чи незмінними. Навпаки, з розвитком проєкту вони можуть трансформуватись унаслідок нагромадження досвіду, міжагентного навчання та зміни ролей у межах мультиагентної структури. Наприклад, агент, який на ранніх етапах демонстрував пасивну стратегію уникання у відповідь на організаційну невизначеність, після кількох ітерацій може перейти до більш активної стратегії структурного впливу — ініціювання нових комунікаційних форматів, створення мікрогруп або інтерфейсного буферування між конфліктуючими структурами. Цей динамізм обов'язково має враховуватись у мультиагентному симуляційному середовищі, що претендує на реалістичність.

Крім того, різні типи невизначеності здатні взаємодіяти між собою, створюючи так звані композиційні сценарії, у яких одна форма невизначеності каталізує іншу. Так, технічна невизначеність може призвести до зміни розподілу задач, що, у свою чергу, створює організаційну нестабільність, яка активує поведінкові дисфункції — від зниження довіри до виникнення неформальних ієрархій. У подібних випадках мультиагентна система має реагувати комплексно: перебудовувати комунікаційні контури, змінювати принцип делегування, активізувати механізми соціального балансу. Це вимагає впровадження моделей інтертипової взаємозалежності, де кожен агент оцінює не лише власну поведінку, а й потенційні ризики ескалації невизначеності через зв'язки з іншими [34].

У межах мультиагентного моделювання ІТ-проєктів питання формування інституціональних ролей та логіки делегування є не лише функціональним, а й концептуальним, оскільки саме ці параметри визначають гнучкість, стійкість і реактивність системи в умовах змінного середовища.

Інституціональна роль агента — це не просто його формальна позиція (розробник, аналітик, координатор), а структурована функція взаємодії, яка включає рівень автономії, право ухвалювати рішення, зону відповідальності, а також очікувану поведінку у випадках конфліктів або нестабільності. Саме класифікація типів невизначеності, з якими може стикатися ІТ-команда, стає фундаментальним чинником у моделюванні того, яким чином делегуються повноваження й трансформуються ролі в агентній архітектурі.

Типи невизначеності (технічна, організаційна, ринкова, поведінкова), описані раніше, по-різному впливають на ієрархію взаємодії та правила делегування. У ситуації технічної невизначеності, наприклад, підвищується цінність експертного ядра — агентів з найвищим рівнем компетенції, незалежно від їхньої формальної позиції. Делегування в такому випадку відбувається не за ієрархією, а за принципом функціонального авторитету, коли рішення приймає той, хто має більше знань, а не той, хто вище в структурі. Це призводить до тимчасової зміни ролей — координатор може перетворюватися на фасилітатора, розробник — на експерта-радника. Така гнучкість можлива лише в системах, де ролі не жорстко закріплені, а мають властивість оновлення залежно від конфігурації середовища [51].

Організаційна невизначеність, натомість, потребує створення ролей, здатних до інтерфейсного управління — агенти, що виконують функцію мостів між непогодженими структурами, вирівнюють конфлікти, забезпечують комунікаційні переходи. У таких умовах делегування будується за принципом репутаційної довіри — повноваження передаються не обов'язково формальною вертикаллю, а тим, хто має вищу соціальну легітимність серед учасників. Це формує нову категорію агентів — "інституційних медіаторів", які часто не мають доступу до технічного ядра, але виступають ключовими стабілізаторами в разі організаційної турбулентності. Для візуалізації цих процесів нижче подано рисунок 1.10, який демонструє, як кожен тип невизначеності трансформує модель формування ролей та алгоритм делегування функцій у мультиагентній ІТ-структурі.

Ринкова невизначеність стимулює формування таких ролей, які мають високу гнучкість і сценарне мислення. Агент у таких умовах повинен не лише

виконувати задачі, а й бути здатним формувати альтернативні продуктові стратегії, адаптувати вимоги, взаємодіяти з зовнішніми стейкхолдерами. Це створює потребу у введенні агентів зі стратегічним баченням, які беруть участь у гнучкому переплануванні. Делегування в такій системі відбувається через механізми мобільної відповідальності — тимчасове делегування за проєктним напрямком, а не за посадовою функцією, з можливістю зворотного відкликання.



Рисунок 1.10. Вплив типів невизначеності на формування ролей та механізми делегування в мультиагентних ІТ-командах (Джерело: розроблено автором на основі [51])

Найбільш непередбачуваною є поведінкова невизначеність, яка прямо впливає на емоційний фон взаємодії та довіру між агентами. У таких випадках критичне значення мають ролі з високим емоційним інтелектом — фасилітатори командної динаміки, гнучкі лідери, які не стільки керують, скільки моделюють стабільність. Делегування тут здійснюється на основі афективної синергії — тобто, можливості агента нейтралізувати напругу, залучати інших до діалогу, стабілізувати психологічну атмосферу. Це неформалізовані ролі, але саме вони часто визначають довготривалу стійкість команди [3].

Для систематизації описаних процесів нижче наведено таблицю 1.10, яка пов'язує типи невизначеності з новими інституційними ролями в агентному середовищі та відповідною логікою делегування.

Таблиця 1.10

**Вплив класифікації невизначеностей на ролі та делегування в  
мультиагентних ІТ-командах**

<b>Тип невизначеності</b>	<b>Формовані інституціональні ролі</b>	<b>Логіка делегування функцій</b>	<b>Особливості поведінки системи</b>
<b>Технічна</b>	Експерти знань, технічні лідери	Функціональний авторитет, динамічна переадресація рішень	Тимчасова ієрархія, високий запит на точність і перевірку
<b>Організаційна</b>	Медіатори, комунікаційні фасилітатори	Репутаційне делегування, соціальна легітимність	Усунення конфліктів, адаптація через посередництво
<b>Ринкова</b>	Стратегічні агенти, адаптаційні планувальники	Мобільна відповідальність, варіативне делегування	Гнучке перепланування, сценарне балансування
<b>Поведінкова</b>	Лідери з емоційною компетентністю	Афективне делегування, підтримка через довіру	Стабілізація емоційної динаміки, запобігання фрагментації

*(Джерело: розроблено автором на основі [3])*

Класифікація невизначеності стає не лише основою для прогнозування ризиків, а й архітектурним принципом побудови мультиагентних систем, у яких структура ролей не є заданою наперед, а формується адаптивно відповідно до природи викликів. Це дозволяє створювати не просто цифрові симулятори командної роботи, а гнучкі інституційні системи, здатні змінювати свою внутрішню логіку — розподілу, управління, відповідальності — залежно від еволюції зовнішнього середовища. У цьому полягає потенціал сучасного мультиагентного підходу до управління ІТ-командами в динамічних проєктних екосистемах.

Важливо підкреслити, що динамічна трансформація інституціональних ролей в агентному середовищі ІТ-команди є не винятком, а системною нормою у контексті високої невизначеності. В реальній проєктній практиці часто трапляються ситуації, коли формальні ролі — наприклад, архітектор або проєктний менеджер — стають неефективними або втрачають вплив саме через невідповідність типу їхньої ролі до домінуючого виду невизначеності. У таких умовах саме рольова пластичність забезпечує стійкість проєкту: здатність агентів брати на себе тимчасову відповідальність, виконувати функції, які не були закладені в початковому описі, і водночас не втрачати ідентичності в межах команди [10].

Окремо варто звернути увагу на вторинну еволюцію делегування, яка спостерігається в мультиагентних системах із навчальним контуром. Коли агенти накопичують дані про ефективність різних моделей делегування (наприклад, кому передавати рішення у випадку технічної затримки або міжособистісного конфлікту), вони поступово формують локальні патерни довіри та моделі самоорганізації. Це означає, що делегування перестає бути просто функцією ролі — воно перетворюється на контекстно-залежну реакцію, яка зчитується з попередніх сценаріїв і адаптується до нових умов. У таких системах навіть нові або слабо зв'язані агенти отримують можливість бути включеними в критичні процеси через динамічну валідацію власної поведінки.

У випадках комбінованої невизначеності, де технічні, ринкові й поведінкові фактори накладаються одночасно, виникає гібридизація ролей. Наприклад, один і той самий агент може виконувати роль тимчасового координатора (через відсутність чіткого управлінського каналу), фасилітатора взаємодії (через психологічну напругу в команді) і водночас бути носієм критичних знань. У мультиагентному моделюванні подібна складність вимагає багат шарової архітектури ролей, де агенти мають не одну фіксовану ідентичність, а певний пул компетенцій і сценаріїв активізації, з яких система обирає відповідно до поточного профілю невизначеності.

Таким чином, класифікація невизначеностей слугує не лише аналітичним інструментом, а й архітектурним механізмом формування ролевих структур і каналів делегування. У мультиагентному середовищі ІТ-

команди це дає змогу забезпечити як організаційну гнучкість, так і психологічну стабільність, оскільки кожен агент, взаємодіючи з контекстом, обирає поведінкову стратегію, яка найбільше відповідає типу загрози. Така модель виводить управління проєктами за межі класичних функціональних структур і наближає його до адаптивної, самонавчальної, поведінково чутливої організації майбутнього.

### **Висновки до 1-го розділу**

1. Обґрунтовано необхідність розроблення науково-методичного підходу до формування та практичної перевірки ефективності моделей і методів мультиагентного розподілу трудових ресурсів у будівельних девелоперських проєктах. Такий підхід є актуальним за умов підвищеної невизначеності зовнішнього середовища, варіативності виробничих ситуацій та змін параметрів проєктної діяльності. Запропонований інструментарій покликаний забезпечити раціональний розподіл функцій і завдань між виконавцями, підвищити керованість трудових процесів та сприяти досягненню цільових показників розвитку девелоперських проєктів.

2. Доведено доцільність формування інтелектуалізованої системи управління трудовими ресурсами, здатної до адаптивного функціонування в умовах постійних організаційно-технологічних змін. Така система має властивості самонавчання, накопичення досвіду взаємодії агентів та коригування управлінських рішень з урахуванням нових факторів впливу. Реалізація мультиагентного підходу забезпечує узгодженість дій учасників, зменшує ризики дезкоординації та підвищує ефективність використання кадрового потенціалу будівельних підприємств. Досягнення поставленої мети пов'язане зі створенням методичного інструментарію, який забезпечує цифрову узгодженість організаційно-трудова процесів у будівельному девелопменті. Розроблені підходи спрямовані на підвищення гнучкості систем управління, зростання результативності проєктної діяльності та забезпечення стійкості функціонування підприємств у мінливому середовищі. Запропоновані рішення базуються на принципах інноваційності та сталого розвитку, що формує підґрунтя для ефективної реалізації девелоперських проєктів нового покоління.

3. У першому розділі здійснено концептуально-теоретичне обґрунтування формування моделей і методів мультиагентного розподілу трудових ресурсів у будівельних девелоперських проєктах в умовах невизначеності. На основі системного аналізу показано еволюцію підходів до управління персоналом під впливом цифрової трансформації та розвитку ІТ-середовища. Обґрунтовано інтеграцію інноваційних і цифрових технологій у HR-менеджмент як чинник підвищення продуктивності, адаптивності та стійкості проєктних команд. Розвинено теоретичні засади концепції «цифрового працівника девелоперського проєкту», який виступає активним елементом мультиагентної взаємодії та забезпечує узгодженість процесів планування, координації й прийняття рішень у BIM- та ERP-середовищах.

4. Систематизовано типи невизначеності, характерні для будівельних девелоперських проєктів, і визначено їхній вплив на поведінкові стратегії агентів та організаційні моделі розподілу трудових ресурсів. Доведено доцільність переходу від жорстко ієрархічних структур управління до гнучких мережеских моделей, орієнтованих на цифрову взаємодію, самоорганізацію та адаптивність. Сформульовано принципи цифрового лідерства, інноваційної спроможності та стійкості мультиагентних систем управління трудовими ресурсами, що створює теоретичне підґрунтя для подальшої розробки практичного інструментарію в наступних розділах дисертації.

5. Невизначеність проєктного середовища в будівництві має комплексний характер і поєднує технічні, організаційні, ринкові та поведінкові чинники. Показано доцільність застосування мультиагентних моделей, які враховують зміну типів невизначеності протягом життєвого циклу проєкту та забезпечують адаптивну зміну стратегій агентів. Доведено, що такі моделі розширюють можливості класичного управління проєктами до динамічного управління, орієнтованого на симуляції, прогнозування та реагування в режимі реального часу, формуючи новий підхід до організації взаємодії учасників будівельних девелоперських проєктів.

6. Різні типи невизначеності детермінують поведінкові стратегії агентів і трансформують організаційні моделі розподілу ресурсів та делегування повноважень. Показано взаємозв'язок між технічною, організаційною, ринковою та поведінковою невизначеністю і зміною ролей, комунікаційних структур та інтенсивності міжагентної взаємодії. Обґрунтовано необхідність адаптивної, мережевої архітектури управління, здатної до самоорганізації, міжагентного навчання та оновлення поведінкових стратегій. Підкреслено, що мультиагентні системи забезпечують резильєнтність і гнучкість проєктних команд у багатовимірному невизначеному середовищі будівельного девелопменту.

7. Інноваційна спроможність підприємства визначена в роботі базовим детермінантом формування потенціалу управлінських змін. Вона інтегрує технологічні, фінансові, кадрові, організаційні та культурні ресурси, забезпечуючи сприйняття новацій і готовність до їх практичної реалізації. Обґрунтовано взаємозв'язок інноваційної спроможності з адаптивністю організаційної культури та людського капіталу, що визначають швидкість і глибину управлінських трансформацій. Підкреслено, що саме синергія цих елементів формує реальну здатність підприємства до стійкої зміни бізнес-процесів і управлінських практик.

8. Опрацьовано науково-методичні підходи кількісної оцінки інноваційної спроможності підприємства як латентної багатофакторної категорії. Запропоновано використання інтегральних індексів, багаторівневих діагностичних моделей і системи вагових коефіцієнтів для комплексного врахування технологічних, організаційних, ринкових і кадрових параметрів. Показано, що повнота охоплення факторів запобігає викривленню результатів оцінювання і забезпечує об'єктивність висновків щодо готовності підприємства до управлінських змін. Доведено, що результати діагностики мають слугувати основою для вибору траєкторій трансформаційного розвитку.

9. Обґрунтовано концепцію динамічних здібностей підприємства як механізму реалізації управлінських змін. Показано, що здатність відчувати зміни середовища, інтегрувати нові знання, навчатися та реконфігурувати бізнес-моделі визначає ефективність адаптаційних процесів. Нелінійний характер впливу інноваційної спроможності на управлінські трансформації описано через моделі адаптаційного потенціалу та логіку синергійного прискорення змін. Зроблено висновок, що підприємства з розвиненими динамічними здібностями швидше досягають нових станів стійкої рівноваги без організаційних дисфункцій

Основні наукові результати по даному розділу опубліковані у працях [109, 110, 112, 113, 119].

## РОЗДІЛ 2. АДАПТИВНІ МЕХАНІЗМИ РОЗПОДІЛУ ТРУДОВИХ РЕСУРСІВ У МУЛЬТИАГЕНТНИХ СИСТЕМАХ УПРАВЛІННЯ ІТ-ПРОЄКТАМИ

### 2.1. Принципи конфігурації агентних взаємодій у складному трудовому середовищі ІТ-проєктів

У сучасних дослідженнях у сфері управління складними організаційними структурами, особливо в ІТ-секторі, дедалі більшої популярності набуває застосування агентного підходу, який дозволяє моделювати взаємодії між окремими елементами системи — агентами — як автономними, цілеспрямованими одиницями з можливістю ухвалення рішень. Теоретичні основи агентного моделювання беруть початок у міждисциплінарному поєднанні комп'ютерних наук, соціології, теорії ігор та кібернетики. Серед перших концептуальних робіт слід виділити дослідження М. Wooldridge і N. Jennings, які описали агентів як програмні структури, що здатні до автономії, соціальної взаємодії, реактивності та проактивності. У подальшому ці принципи почали адаптуватися до організаційних систем, зокрема в межах проєктного управління та цифрових середовищ.

У контексті ІТ-проєктів, де важливими характеристиками є швидкість змін, високий рівень спеціалізації працівників, розподіленість команд і часте перепланування завдань, агентна модель стає надзвичайно релевантною. Тут агентами виступають як окремі спеціалісти (розробники, аналітики, тестувальники), так і цілі мікрокоманди, що взаємодіють у рамках загальної мети, дотримуючись при цьому локальних правил, протоколів взаємодії та персональних цільових функцій. Саме така структурна модель дозволяє не лише ефективно координувати дії в умовах неповної інформації та високої динаміки, а й прогнозувати результати взаємодій на основі симулятивних або аналітичних моделей.

Формалізація таких моделей передбачає використання математичних і обчислювальних методів для опису поведінки окремого агента  $a_i$  і всієї мультиагентної системи  $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ . Зокрема, поведінку агента часто

описують за допомогою функцій переходів стану, функцій корисності та стратегічних профілів. Одна з базових формул, що описує оптимізаційне завдання агента у взаємодії з іншими, виглядає так:

$$U(a_i) = \sum_{t=0}^T \gamma^t R(s_t, a_t) - C(a_t), \quad (2.1)$$

де  $U(a_i)$  — очікувана вигода агента  $a_i$ ,  $\gamma$  — коефіцієнт дисконтування,  $R(s_t, a_t)$  — функція винагороди залежно від стану та дії,  $C(a_t)$  — витрати агента на дію.

У контексті ІТ-проектів функція винагороди часто моделюється не лише через фінансові параметри, а й через показники завершення задач, досягнення цілей, рівень задоволеності користувача та ефективність взаємодії. Ідея полягає в тому, що агент виконує завдання, враховуючи як особисту вигоду (наприклад, зниження навантаження або підвищення професійної репутації), так і загальну мету проекту. Це дає змогу формалізувати конфлікт між локальними та глобальними цілями в системі [88].

Інший важливий аспект — адаптація концепції агентів до трудового середовища ІТ-галузі — передбачає розширення класичних визначень автономії та реактивності до таких характеристик, як соціальний інтелект, гнучкість ролей, еволюція компетенцій і здатність до навчання. У цьому контексті агенти не лише діють відповідно до початково заданих алгоритмів, а й змінюють свою поведінку залежно від досвіду, нових даних і змін зовнішнього середовища. Для опису такого процесу доцільним є використання моделі навчання на основі зворотного зв'язку, яка може бути формалізована через оновлення політики дій:

$$\pi_{t+1}(a_i | s_t) = \pi_t(a_i | s_t) + \alpha \cdot [R_t + \gamma \cdot V(s_{t+1}) - V(s_t)], \quad (2.2)$$

де  $\pi_t$  — політика дій агента на момент часу  $t$ ,  $\alpha$  — швидкість навчання,  $R_t$  — винагорода на момент часу  $t$ ,  $V(s_t)$  — оцінка цінності стану.

Інтерпретація цієї формули в межах ІТ-проектів полягає в тому, що член команди змінює свою поведінку залежно від отриманого досвіду — наприклад, повторне обрання зручного способу вирішення завдання або коригування своїх дій унаслідок конфлікту інтересів із іншим агентом. Таким чином, ідея динамічного оновлення поведінки на основі досвіду є ключовою у концепції адаптивної агентності в трудовому середовищі.

Варто також зазначити, що агентні моделі в ІТ середовищі мають справу не лише з людьми, а й із цифровими агентами: ботами, модулями автоматизації, AI-асистентами. Це створює новий клас гетерогенних агентних систем, де взаємодіють біологічні та штучні суб'єкти. Синергія таких систем базується на чіткому визначенні протоколів комунікації, формалізованих API та онтологіях, що дозволяє поєднувати людське інтуїтивне мислення з алгоритмічною ефективністю цифрових елементів. Наприклад, взаємодія інженера DevOps з CI/CD системою є прикладом агентної взаємодії між людиною та цифровим агентом, де кожна сторона виконує свою роль у спільному процесі без постійного ручного втручання [90].

Ще одна формула, що актуалізує динаміку багатofакторної взаємодії агентів у середовищі ІТ-команди, пов'язана з оцінкою узгодженості цілей та оптимізацією ресурсного балансу в системі. Вона може бути подана як багатокритеріальна функція задоволення колективу:

$$F(A) = \lambda_1 \cdot \sum_{i=0}^n f_i(a_i) + \lambda_2 \cdot \sum_{(i,j) \in E} w_{ij} \cdot g(a_i, a_j) + \lambda_3 \cdot h(R), \quad (2.3)$$

де  $f_i(a_i)$  — локальна ефективність агента,  $g(a_i, a_j)$  — синергія або конфлікт між агентами  $a_i$  та  $a_j$ ,  $w_{ij}$  — вага взаємодії,  $h(R)$  — ефективність розподілу ресурсів  $R$ ,  $\lambda_k$  — вагові коефіцієнти впливу.

Ця модель дозволяє зважено оцінити, наскільки ефективно конфігурація агентної структури забезпечує досягнення мети проєкту. Вона застосовується у симуляційних системах планування проєктів, автоматизованих конфігураторах команд та системах рекомендацій в управлінні ІТ-ресурсами.

У контексті складного трудового середовища ІТ-проєктів агентні взаємодії не є хаотичними або виключно імпровізаційними — вони мають чітку структуру, засновану на параметризації ролей, функцій та обмежень. На відміну від класичних організаційних ієрархій, агентні підходи дозволяють вільніше конфігурувати взаємодію учасників, моделюючи її як множину індивідуальних автономних суб'єктів, які функціонують у динамічному інформаційному полі. Визначальними є характеристики кожного агента, що розглядаються в трьох площинах: соціальна поведінка (командна взаємодія, здатність до кооперації), технічні компетенції (технології, інструменти, середовища), організаційна вбудованість (роль у структурі, підпорядкованість,

відповідальність). У сучасних ІТ-проєктах агенти можуть набирати форму як індивідуальних виконавців (розробник, тестувальник, DevOps-інженер), так і агрегованих структур — мікрокоманд, модульних підрозділів, віртуальних ролей. Взаємодія між ними відбувається не лише на рівні командних зустрічей або звітності, а в рамках формалізованих, але гнучких протоколів: вони описують, коли і як передається інформація, як приймаються рішення, хто ініціює зміни, як реагують агенти на порушення цілісності процесу. В цьому середовищі важливими стають такі характеристики, як часові інтервали синхронізації, прозорість метрик продуктивності, пріоритетність потоків завдань.

Саме через ці параметри в ІТ-проєктах широко використовуються гнучкі методології управління (Scrum, Kanban, SAFe), які дозволяють адаптивно конфігурувати агентів у середовищі постійної змінності. Scrum, наприклад, орієнтований на короткі спринти, де кожен агент має чітко визначену роль (Scrum Master, Product Owner, Development Team), а обмін інформацією відбувається через Daily Standups. Kanban забезпечує візуалізацію потоків і виявлення вузьких місць у системі, зберігаючи при цьому децентралізовану структуру ухвалення рішень. SAFe інтегрує різнорівневі агентні структури — від окремих команд до цілого Value Stream, поєднуючи гнучкість із масштабністю, що особливо важливо в середовищі великих проєктів і мультикомандних структур [42].

Щоб краще уявити, як відбувається конфігурація агентів у такому середовищі, доцільно представити рисунок 2.1, що ілюструє послідовність визначення параметрів агентів, їх інтеграцію в організаційну структуру, і координацію взаємодії через відповідну методологію управління:



Рисунок 2.1. Конфігурація агентних взаємодій в ІТ-середовищі (Джерело: розроблено автором на основі [42])

Як ми бачимо, процес конфігурації агентної структури є циклічним і включає не лише початкове визначення ролей, а й постійне оновлення взаємодії на основі фідбеку та аналітики. Це забезпечує адаптацію системи до зміни ресурсів, термінів, вимог замовника та зовнішніх умов.

З математичної точки зору, взаємодія таких агентів може описуватися через матрицю комунікаційної інтенсивності  $M$ , де кожен елемент  $m_{ij}$  означає частоту або важливість взаємодії між агентами  $a_i$  та  $a_j$ :

$$M = \begin{bmatrix} 0 & m_{12} & \dots & m_{1n} \\ m_{21} & 0 & \dots & m_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ m_{n1} & m_{n2} & \dots & 0 \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

Ця матриця використовується для визначення найбільш критичних зв'язків у команді, виявлення ланцюгів передачі інформації та візуалізації мережі взаємозалежностей, що, у свою чергу, може застосовуватися для

планування перерозподілу ролей, зміни моделі управління або інтервенцій у випадку конфліктів.

Формування таких агентних структур особливо важливе в умовах віддаленої або гібридної роботи, де фізична присутність команди в одному просторі замінюється цифровими середовищами, а інтенсивність взаємодії часто залежить від ступеня автоматизації, використання платформ синхронізації (Slack, MS Teams), інструментів візуального управління завданнями (Miro, Trello), та систем моніторингу ефективності (Clockify, TimeDoctor).

ІТ-проекти, на відміну від класичних виробничих систем, характеризуються високим ступенем динаміки, коли цілі можуть змінюватися впродовж коротких проміжків часу, а способи їх досягнення — модифікуватися відповідно до ринкових, технічних або кадрових факторів. У таких умовах традиційні централізовані підходи до управління втрачають ефективність, поступаючись місцем децентралізованим і гнучким системам, основою яких є агентна взаємодія з елементами самоорганізації, адаптації та динамічного балансування ролей. Ключовим завданням стає побудова такої структури, яка не потребує постійного ручного коригування, а натомість володіє внутрішніми механізмами перебудови залежно від контексту і завдань [30].

Принцип адаптивності передбачає здатність агентної системи реагувати на зовнішні та внутрішні збурення без втрати функціональності або продуктивності. Це досягається через впровадження ітеративних циклів планування (наприклад, спринтів у Scrum), застосування метрик прогнозованості (velocity, burn-down rate), а також через делегування повноважень на рівень окремих мікрокоманд. В умовах ІТ-проектів адаптивність також виявляється в готовності до заміни технологічного стеку, переоцінки пріоритетів, інтеграції нових інструментів або навіть зміни архітектурних підходів. Наприклад, поява нового безпечнішого API або вимога з боку замовника змінити фреймворк може ініціювати миттєву реакцію всієї агентної структури: зрушення завдань у backlog, перегляд відповідальностей, адаптація тестових сценаріїв.

Самоорганізація — ще один фундаментальний механізм, який забезпечує функціонування системи без зовнішнього централізованого втручання. Теорія самоорганізованих систем передбачає, що у багатокомпонентному середовищі взаємодія елементів із простими локальними правилами може призводити до виникнення складної і скоординованої глобальної поведінки [71]. У трудовому середовищі ІТ-проєкту це означає, що команди, маючи чітке розуміння цілей, здатні самостійно розподіляти завдання, ініціювати комунікації, виявляти неефективності й усувати їх без директивного втручання. Наприклад, у гнучких командах розробники самі обирають задачі зі спринт-беклогу відповідно до своєї завантаженості та експертизи, погоджують залежності з іншими, ініціюють pull request без очікування вказівки згори.

Формально така система може бути змодельована через багаторівневу ітераційну модель організації з вбудованими зворотними зв'язками. Один з варіантів представлення цього — формалізація самоорганізації через оновлення матриці комунікацій:

$$M(t + 1) = \beta \cdot M(t) + (1 - \beta) \cdot \Delta M, \quad (2.5)$$

де  $M_{(t)}$  — матриця взаємодій на момент часу  $t$ ,  $\Delta M$  — зміни в комунікаційній структурі, ініційовані самими агентами,  $\beta \in [0, 1]$  — інерційний параметр.

Цей механізм описує, як з часом елементи системи перебудовують свої зв'язки на основі попередніх комунікацій, реакцій на задачі, ефективності рішень. Таким чином, самоорганізація — це не хаос, а динамічна стабільність, яка підтримується завдяки чутливості до зворотного зв'язку.

Балансування ролей — критичний елемент, який забезпечує рівномірний розподіл навантаження, уникнення вузьких місць і запобігання емоційному вигоранню. На практиці це означає, що в агентних структурах можливе динамічне зміщення ролей — наприклад, аналітик може виконувати обов'язки тестувальника в період зниження навантаження, а фронтенд-розробник — тимчасово виконувати функції DevOps. Такий підхід вимагає від системи наявності механізмів виявлення перевантажень і дефіциту компетенцій, які реалізуються через цифрові панелі моніторингу (Jira Velocity Charts, Trello

Load Index, GitHub Insights). Ці метрики дозволяють виявляти небаланси і стимулювати коригування ролей [40].

Математично таке балансування може бути подано через оптимізацію функціоналу з обмеженням:

$$\min \sum_{i=1}^n \left( \frac{L_i - L^-}{L^-} \right)^2 \text{ за умови: } C(a_i) \leq C_{\max}, \quad (2.6)$$

де  $L_i$  — навантаження на агента  $a_i$ ,  $L^-$  — середнє навантаження,  $C(a_i)$  — вартість переорієнтації ролі,  $C_{\max}$  — допустимий поріг витрат.

Це означає, що система прагне зменшити розкид у навантаженні між агентами за умови, що загальна вартість зміни ролей не перевищує допустиму. Такі підходи використовуються в автоматизованих системах планування задач, що базуються на методах лінійного програмування, еволюційних алгоритмах або навіть нейронних мережах.

В умовах високої мінливості задач та інтенсивного зовнішнього середовища в ІТ-проектах ці три принципи — адаптивність, самоорганізація та балансування — не існують окремо, а формують єдину систему, яка забезпечує оперативність реакції, стійкість до збоїв і ефективність у досягненні стратегічних цілей. У наступному фрагменті я розкрию, як цифрові середовища забезпечують технічну інфраструктуру для такої взаємодії. Якщо згодні — продовжую [95].

Продовжуючи розгортання другого питання, варто глибше зосередитися на механізмах формування агентної архітектури у складному трудовому середовищі ІТ-проектів, де ключову роль відіграє взаємозв'язок між характеристиками агентів, цифровим контекстом середовища та застосованою методологією. Складність цієї архітектури полягає в необхідності одночасно координувати різноманітні агенти (індивідуальні працівники, крос-функціональні команди, штучні модулі) з різними рівнями автономності, компетенції, мотивації та залежності від цифрових систем.

В основі ефективної конфігурації агентів лежить не тільки структурне позиціонування, а й визначення інформаційних траєкторій, які забезпечують синхронізацію і масштабовану адаптацію поведінки агентів. Ці траєкторії формуються внаслідок трьох типів зв'язків: інформаційно-регламентованих (формальні канали, типу Jira або Asana), поведінково-контекстуальних (спільні

норми, культура взаємодії), та цифрово-залежних (взаємодія з ботами, API, системами інструментального супроводу) [101]. Аби систематизувати усі ці аспекти у єдину модель, доцільно продемонструвати їх на рисунку 2.2 - багаторівневої конфігурації агентів у середовищі цифрового IT-проекту.

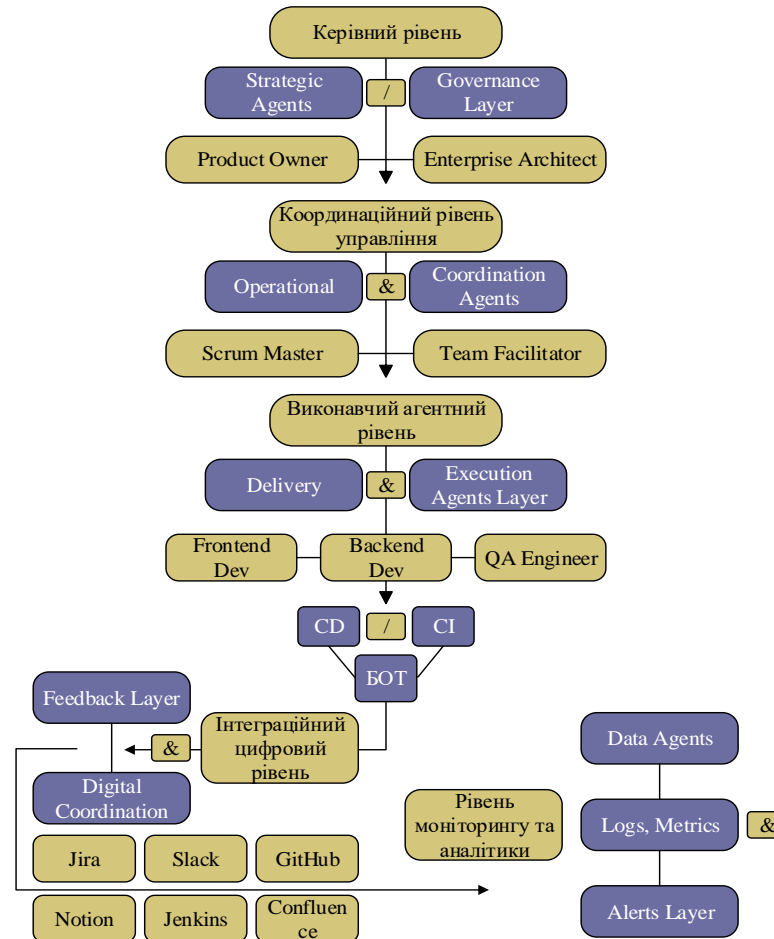


Рисунок 2.2. Багаторівнева модель конфігурації агентних структур у цифровому IT-середовищі (Джерело: розроблено автором на основі [101])

Даний рисунок демонструє, як формуються багаторівневі агентні системи, в яких агенти не є статичними елементами, а функціонують у тісній взаємодії з цифровими платформами. Кожен рівень виконує специфічну функцію: стратегічний – задає цілі та обмеження, координаційний – транслює мету в задачі, виконавчий – реалізує функціонал, цифровий – забезпечує інформаційні потоки та автоматизацію, аналітичний – генерує зворотний зв'язок для адаптації всієї системи. У такій структурі агентні одиниці одночасно є учасниками організаційної взаємодії та об'єктами цифрової модерації, що створює передумови для формування еволюційних структур, здатних до само оптимізації [76].

Така структура підтверджує актуальність застосування концепції розширеної агентності в ІТ-галузі — не лише як моделі кооперації між людьми, а й як системи симбіозу людини й цифрових агентів, які беруть участь у прийнятті рішень, реалізації задач і забезпеченні емерджентної цілісності всієї проєктної архітектури. Це — фундамент для переходу до наступного рівня аналізу: самоорганізації, ролевої адаптації та динамічного балансування агентних взаємодій, яке буде розкрито в третьому питанні [52].

## **2.2. Моделі реактивної адаптації агентів до контекстів невизначеності та зміни параметрів навколишнього середовища**

У сучасних складних динамічних середовищах, де управлінські рішення повинні прийматись швидко, гнучко та в умовах високої невизначеності, важливого значення набувають моделі реактивної адаптації агентів. На відміну від предиктивних моделей, що орієнтуються на прогностні сценарії, реактивні моделі забезпечують миттєву відповідь на зміни у навколишньому середовищі, зберігаючи стійкість системи без потреби в повному переплануванні. У будівництві, цифровому девелопменті, міському управлінні, логістиці та ІТ-інфраструктурах такі моделі стають основою для забезпечення гнучкості, локального самоуправління та адаптивності інфраструктурних агентів — від програмних процесів до фізичних виконавців.

Реактивна адаптація у моделюванні агентних систем полягає в тому, що агент спостерігає за змінами контексту (температура, навантаження, поведінка користувача, порушення в середовищі), здійснює базовий аналіз відхилення від норми та ініціює відповідь зі свого репертуару допустимих дій. Така відповідь не завжди є оптимальною з погляду загальної стратегії, але гарантує локальну стабілізацію ситуації, мінімізуючи втрати або відмови. Суть реактивної моделі полягає не в ускладненні процесу аналізу, а в мінімізації часу реакції й у здатності діяти за відсутності повної інформації. Замість складних дерев прийняття рішень агент має набір правил або механізмів рефлексивного обрання найкращого доступного сценарію [87].

У науковій літературі важливі підходи до реактивної адаптації розроблені такими дослідниками, як Патріція Маес (MIT), яка сформулювала основи поведінкових агентів на основі простих умовно-рефлекторних механізмів; Ніколас Дженнінгс (Imperial College London), який досліджував багатоагентні реактивні архітектури в інформаційно-динамічних середовищах; та Майкл Вулдрідж, автор класичних робіт із агентноорієнтованого програмування. Їхні роботи лягли в основу побудови моделей, де реакція виникає у відповідь на зміну параметрів контексту, за участі сенсорного механізму, адаптаційного блоку та актуатора, що забезпечує поведінкову відповідь. Така структура вже є стандартом у створенні автономних адаптивних агентів, зокрема в робототехніці, системах реагування на ризики, цифрових екосистемах будівельного контролінгу. Щоб краще зрозуміти внутрішню логіку функціонування агентів у реактивних моделях адаптації, доцільно звернутися до структурованого зображення етапів реагування на зміну параметрів середовища [70]. Така схема дозволяє візуалізувати послідовність ключових компонентів: від первинного сенсорного зчитування сигналу до запуску адаптивної дії та оновлення пам'яті агента. Умовно модель функціонує як цикл зворотного зв'язку, в якому кожен елемент системи є частиною цілісного реагування. Детальна структура наведена нижче на рисунку 2.3.

У прикладному вимірі, реактивна поведінка агентів набула особливого поширення в умовах високочастотних будівельних і девелоперських процесів, де система не може дозволити собі зволікання. Наприклад, у системах керування цифровими календарями будівництва (4D BIM) використання реактивних агентів дає змогу негайно реагувати на появу ризику: при затримці поставки система автоматично перепризначає завдання, змінює локальні пріоритети або перерозподіляє ресурси.

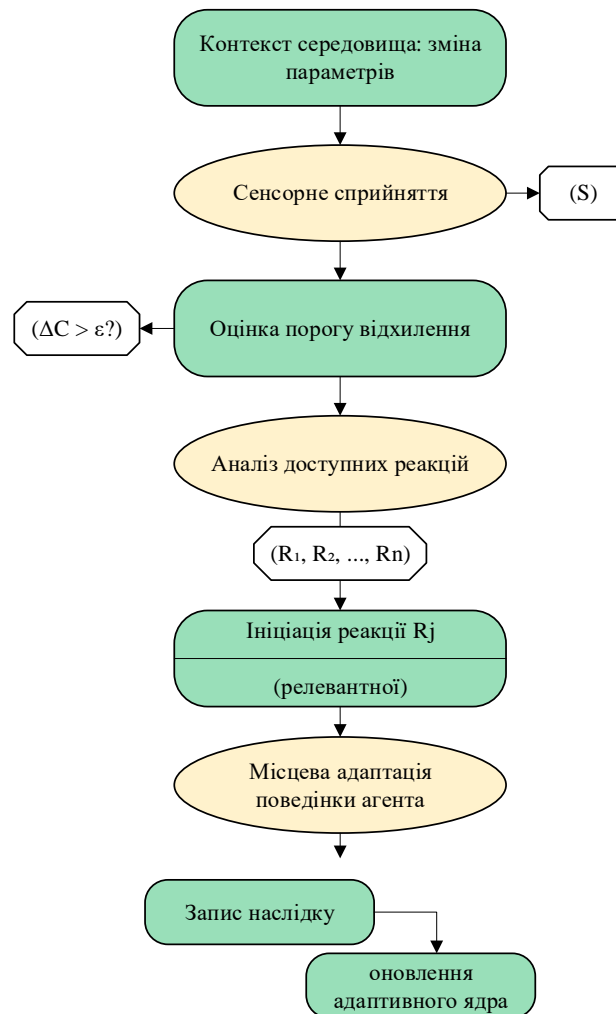


Рисунок 2.3. Реактивна адаптація агента в умовах невизначеності навколишнього середовища (Джерело: розроблено автором на основі [70])

У великих об'єктах з великою кількістю паралельних потоків (логістика, монтаж, геодезія, документообіг) це дозволяє уникнути ефекту доміно, коли одне відхилення паралізує всю систему. Кожен агент «розуміє» свій контекст і реагує лише у разі порушення цільової функції, що суттєво знижує навантаження на центральну систему управління.

Особливо перспективним напрямом є інтеграція реактивної адаптації з механізмами самоаналізу — тобто, рефлексивної корекції власних дій. Це реалізується шляхом зберігання результатів реакцій у внутрішній пам'яті агента й аналізу їх ефективності в подальших випадках. Таким чином, з'являється здатність до навчання без учителя на основі дії-зворотного зв'язку. У будівельних ERP-системах це проявляється як здатність автоматичних модулів фінансового контролю, технічного аудиту чи логістичного планування «вчитися» на базі попередніх проєктів і самостійно змінювати поведінку при

виникненні схожих обставин. Це поєднує ідеї реактивної моделі з більш високорівневою логікою гібридної адаптації, де локальна реакція інтегрується в загальну систему сценарного управління [93].

У підсумку, моделі реактивної адаптації агентів в умовах невизначеності не лише посилюють функціональну гнучкість складних систем, а й формують нову філософію управління, в якій контекст набуває першочергового значення, а відповідь системи є децентралізованою, локалізованою та автономною. У подальшому розгортанні доцільно дослідити, як такі моделі можуть бути скомбіновані з прогностичними аналітичними модулями, формуючи адаптивно-прогностичну архітектуру управління — особливо актуальну для високоризикованих і високодинамічних середовищ, до яких належать сучасні девелоперські та інфраструктурні проєкти.

У межах моделювання агентної поведінки в складних, непередбачуваних і швидкозмінних середовищах ключовим чинником забезпечення стійкості системи виступає не лише логіка реагування, а й розуміння типів реакцій, які здатен реалізувати агент у тому чи іншому контексті. Під поняттям "реакція" в агентному середовищі розуміють будь-яку адаптивну дію, ініційовану суб'єктом системи (агентом) у відповідь на вхідне збурення, порушення балансу або зміну оточення. Природа цих реакцій визначається множиною факторів — від ступеня складності середовища до глибини контекстної обробки сигналу, наявності пам'яті, часу на розгортання сценарію, критичності ситуації та допустимого вікна ухвалення рішення. У науковому і прикладному сенсі типологізація реакцій є способом визначити межі функціональної адаптивності агента — тобто ті структурно-операційні межі, в межах яких він здатен забезпечувати стійку поведінку без зовнішнього втручання.

Теоретичну основу для такого підходу заклала Патріція Маес, яка в середині 1990-х сформулювала принципи поведінкової адаптації агентів як сукупності простих умовно-рефлекторних реакцій, що розгортаються у межах сенсорного сигналу і актуатора без стратегічного планування. Пізніше її підходи були адаптовані у сфері робототехніки, адаптивних систем реального часу і цифрових агентних моделей, зокрема в працях Майкла Вулдріджа та

Ніколаса Дженнінгса, які заклали основи для формалізації мультиагентної взаємодії з реактивною логікою [74, 86]. У контексті динамічного середовища реактивна модель зіштовхується з необхідністю вибору між варіантами реакцій, які можуть різнитися за тривалістю, ефективністю, ресурсозалежністю та зворотним впливом на середовище.

В аналітичному сенсі реакція агента може бути описана як функція стану  $S(t)$ , параметрів середовища  $E(t)$  і набору доступних стратегій  $R = \{R_1, R_2, \dots, R_n\}$ , з яких вибирається актуальна на момент часу  $t$ . Формально цей вибір можна подати у вигляді функціонала реакції:

$$R^*(t) = \operatorname{arg} \frac{\min}{R_i \in R} \Phi(R_i, S(t), E(t)) , \quad (2.7)$$

де  $\Phi$  — функція втрат або функція цільового відхилення, яка показує, наскільки реакція  $R_i$  є релевантною до поточного стану агента і середовища. Такий підхід відкриває можливість аналізувати не просто реакцію як факт, а її оптимізацію за умов часу, ресурсу і зміни параметрів.

Відповідно до глибини обробки вхідного сигналу, тип реакції може належати до одного з чотирьох основних рівнів: прямої реакції (без обчислень), умовної реакції (з пороговим аналізом), варіативної реакції (з урахуванням кількох критеріїв) та реакції з рефлексивною пам'яттю (де враховується історія минулих дій). Наприклад, у системі управління проектом будівництва прямою реакцією може бути зупинка техніки у разі виявлення небезпеки, умовною — рішення про відтермінування постачання при перевищенні планових витрат, варіативною — вибір між заміною підрядника або зміною логістичної схеми. Рефлексивна реакція проявляється тоді, коли система автоматично приймає рішення на основі того, що в подібному випадку воно вже було успішним — наприклад, у випадку повторного порушення термінів одним і тим самим учасником [25].

Окремої уваги заслуговує структура реакції в умовах швидкозмінного середовища з багатьма параметрами, де агент мусить не лише ініціювати дію, а й постійно оновлювати уявлення про навколишню ситуацію. Тут застосовуються так звані реактивно-модульні агенти, які складаються з незалежних підмодулів — сенсорного, оцінного, прогнозного, рішеного та поведінкового. Така структура дозволяє не лише адаптуватися до зміни одного

параметра, а й синхронізувати реакції на комбінацію факторів — наприклад, одночасну затримку матеріалів, збільшення вартості палива і зміну графіка через погодні умови. Реакція у цьому випадку потребує багатопараметрового аналізу, а отже, формалізується за допомогою багатовимірних функцій. Наприклад:

$$R^*(t) = \arg \frac{\min}{R_i} \sum_{k=1}^m w_k \times \delta_k(R_i, E_k(t)), \quad (2.8)$$

де  $w_k$  — ваговий коефіцієнт важливості параметра  $k$ ,  $\delta_k$  — відхилення реакції  $R_i$  від цільового стану за параметром  $E_k$ , а  $m$  — кількість параметрів середовища.

У складних мультиагентних або цифрово-орієнтованих системах реактивна поведінка часто піддається функціональному зносу, коли частота збурень перевищує здатність агента адекватно опрацьовувати та відповідати на кожне з них. У таких випадках виникає потреба у встановленні меж адаптивності, тобто граничного обсягу змін, на які система ще може реагувати в рамках допустимого рівня стабільності. Ця межа залежить як від внутрішньої складності самого агента (кількість реакцій, глибина контексту, наявність пам'яті), так і від топології зовнішнього середовища (щільність подій, ступінь взаємозалежності параметрів, швидкість оновлення даних). Визначення такої межі дозволяє сформулювати теоретичну границю стабільної адаптації, що виводиться через співвідношення інтенсивності змін у середовищі та швидкості внутрішньої реактивної обробки:

$$\Lambda = \frac{\int_{t_0}^{t_1} \|\nabla E(t)\| dt}{\int_{t_0}^{t_1} \|\nabla R(t)\| dt}, \quad (2.9)$$

де  $\Lambda$  — коефіцієнт адаптивного навантаження,  $\nabla E(t)$  — градієнт зміни параметрів середовища,  $\nabla R(t)$  — швидкість оновлення реакційного простору агента. Значення  $\Lambda < 1$  вказує на те, що агент встигає реагувати, тоді як  $\Lambda > 1$  вказує на перевантаження і ризик зниження ефективності адаптації.

У межах узагальнення моделей реактивної адаптації особливої важливості набуває побудова структурованої типології реакцій, яка дозволяє не лише класифікувати агентні відповіді за типом, а й встановити функціональні межі їхньої ефективності залежно від контексту середовища. Така типологія створює підґрунтя для вибору або побудови адаптивної логіки

в цифрових проєктах, особливо в системах реального часу, де кожна дія повинна бути не лише швидкою, але й максимально релевантною до ситуації. Вона також дозволяє системно порівнювати різні моделі за низкою критичних критеріїв: які типи збурень агент здатен розпізнати, яку інформацію він аналізує, якою є глибина реагування та наскільки широко агент може масштабувати свою поведінку в умовах зростання інтенсивності змін.

Ця структурна типологія дає змогу побачити, на якому рівні складності перебуває кожна конкретна реактивна система, де саме проходить межа її адаптивності та якого класу агентної архітектури вона потребує. Це особливо актуально для високонавантажених середовищ, зокрема — будівельних ERP-систем, цифрових логістичних платформ, інфраструктурних мереж управління. Нижче представлено таблицю 2.1, яка систематизує типи реакцій за п'ятьма ключовими параметрами: характер збурення, рівень обробки, архітектура агента, логіка прийняття рішення та межа адаптації, визначена за допомогою аналітичного коефіцієнта  $\Lambda$  [37].

Для кращого розуміння розподілу типів реакцій і рівнів адаптивності пропонується таблиця 2.1, вона дозволяє не лише структурувати реактивні моделі, а й визначити області, де відбувається перехід від простих до складних агентів, або від стабільної реакції до критичної.

Ця типологізація допомагає зрозуміти, що реактивна поведінка — не монолітна, а багаторівнева за складністю і потенціалом адаптації. Вибір конкретної моделі реакції залежить від цілей системи, допустимого рівня ризику, динаміки змін і обмежень ресурсів. Найпростішим агентам (з низьким  $\Lambda$ ) притаманна висока швидкість реакції, але обмежена якість; складніші агенти потребують більше часу, але забезпечують глибшу релевантність і стратегічну цінність реагування.

Після класифікації типів реакцій і аналітичного окреслення меж адаптивності постає завдання структурної інтеграції типів реакцій у загальну модель поведінки агента. Особливо це важливо в контексті багат шарових або ієрархічних систем, де кілька агентів функціонують паралельно або послідовно в межах складного операційного середовища (наприклад,

будівельний хаб, цифровий кластер інфраструктурного проєкту, інтелектуальний логістичний модуль).

Таблиця 2.1

**Структурна типологія реактивних моделей агентної поведінки в умовах динамічного середовища**

Тип збурення	Рівень обробки	Архітектура агента	Механізм вибору дії	Межа адаптивності ( $\Lambda$ )
Сигнальне (S)	Пряма відповідь	Статичний одношаровий	Жорстко зашитий тригер	Низька ( $\Lambda \leq 0.3$ )
Порогове ( $\Delta > \epsilon$ )	Умова + фільтрація	Сенсорно-рефлекторна	Таблиця відповідей (Rule Base)	Середня ( $\Lambda \approx 0.5-0.7$ )
Комбіноване	Зважена агрегація	Багатомодульна реактивна	Функція релевантності дій	Висока ( $\Lambda \approx 0.8-0.95$ )
Сценарне	Прогноз + реакція	Напівавтономна агентна мережа	Мультикритеріальна оптимізація	Дуже висока ( $\Lambda < 1.1$ )
Контекстно-динамічне	Історія + рефлексія	Самонавчальна адаптивна	Пошук з мінімізацією втрат (RL / MDP логіка)	Гранична ( $\Lambda \approx 1$ або вище, з ризиком)

(Джерело: розроблено автором на основі [37])

У таких випадках кожен агент має власний рівень реакції, але також взаємодіє з іншими, утворюючи адаптивну поведінкову мережу. Саме тому необхідно описати, яким чином організується реакція у випадку зміни середовища: які модулі відповідають за сприйняття, аналіз, вибір дії та її реалізацію, і як формується зворотний зв'язок. Для того щоб більш чітко структурувати логіку реагування агентної системи в умовах динамічного середовища, доцільно представити архітектуру реактивної адаптації у вигляді поетапної поведінкової моделі. Такий підхід дозволяє візуалізувати зв'язки між сенсорною активацією, аналітичним аналізом, вибором реакції та зворотним зв'язком, що забезпечує цілісність адаптаційного циклу [24]. На основі цього формується багаторівнева система, в якій кожен рівень відповідає за окрему функціональну фазу — від виявлення порушення до рефлексивного навчання. Візуальну структуру такої моделі наведено на рисунку 2.4.

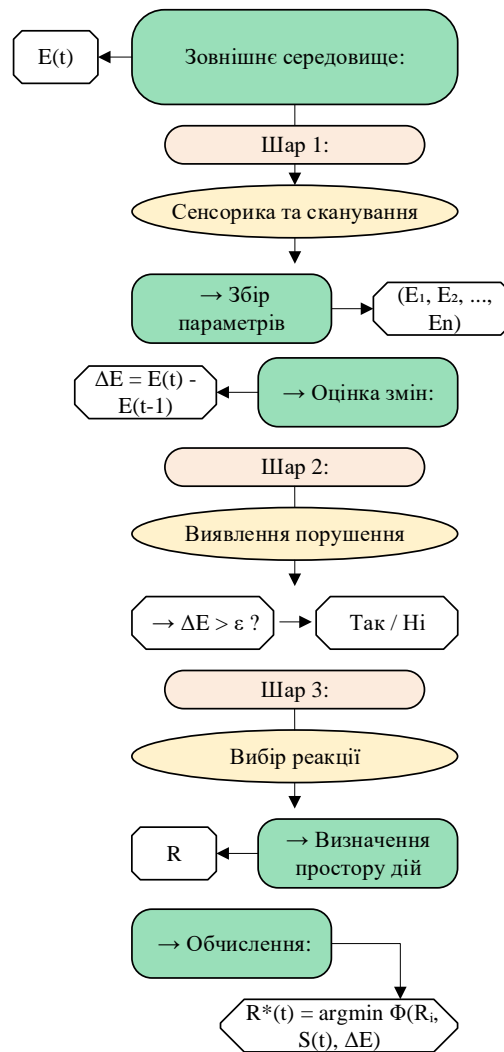


Рисунок 2.4. Багаторівнева архітектура реактивної адаптації агента в складному динамічному середовищі (Джерело: розроблено автором на основі [24])

Аналіз ефективності такої системи потребує оцінки динаміки точності та стійкості реакцій. Для цього запроваджується інтегральна функція ефективності адаптації, яка враховує відхилення дії агента від цільового стану за час адаптації:

$$A_{eff} = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} \left[ 1 - \frac{|\hat{R}(t) - R_{opt}(t)|}{R_{max}} \right] dt, \quad (2.10)$$

де  $\hat{R}$  — фактично обрана реакція,  $R_{opt}(t)$  — оптимальна у даному середовищі,  $R_{max}$  — нормалізована межа реакцій,  $A_{eff}$  — інтегральний індекс ефективності адаптації. Значення близьке до 1 свідчить про високу відповідність дій агента контексту, що особливо важливо для інженерних систем, які функціонують під тиском часу і ресурсів.

Таким чином, побудова системного представлення поведінки агента в умовах невизначеності вимагає не лише знання типів реакцій, а й чіткої структурної організації всього адаптивного контуру. Це дозволяє реалізувати автономну гнучку поведінку без втрати цілісності або ефективності, що критично важливо для цифрових середовищ, які змінюються швидше, ніж може втрутитися людина. У будівництві це відкриває шлях до повноцінних самоорганізованих логістичних систем, реактивних інформаційних потоків і інтелектуальних інтерфейсів, які обслуговують проєкт не лише як статичну структуру, а як динамічний соціотехнічний організм, здатний до еволюції.

У прикладному вимірі впровадження реактивних підходів виникає потреба не просто класифікувати окремі типи агентів, а й системно порівняти їх адаптивні властивості в контексті змінного операційного середовища [8]. Таке порівняння дозволяє виявити не лише сильні й слабкі сторони конкретних моделей, а й обґрунтовано обрати відповідну архітектуру агента для певного типу проєкту або інженерної задачі. У цифрових середовищах управління будівництвом, логістикою чи девелопментом, де рішення мають прийматись у режимі реального часу, а параметри змінюються з великою частотою, вибір моделі агента стає стратегічним елементом ефективності всієї системи. Неправильна конфігурація може призвести до паралічу рішень, затримок у виконанні або некоректної реакції на події, що загрожує зривом проєктів або перерозподілом ресурсів.

Зокрема, у випадках застосування мультиагентних структур у проєктному управлінні актуальною стає задача зіставлення характеристик адаптивності. Визначальними параметрами, які необхідно порівняти між собою, є: глибина контекстної обробки вхідних даних, тобто наскільки глибоко агент аналізує ситуацію; енергоспоживання, що визначає економічну ефективність моделі; час затримки реакції, який критично важливий для оперативних систем; здатність до навчання, тобто чи може агент модифікувати свою поведінку на основі минулого досвіду; історична пам'ять, яка дозволяє накопичувати структурні шаблони рішень; і, зрештою, стійкість до високої частоти змін середовища. На основі цих параметрів формується інтегральна

оцінка придатності конкретної моделі до застосування в тих чи інших умовах [38].

Щоб сформувані структуроване бачення потенціалу реактивних агентів у різних сценаріях, пропонується таблиця 2.2, що об'єднує аналітичні властивості кожного з типів агентів. Вона дозволяє не тільки виділити найбільш ефективні архітектури, а й зрозуміти, в яких саме умовах їх доцільно впроваджувати.

Таблиця 2.2

**Характеристика типів реактивних агентів за ключовими адаптивними властивостями**

Клас агента	Рівень контекстної обробки	Енергоспоживання	Затримка реакції	Здатність до навчання	Історична пам'ять	Ефективність при високій частоті змін
Одношаровий тригерний	Мінімальний (1–2 параметри)	Низьке	Мінімальна	Відсутня	Немає	Середня
Пороговий умовний	Проста евристика	Середнє	Низька	Частково (завдання правил)	Короткотривала	Висока
Багатомодульний реактивний	Контекст + сценарії	Високе	Середня	Частково (на основі моделей)	Часткова	Висока
Самонавчальний рефлексивний	Багатофакторний аналіз	Високе	Висока	Повна (ML/RL-підхід)	Так	Дуже висока (при стабільному контексті)
Гібридний когнітивно-реактивний	Прогноз + рефлексія	Змінне (адаптивне)	Середня	Автоматизована адаптація	Довготривала	Найвища (за умови правильної інтеграції)

(Джерело: розроблено автором на основі [38])

Можна зробити висновок, що простота моделі прямо корелює з надійністю при низькій динаміці середовища, тоді як складніші когнітивні агенти демонструють вищу ефективність лише в умовах достатньо стабільного інформаційного контексту або при наявності резерву часу. Для середовищ, де важлива швидка, хоч і неідеальна реакція (наприклад, системи попередження аварій або відстеження ризиків у будівництві), більше підходять порогові або багатомодульні моделі [20]. Натомість для гнучких систем стратегічного управління, з можливістю глибокого навчання та оптимізації, найкращими виявляються гібридні реактивно-когнітивні архітектури.

### **2.3. Визначення потенціалу управлінських змін на основі оцінки інноваційної спроможності підприємства**

Сучасна управлінська наука розглядає поняття управлінських змін як складну багатовимірну систему динамічних трансформацій, що зачіпають організаційні структури, бізнес-процеси, стратегії та культурно-поведінкові установки колективу підприємства. Проте в основі здатності підприємства здійснювати ефективні управлінські зміни лежить саме рівень його інноваційної спроможності, який виступає інтегрованим показником готовності організації до сприйняття нового, впровадження технологічних і методологічних новацій, а також до формування сталих конкурентних переваг у динамічному середовищі.

У сучасному розумінні інноваційна спроможність підприємства визначається як сукупність потенційних і реалізованих можливостей організації з генерації, відбору, адаптації, впровадження та комерціалізації інноваційних рішень у всіх сферах функціонування. Це поняття охоплює технологічні, фінансові, кадрові, організаційні, маркетингові та культурно-поведінкові аспекти діяльності підприємства. Згідно з підходом Г. Доджсона, інноваційна спроможність є результатом системної інтеграції внутрішніх компетенцій організації з можливостями зовнішнього середовища, що формує основу для гнучкості управлінських систем у процесі адаптації до змінних ринкових умов [29].

Інноваційна спроможність є фундаментом для формування потенціалу управлінських змін. Відповідно до моделі С. Бенісса, управлінські зміни можна подати як функцію залежності від інноваційної спроможності за формулою:

$$UC = f(IC, \Delta E, R, A), \quad (2.11)$$

де  $UC$  — потенціал управлінських змін,  $IC$  — інноваційна спроможність,  $\Delta E$  — рівень зовнішніх змін середовища,  $R$  — ресурсна база організації,  $A$  — адаптивність організаційної культури.

Ця формалізація дозволяє визначити, що навіть за високої інноваційної спроможності підприємство може демонструвати різну швидкість і глибину управлінських змін залежно від чутливості організаційної структури до зовнішніх імпульсів, гнучкості внутрішніх процедур і компетенцій управлінського персоналу.

Особливу увагу заслуговують підходи системної теорії, що розглядають підприємство як відкриту соціально-економічну систему, здатну до самоорганізації та саморегуляції. У цьому контексті інноваційна спроможність визначається через здатність системи формувати внутрішні механізми самооновлення. Теорія автопоезису Нікласа Лумана та Франсіско Варели розкриває механізми, за яких організація може не лише реагувати на зміни середовища, але й ініціювати внутрішні модифікації, підтримуючи цілісність і функціональність своєї структури. Інновації у цьому випадку виступають формою структурної рекурсії, що забезпечує стабільний розвиток системи [48].

Однією з важливих моделей опису взаємозв'язку між інноваційною спроможністю та потенціалом управлінських змін є модель нелінійної залежності, яка може бути подана через інтегральне рівняння адаптаційного потенціалу:

$$AP = \int_0^T [\alpha \cdot IC(t) + \beta \cdot K(t) + \gamma \cdot O(t)] dt, \quad (2.12)$$

де  $AP$  — адаптаційний потенціал управлінських змін,  $IC(t)$  — інноваційна спроможність у часі,  $K(t)$  — кадровий потенціал знань,  $O(t)$  — організаційна культура адаптації,  $\alpha, \beta, \gamma$  — вагові коефіцієнти відповідних факторів. Дана модель підкреслює мультифакторну природу формування

готовності підприємства до змін, де інтеграція знань, корпоративної культури і системних інновацій забезпечує синергетичний ефект у формуванні здатності до управлінських трансформацій.

Особливої уваги заслуговує внесок зарубіжних дослідників, зокрема Д. Тіса, Г. Лопеса, Р. Нельсона, які заклали основи концепції динамічних здібностей підприємства (*dynamic capabilities*). Відповідно до їх підходу, підприємство з високим рівнем динамічних здібностей здатне не лише інтегрувати зовнішні й внутрішні ресурси, а й адаптувати, перебудовувати та трансформувати свої управлінські практики залежно від змін середовища. Вони формалізували динамічні здібності за допомогою наступної моделі [32]:

$$DC = \delta(S, I, L, C), \quad (2.13)$$

де DC — динамічні здібності підприємства, S — здатність до відчуття змін (*sensing*), I — інтеграція нових знань (*integrating*), L — навчання організації (*learning*), C — конфігурація бізнес-моделі (*configuring*).

Ця функція ілюструє ключову логіку управлінських змін: саме підприємства з високим рівнем інноваційної спроможності демонструють здатність системно здійснювати управлінські трансформації через розвиток динамічних здібностей.

З огляду на складність взаємозв'язків між інноваційною спроможністю та готовністю до змін, у науковій літературі починає формуватись концепція нелінійної реакції управлінських систем на інноваційні імпульси, яка може бути подана через модифіковане логістичне рівняння адаптації:

$$\frac{dU}{cdt} = r \cdot UC \cdot \left(1 - \frac{UC}{K}\right) + \lambda \cdot IC, \quad (2.14)$$

де  $\frac{dU}{cdt}$  — швидкість приросту потенціалу управлінських змін,  $r$  — базова швидкість організаційної адаптації,  $K$  — гранична місткість системи до змін,  $\lambda \cdot IC$  — стимулюючий вплив інноваційної спроможності.

Ця формула дозволяє пояснити ефект синергії: за умов високої інноваційної активності підприємство здатне прискорити управлінські зміни, наближуючи організаційну систему до нових стабільних рівноваг, одночасно уникаючи надмірних коливань та організаційних дисфункцій.

Для поглибленого розуміння цього процесу доцільно представити текстову блок-схему, що демонструє взаємозв'язок ключових структурних елементів формування потенціалу управлінських змін на основі інноваційної спроможності підприємства. Саме така структуризація дозволяє систематизувати багатовимірність цього явища та показати логіку формування змінних механізмів усередині підприємства (рисунок 2.5).

Згідно з представленою блок-схемою, процес формування потенціалу управлінських змін має глибоко інтегративний характер, де кожен етап є необхідною передумовою для переходу до наступного рівня.

Так, інноваційна спроможність не є одноразовим актом, а виступає постійним генератором нових ідей, що проходять фільтрацію за критеріями релевантності та економічної доцільності.



Рисунок 2.5. Структурно-функціональна модель формування потенціалу управлінських змін на основі інноваційної спроможності підприємства  
(Джерело: розроблено автором на основі [32])

Структурно-функціональна модель формування потенціалу управлінських змін на основі інноваційної спроможності підприємства

відображає взаємозв'язок ресурсних, організаційних та управлінських компонентів, які у сукупності визначають здатність підприємства до трансформацій. Центральним елементом моделі є інноваційна спроможність підприємства як інтегральна характеристика, що формується під впливом ключових функціональних підсистем і виступає базою для розвитку потенціалу управлінських змін.

Фінансово-економічна підсистема забезпечує ресурсну основу інноваційної діяльності та управлінських трансформацій. Її функції полягають у формуванні, розподілі та оптимізації фінансових ресурсів, необхідних для впровадження змін, оцінюванні інвестиційної доцільності інноваційних рішень, а також у забезпеченні економічної стійкості підприємства в умовах трансформаційних процесів. Саме ця підсистема визначає реальні можливості реалізації інноваційних ініціатив.

Підсистема бізнес-процесів і технологій відповідає за організаційно-технологічне забезпечення інноваційної діяльності. Вона включає аналіз, моделювання та оптимізацію бізнес-процесів, впровадження сучасних технологій, цифрових рішень і автоматизованих систем управління. Її функція полягає у створенні ефективної операційної бази, що дозволяє реалізувати інновації та забезпечити їх масштабування в межах підприємства.

Підсистема управлінських компетенцій формує інтелектуальний та управлінський потенціал підприємства. Вона забезпечує розвиток професійних знань, навичок і компетенцій управлінського персоналу, здатного ініціювати, планувати та реалізовувати зміни. До її функцій належить підготовка керівників до роботи в умовах невизначеності, формування стратегічного мислення та здатності до прийняття складних управлінських рішень.

Підсистема корпоративної культури виконує функцію соціально-психологічного забезпечення змін. Вона формує цінності, норми та поведінкові установки персоналу, що сприяють або стримують інноваційні процеси. Основною її функцією є створення сприятливого середовища для

впровадження змін, підтримка відкритості до нововведень, стимулювання ініціативності та зниження опору трансформаціям.

Інноваційна спроможність підприємства, як інтегруючий елемент, акумулює результати функціонування зазначених підсистем і трансформує їх у здатність підприємства генерувати, впроваджувати та масштабувати інновації. Вона виступає ключовим фактором, що визначає рівень готовності підприємства до управлінських змін.

На основі інноваційної спроможності формується потенціал управлінських змін, який характеризує здатність підприємства здійснювати ефективні трансформації управлінських процесів. Цей потенціал реалізується через послідовність взаємопов'язаних функціональних етапів.

Функція ініціювання передбачає виявлення потреби у змінах, формування цілей і визначення напрямів трансформації. Вона базується на аналізі внутрішнього та зовнішнього середовища підприємства, ідентифікації проблем і можливостей розвитку.

Функція проектування полягає у розробленні моделей і сценаріїв реалізації змін. На цьому етапі визначаються необхідні ресурси, формуються управлінські рішення, розробляються плани дій та оцінюються можливі наслідки впровадження інновацій.

Функція реалізації забезпечує практичне впровадження розроблених рішень. Вона включає організацію виконання заходів, координацію діяльності підрозділів, управління ресурсами та контроль за дотриманням встановлених параметрів змін.

Функція моніторингу передбачає постійне відстеження результатів впроваджених змін, оцінювання їх ефективності та виявлення відхилень від запланованих показників. Вона забезпечує зворотний зв'язок і створює основу для коригування управлінських рішень.

Таким чином, запропонована модель відображає цілісний механізм формування потенціалу управлінських змін, у якому інноваційна спроможність виступає системоутворюючим фактором, а функціональні

підсистеми забезпечують ресурсне, організаційне та поведінкове підґрунтя для ефективної реалізації трансформацій.

Далі ці ідеї вбудовуються у стратегічну архітектуру підприємства, породжуючи необхідність перебудови бізнес-процесів, нарощування компетенцій персоналу та адаптації культурних норм організації. Лише після проходження цих етапів система виходить на рівень стійкої організаційної трансформації, де управлінські зміни набувають системного характеру та підтримуються внутрішньою логікою функціонування підприємства [5].

Значну увагу в цьому контексті заслуговує питання ролі кадрових компетенцій у формуванні потенціалу управлінських змін. Дослідження М. Барні та Д. Улріха доводять, що знання, навички, мотиваційні орієнтири та когнітивна готовність персоналу виступають центральними елементами будь-яких трансформаційних процесів [23]. Їхні роботи дозволяють формалізувати внесок людського капіталу в управлінські зміни через наступну залежність:

$$HC = \phi(K_s, S_c, M_o, L_c), \quad (2.15)$$

Де  $HC$  — індекс кадрової підтримки управлінських змін,  $K_s$  — спеціалізовані професійні знання,  $S_c$  — стратегічні компетенції персоналу,  $M_o$  — мотиваційна орієнтація до змін,  $L_c$  — навчальна здатність та гнучкість у навчанні.

Водночас не менш значущою складовою є адаптивність організаційної культури, яка формує ціннісний фундамент управлінських змін. Теорія культурних парадигм Г. Хофстеде демонструє, що високий рівень толерантності до невизначеності, колективізму та довіри всередині організації стимулює більш активне прийняття управлінських новацій. Організація з розвиненою культурною адаптивністю краще сприймає інновації та швидше інтерналізує нові управлінські практики [46].

З математичної точки зору інтегративний ефект культури та людського капіталу на готовність підприємства до змін може бути описаний через наступну функцію:

$$UC = IC \cdot [1 + \theta_1 \cdot HC + \theta_2 \cdot OC], \quad (2.16)$$

де UC — підсумковий потенціал управлінських змін, ІСІ — інноваційна спроможність, НС — людський капітал змін, ОС — адаптивність організаційної культури,  $\theta_1, \theta_2$  — коефіцієнти впливу відповідних факторів.

Дана функція показує, що навіть при однаковому рівні інноваційної активності підприємства можуть демонструвати суттєво різну готовність до управлінських змін залежно від стану внутрішніх ресурсів людського та культурного характеру.

Формування дієвої методології діагностики інноваційної спроможності підприємства є критичним етапом у загальній логіці управлінських змін, оскільки саме результати такої діагностики слугують основою для ухвалення стратегічних управлінських рішень щодо трансформаційної траєкторії розвитку організації. Інноваційна спроможність є латентною величиною, що не піддається прямому вимірюванню, а тому потребує побудови складних діагностичних моделей, які охоплюють багатоаспектні характеристики функціонування підприємства у науково-технологічному, організаційному, фінансовому, ринковому та кадровому вимірах [49].

Усі підходи наголошують, що діагностика інноваційної спроможності має ґрунтуватися не лише на факті наявності інноваційних продуктів чи технологій, а й на вимірюванні системної готовності підприємства генерувати, інтегрувати та масштабувати інновації у рамках усіх внутрішніх бізнес-процесів.

Виходячи з цього положення, структура діагностики повинна бути побудована у вигляді багаторівневої моделі оцінювання, яка дозволяє поєднати в єдину систему як прямі, так і опосередковані індикатори інноваційної активності. Доцільно представити інтегровану діагностичну архітектуру у вигляді складної блок-схеми, яка демонструє ключові блоки оцінювання інноваційної спроможності, як зображено на рисунку 2.6.

Як видно з представленої блок-схеми, процес діагностики є багаторівневим та охоплює комплексну сукупність факторів, що визначають реальний рівень інноваційної спроможності підприємства. Лише за умови повноцінного охоплення всіх наведених блоків можливо отримати об'єктивну оцінку внутрішньої готовності підприємства до стратегічних управлінських

змін, оскільки пропуски на будь-якому з рівнів ведуть до викривлення загальної картини інноваційної зрілості організації.

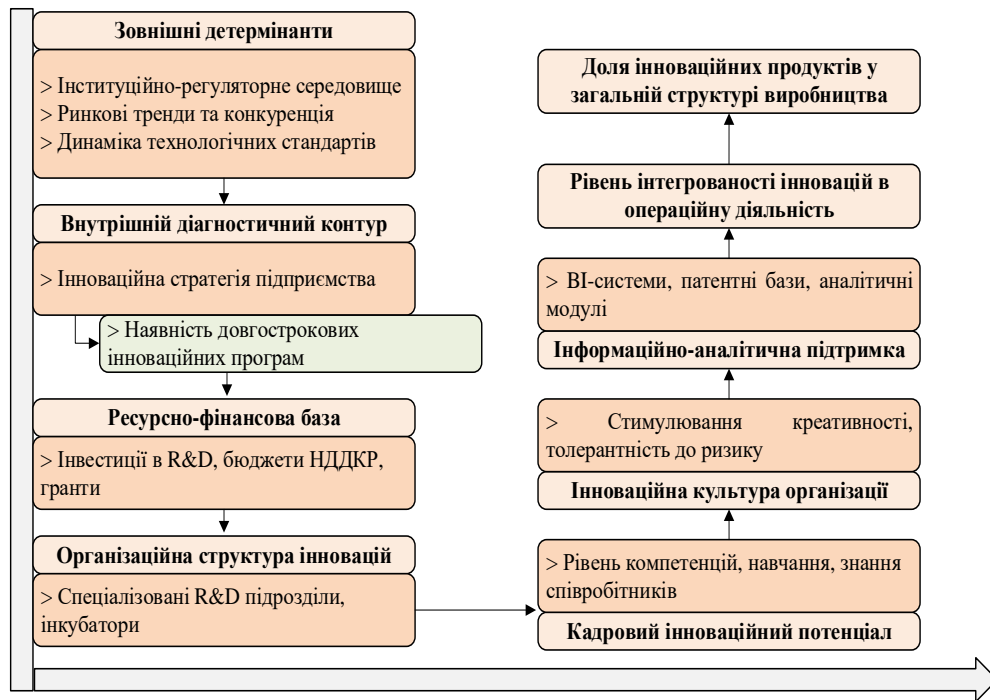


Рисунок 2.6. Інтегрована діагностична модель оцінювання інноваційної спроможності підприємства (Джерело: розроблено автором на основі [49])

Деталізація такої оцінки передбачає застосування спеціалізованих діагностичних матриць, що дозволяють кількісно вимірювати окремі компоненти. Одним із найбільш поширених підходів у цьому контексті є система інтегральних індексів, що були розроблені зокрема в роботах Г. Кобелі, М. Тісса, а також у рамках методики Innovation Capability Maturity Model (ICMM), що широко використовується у практиці стратегічного управління інноваціями [18]. Основна формула обчислення інтегрального індексу інноваційної спроможності в узагальненій формі подається так:

$$ICI = \sum_{i=1}^n w_i \cdot S_i, \quad (2.17)$$

де  $ICI$  — інтегральний індекс інноваційної спроможності,  $w_i$  — ваговий коефіцієнт  $i$ -го показника,  $S_i$  — оцінка за шкалою кожного  $i$ -го параметру інноваційної системи підприємства,  $n$  — кількість діагностичних параметрів.

У цій формулі інтегруються всі раніше зазначені блоки оцінювання, причому значення вагових коефіцієнтів може бути скориговане залежно від

специфіки галузі, стадії розвитку підприємства та його стратегічних орієнтирів.

Дослідження факторної структури впливу інноваційної спроможності на потенціал управлінських трансформацій підприємства дозволяє вийти на глибокий рівень розуміння причинно-наслідкових механізмів організаційних змін. У межах сучасних підходів, інноваційна спроможність не є монофакторною категорією, вона формується через складну сукупність взаємопов'язаних елементів внутрішнього середовища підприємства, кожен з яких визначає специфіку і силу управлінської адаптації системи.

Ресурсно-фінансовий блок концентрує в собі доступність і гнучкість ресурсних потоків, необхідних для фінансування інноваційних ініціатив. Йдеться як про внутрішні джерела — капіталізацію прибутку, амортизаційні відрахування, так і про зовнішні інструменти фінансування: венчурний капітал, кредитування, державні субсидії та інноваційні гранти. Згідно з моделлю Дж. Брауна і П. Осборна, рівень фінансової гнучкості формалізується за допомогою коефіцієнта інноваційної ліквідності [4]:

$$IL = \frac{I_{R\&D} + I_{VC} + I_S}{TA}, \quad (2.18)$$

де  $IL$  — інноваційна ліквідність,  $I_{R\&D}$  — внутрішні інвестиції в дослідження і розробки,  $I_{VC}$  — обсяг венчурного фінансування,  $I_S$  — обсяг субсидій та грантів,  $TA$  — загальні активи підприємства.

Організаційно-управлінська архітектура охоплює гнучкість бізнес-процесів, наявність проектних офісів, інноваційних комітетів, ефективність механізмів прийняття рішень, швидкість інтеграції нових знань та адаптацію управлінських регламентів під змінювані умови. Сучасні моделі організаційної гнучкості, зокрема модель НРО (High Performance Organization), розглядають цей блок як ключовий провідник інноваційних імпульсів до внутрішніх структур. Узагальнюючи взаємозв'язок вказаних блоків, можна побудувати факторну модель інтеграції, що демонструє як ці складові формують інтегральний потенціал управлінських трансформацій:

$$PT = \alpha \cdot RF + \beta \cdot OU + \gamma \cdot BH, \quad (2.19)$$

де  $PT$  — потенціал трансформаційних змін,  $RF$  — ресурсно-фінансовий блок,  $OU$  — організаційно-управлінський блок,  $BH$  — поведінковий (behavioral)

блок,  $\alpha, \beta, \gamma$ — вагові коефіцієнти, що враховують пріоритетність кожного фактора.

Особливу аналітичну цінність у вивченні взаємодії цих факторів має графічна модель, що дозволяє візуалізувати різні сценарії управлінських трансформацій залежно від варіацій рівня кожного із зазначених блоків. Нижче наведено рисунок 2.7, який ілюструє вплив збалансованості факторної структури інноваційної спроможності на ймовірність глибоких управлінських трансформацій.

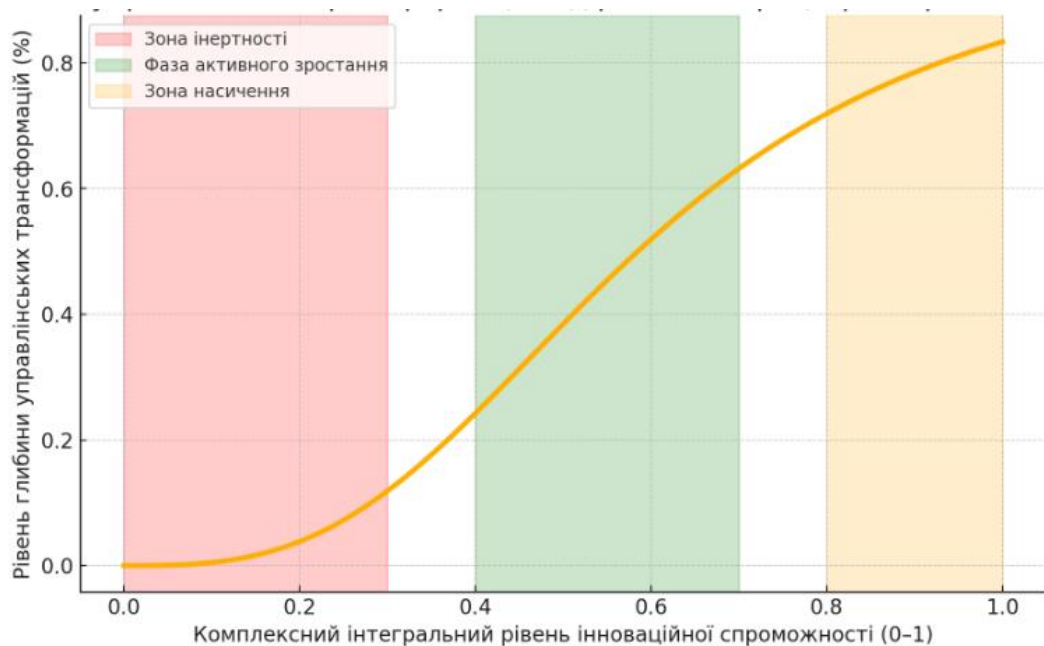


Рисунок 2.7. Залежність глибини управлінських трансформацій від рівня інтеграції факторних блоків інноваційної спроможності

(Джерело: розроблено автором на основі [31])

Внизу графіка — зона ризику трансформаційної інертності при значеннях  $<0.3$ . З наведеного графіка видно, що ефективність управлінських змін істотно залежить не лише від номінального рівня інноваційної спроможності, але й від збалансованості внутрішньої структури її складових. Саме в діапазоні помірного зростання (0.4–0.7) відбувається різкий стрибок здатності організації до глибоких системних змін, тоді як на початкових етапах неузгодженість блоків створює небезпеку інституційної інертності, а в зоні насичення ефект подальших інновацій зменшується через граничні обмеження організаційної адаптації [10].

Таким чином, дослідження факторної структури дозволяє перейти від загальних декларацій про інноваційний розвиток до точкової аналітики, яка формує базу для розробки конкретних управлінських сценаріїв трансформаційного розвитку підприємства.

Побудова моделей управлінських змін, що базуються на рівні інноваційної спроможності підприємства, потребує особливого підходу до формалізації взаємозв'язків між різнорівневими управлінськими та інноваційними факторами, які у сукупності формують організаційну траєкторію розвитку. Підприємства, що володіють високим інноваційним потенціалом, здатні не лише своєчасно реагувати на зовнішні зміни, а й випереджати конкурентів за рахунок внутрішньої генерації трансформаційних сценаріїв [59]. Саме тому ключовим завданням моделювання є побудова адаптивних мультифакторних конструкцій, що враховують динамічний характер організаційних процесів.

Так, є модель адаптивної рівноваги, яку можна описати за допомогою диференціального рівняння:

$$\frac{dC(t)}{dt} = \rho \cdot [ICI(t) \cdot \Gamma(t) - \Lambda(t)], \quad (2.20)$$

де  $C(t)$  — рівень внутрішньої управлінської адаптації у момент часу  $t$ ,  $ICI$  — інтегральний індекс інноваційної спроможності,  $\Gamma(t)$  — коефіцієнт організаційної гнучкості,  $\Lambda(t)$  — внутрішній опір змінам,  $\rho$  — параметр швидкості трансформації.

Дана модель дозволяє оцінити баланс між каталізаторами змін та внутрішніми стабілізаційними механізмами, що утримують систему в межах керованих траєкторій розвитку. Залежно від співвідношення цих складових формується профіль адаптивної поведінки організації — від інноваційно-інертного до проактивно-адаптивного.

Водночас, поряд із моделюванням процесів управлінських змін виникає завдання проектування практичних механізмів нарощування інноваційної спроможності. У працях [19] обґрунтовано, що розвиток інноваційної спроможності вимагає формування багаторівневої архітектури практичних управлінських інструментів, серед яких особливої ваги набувають: 1. формування внутрішніх R&D-центрів та корпоративних інкубаторів

інновацій; 2. впровадження систем стимулювання персоналу за ініціативність і участь у проектах змін; 3. інтеграція CRM, ERP, BI та AI-систем для комплексної підтримки прийняття управлінських рішень; 4. диверсифікація джерел інвестиційного забезпечення інноваційних програм; 5. розробка систем внутрішнього навчання і сертифікації інноваційних компетенцій.

Щоб систематизувати комплекс таких механізмів у структурі управлінської моделі, доцільно подати їх у вигляді узагальненої таблиці інтеграції інструментів формування інноваційної спроможності підприємства та відповідного впливу на управлінські зміни, представлені в таблиці 2.3, нижче [1].

Таблиця 2.3

**Інтеграційна модель практичних механізмів нарощування інноваційної спроможності в системі управлінських змін підприємства**

Напрямок впливу	Інструменти та практичні механізми	Очікуваний ефект в управлінських змінах
Технологічна база	Створення внутрішніх R&D-центрів, лабораторій, акселераторів	Генерація технологічних інновацій, підвищення варіантності сценаріїв змін
Кадровий потенціал	Програми розвитку компетенцій, мотиваційні системи участі в інноваціях	Підвищення персональної гнучкості до змін, зміцнення підприємницького мислення
Організаційна структура	Побудова гнучких проектних офісів, інноваційних комітетів	Скорочення циклів ухвалення рішень, адаптивність процедур управління
Інформаційна підтримка	Впровадження BI, ERP, AI-платформ та систем аналітики	Прогнозна точність управлінських рішень, скорочення часових лагів реакції
Фінансово-інвестиційна підтримка	Диверсифікація джерел фінансування (венчур, держпрограми, фонди)	Забезпечення стабільності фінансування інноваційних циклів
Культурне середовище	Формування відкритої культури інновацій, толерантності до помилок	Зниження бар'єрів спротиву змінам, зростання внутрішньої ініціативи

*(Джерело: розроблено автором на основі [1])*

Як видно з представленої таблиці, лише інтеграція багатofакторних практичних механізмів дозволяє побудувати стійку систему управлінських змін, де інноваційна спроможність виступає одночасно джерелом, провідником і стабілізатором трансформаційних процесів. Підсумовуючи, можна

констатувати, що побудова моделей управлінських змін на основі діагностованої інноваційної спроможності підприємства є високоефективною стратегією формування стійкої конкурентної динаміки організації у сучасному нестабільному середовищі. Вона дозволяє перевести процес змін з категорії реактивних заходів у площину системного внутрішнього розвитку, що є головною запорукою довгострокового функціонального балансу підприємства в епоху глибоких економічних, технологічних та соціальних перетворень.

У межах другого розділу дисертаційної роботи наукова новизна дослідження доцільно інтерпретується через формування та обґрунтування багаторівневої системи методичних компонентів, яка виступає основою побудови інтегрованого інструментарію мультиагентного управління трудовими ресурсами в умовах невизначеності, рисунок 2.8.



Рисунок 2.8. Методична багаторівнева система компонентів дослідження. Джерело: розроблено автором.

Запропонована система відображає новий підхід до структуризації методичного забезпечення, що ґрунтується на ієрархічному поєднанні

універсальних методів, спеціальних моделей, інформаційних платформ та інтелектуальних технологій. На відміну від традиційних підходів, у яких методичний апарат формується фрагментарно, у роботі обґрунтовано їх інтеграцію в єдину узгоджену систему, що забезпечує послідовність переходу від теоретичного аналізу до практичної реалізації.

У межах дослідження методичні компоненти доцільно розглядати як формалізований простір наукового пізнання, що має ієрархічну структуру та забезпечує інтеграцію методів, моделей і цифрових інструментів у єдину систему прийняття рішень.

Такий простір визначається як:

$$M = \langle L, A, F, P, T \rangle \quad (2.21)$$

де:  $L = \{L_1, L_2, L_3, L_4\}$  — множина рівнів методичної системи;

$A$  — множина агентів (учасників або елементів системи управління);

$F$  — множина функцій і моделей;

$P$  — множина платформ (цифрового середовища);

$T$  — множина інформаційних технологій.

Кожен рівень  $L$  визначається як підпростір:

$$L_i = \{m_{ij}\}, i=1..4 \quad (2.22)$$

де  $m_{ij}$  — методи або інструменти відповідного рівня.

При цьому:

$L_1$  — базовий рівень (універсальні методи);

$L_2$  — аналітико-моделювальний рівень;

$L_3$  — інфраструктурний рівень (платформи);

$L_4$  — технологічний рівень (ІТ).

Взаємозв'язок рівнів задається відображенням:  $L_1 \rightarrow \varphi_1 L_2 \rightarrow \varphi_2 L_3 \rightarrow \varphi_3 L_4$ , що формує послідовний ланцюг трансформації знань: методологія  $\rightarrow$  моделювання  $\rightarrow$  цифрова інтеграція  $\rightarrow$  інтелектуалізація.

Функціонування всієї системи описується оператором інтеграції  $R = \Phi(L, A, F, P, T)$ , який забезпечує узгодження методичних, модельних,

платформних і технологічних компонентів та формує синергетичний результат у вигляді ефективної системи управління трудовими ресурсами.

де  $R$ — результат дослідження (ефективна система управління трудовими ресурсами).

Функція  $\Phi$  забезпечує узгодження всіх компонентів та їх синергію.

У межах мультиагентного підходу система розглядається як сукупність агентів  $A = \{a_i\}$ ,  $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$

Стан кожного агента  $s_i(t) = (x_i, u_i, \theta_i)$  еволюціонує за динамічним законом  $s_i(t+1) = F_i(s_i(t), S_{-i}(t), \xi(t))$ , що дозволяє враховувати адаптивність, взаємодію та вплив невизначеності на процес прийняття рішень.

де  $x_i$  — ресурси агента;  $u_i$  — управлінські дії;  $\theta_i$  — параметри адаптації.

Інтегральний результат оцінюється через функцію ефективності:

$$E = \sum_{i=1}^n w_i f_i(x_i, u_i) - \lambda R \quad (2.23)$$

Де  $w_i$ — вагові коефіцієнти;

$f_i$ — локальні функції ефективності;

$R$  — ризики;

$\lambda$ — коефіцієнт їх впливу.

Невизначеність задається  $\xi \in \Omega, P(\xi) = p$

або через нечіткі множини  $X \sim = \{(x, \mu(x))\}, \mu(x) \in [0, 1]$

Це дозволяє враховувати неповноту інформації та варіативність сценаріїв.

Таким чином, запропонована система описується як:

- ієрархічний простір (через  $L_i$ );
- мультиагентна система (через  $A$ );
- функціональна модель (через  $F$ );
- цифрове середовище (через  $P$ );
- технологічна оболонка (через  $T$ ).

Формалізований простір дослідження демонструє, що методичні компоненти дисертації утворюють цілісну інтегровану систему, у якій кожен рівень виконує окрему функцію, але їх взаємодія забезпечує досягнення синергетичного ефекту. Такий підхід відповідає сучасній парадигмі цифрового управління складними системами та створює теоретико-методичне підґрунтя для подальшої розробки адаптивних мультиагентних моделей.

### **Висновки до 2-го розділу**

1. Сформовано методичний базис дослідження методів та моделей мультиагентного розподілу трудових ресурсів у девелоперських проєктах. Запропонована система поєднує універсальні наукові методи з інструментами мережевого моделювання, мультиагентного програмування та цифрової симуляції. Така інтеграція дозволяє формалізувати управлінські процеси девелоперського циклу, поєднуючи аналітику, цифрові технології та стратегічне управління. Створена аналітична платформа забезпечує узгодженість управлінських рішень і підвищує спроможність системи реагувати на зміни зовнішнього середовища.

2. Обґрунтовано підходи до оцінювання інноваційної спроможності підприємств-учасників як ключового чинника їх адаптивності. Розроблено інтеграційну модель нарощування інноваційного потенціалу, що охоплює технологічні, кадрові, інформаційні, організаційні, фінансові та культурні компоненти. Запропоновані моделі реактивної адаптації агентів відтворюють поведінку трудових ресурсів у змінному середовищі на основі нечіткої логіки та сценарного аналізу. Уведено концепцію стратегічно залежної реконфігурації ресурсів у часі, що створює підґрунтя для прогнозування адаптації до ринкових, технологічних і фінансових змін.

3. Обґрунтовано доцільність використання моделей реактивної адаптації агентів у динамічних і невизначених середовищах будівельного девелопменту. Показано, що такі моделі забезпечують швидку відповідь на зміну параметрів без потреби повного перепланування системи, підтримуючи її стійкість та локальну саморегуляцію. Сформовано уявлення про архітектуру

реактивного агента, яка включає сенсорні, оцінні та виконавчі підсистеми. Доведено ефективність застосування реактивної логіки в управлінні ресурсами, логістикою, 4D-BIM-календарями та цифровим контролінгом. Реактивна адаптація визначена як базовий механізм забезпечення гнучкості, автономності та безперервної підтримки працездатності девелоперських систем.

4. Систематизовано типи реакцій агентів за глибиною обробки сигналу, швидкістю реагування та здатністю до самоаналізу й навчання. Розкрито межі адаптивності агентних систем і показано залежність їх ефективності від інтенсивності зовнішніх змін і швидкості внутрішньої реакції. Обґрунтовано застосування реактивно-модульної архітектури, що дає можливість узгоджувати відповіді на багатофакторні збурення та зменшувати ризик «ефекту доміно» у великих проектах. Показано перспективність поєднання реактивних і прогностичних підходів для формування гібридних адаптивно-прогнозних систем управління. Отримані результати створюють методичну основу для розроблення інтелектуальних мультиагентних моделей у будівельному девелопменті.

Основні наукові результати по даному розділу опубліковані у працях [108, 111, 114, 115].

## **РОЗДІЛ 3. ПОБУДОВА АНАЛІТИЧНИХ І ПОВЕДІНКОВИХ МОДЕЛЕЙ РОЗПОДІЛУ РЕСУРСІВ В ІТ-ПРОЄКТАХ В УМОВАХ ЗМІННОЇ СКЛАДНОСТІ**

### **3.1. Розробка варіативних моделей мультиагентного розподілу із залученням нечіткої логіки, сценарного аналізу та теорії ймовірностей**

В умовах високої динамічності та невизначеності, котрі притаманні сучасним бізнес-середовищам, управлінці компаній стикаються з необхідністю приймати швидкі та обґрунтовані рішення, часто в умовах недостатньої або неточної інформації. Мультиагентні моделі стають потужним інструментом для ефективного управління в таких складних умовах, вони дозволяють моделювати взаємодії між численними автономними суб'єктами (агентами), котрі можуть бути як людьми, так і автоматизованими системами. Кожен агент в мультиагентній системі володіє власною інформацією, місією та стратегією, що дозволяє знизити навантаження на центральну систему управління та підвищити гнучкість і адаптивність організації.

Інноваційні підходи, як нечітка логіка, сценарний аналіз та ймовірнісні методи, є важливими інструментами для покращення точності та ефективності оцінки в таких складних системах. Нечітка логіка дозволяє моделювати невизначеність і неповну інформацію, що є невід'ємною частиною процесу прийняття рішень в реальних умовах бізнесу. Вона забезпечує здатність враховувати "м'які" фактори, які важко виміряти кількісно, як-от мотивацію співробітників або рівень задоволеності клієнтів. За допомогою нечіткої логіки можна створювати моделі, котрі більш точно відображають реальну ситуацію, в якій немає чітко визначених меж між різними станами, враховують складність і багатогранність бізнесових процесів.

Сценарний аналіз додає ще одну важливу складову до цих моделей. Він дозволяє прогнозувати розвиток ситуацій у різних варіантах, базуючись на різних припущеннях про майбутні події. Дозволяє підприємству підготуватися до можливих змін і швидко адаптувати свою стратегію в залежності від змінних умов зовнішнього середовища. Сценарний аналіз, в поєднанні з

ймовірнісними методами, дозволяє оцінити, які ймовірності виникнення певних подій і сценаріїв мають найбільший вплив на результат, і допомагає вибрати стратегію, яка максимально оптимізує очікувані вигоди.

Метою є розробка інтегрованої моделі мультиагентного розподілу, котра поєднує в собі всі ці інноваційні підходи. Модель дозволить більш точно та ефективно оцінювати вмотивованість агентів у стратегічному управлінні компанією. Вона дасть змогу врахувати всі фактори, від мотивації співробітників до ризиків і можливостей, що виникають в процесі взаємодії між агентами. Інтеграція нечіткої логіки, сценарного аналізу та ймовірнісних моделей в єдину систему дозволить компанії адаптуватися до змін в умовах невизначеності та забезпечить більш обґрунтовані та адаптивні стратегії для досягнення поставлених цілей [80].

Принципи агентних взаємодій в контексті мультиагентних систем лежать в основі побудови ефективних моделей для управління складними організаційними процесами. У таких системах агенти діють автономно, мають свої цілі, стратегічні плани та обмеження, і взаємодіють з іншими агентами в межах певної організаційної структури. Взаємодія між агентами може бути різноманітною — від простих комунікацій до складних кооперативних чи конкурентних стратегій. Задача полягає в тому, щоб забезпечити ефективну взаємодію між агентами, зберігаючи при цьому локальну автономію кожного з них.

Варіативність стратегій є важливим аспектом у мультиагентних системах, оскільки кожен агент має можливість обирати різні стратегії залежно від змінюваних умов середовища та взаємодії з іншими агентами. Середовище, в якому функціонують агенти, часто є динамічним і невизначеним, агенти повинні бути здатні адаптувати свої стратегії до нових умов. Варіативність стратегій дозволяє агенту вибрати найбільш оптимальний підхід залежно від ситуації, що виникає. У сфері управління проектами агент може змінити стратегію виконання завдання, якщо з'являються нові інформаційні або ресурсні обмеження.

Нечітка логіка є потужним інструментом для моделювання таких варіативних стратегій, оскільки дозволяє агентам діяти в умовах

невизначеності та неповної інформації. Нечітка логіка дозволяє агенту приймати рішення, не маючи точних числових значень для всіх параметрів, а лише оцінок або приблизних оцінок, що відповідають реальним умовам. Особливо важливо для таких бізнес-процесів, де точні величини не завжди доступні або вони змінюються швидко (наприклад, у будівництві, логістиці чи проектному управлінні). Нечітка логіка дозволяє змодельовати таку невизначеність через функції належності, які оцінюють, наскільки певний параметр належить до конкретної категорії або класу.

У контексті мультиагентних систем нечітка логіка дозволяє агентам визначати, як варіативність стратегій залежить від зміни умов середовища, включаючи такі фактори, як мотивація, зовнішні обмеження, доступні ресурси та взаємодія з іншими агентами. Замість того щоб діяти на основі точних і прогнозованих значень, агенти можуть використовувати нечіткі критерії, щоб оцінити ситуацію і вибрати стратегію, яка найкраще відповідає їхнім цілям в умовах невизначеності.

Для оцінки варіативності стратегії агента в умовах невизначеності, використовується функція належності, котра дозволяє агенту оцінити різні варіанти стратегій у контексті нечітких умов [99]. Базова оцінка варіативності агентів може бути подана як функція, що включає вагові коефіцієнти, які визначають важливість кожного параметра стратегії в процесі вибору:

$$V(a_i) = \sum_{j=1}^n (w_j \times \mu_j(x_j)), \quad (3.1)$$

де:  $V(a_i)$  - варіативність стратегії агента  $a_i$ ,  $w_j$  — ваговий коефіцієнт важливості параметра  $j$ ,  $\mu_j(x_j)$  — функція належності для параметра  $j$ , що описує ступінь належності  $x_j$  до категорії чи класу, що визначає стратегічний вибір.

Рисунок 3.1 ілюструє схему нечіткої логіки, яка використовується для моделювання варіативності стратегій агентів у середовищі невизначеності. На рисунку показано, як система належності оцінює різні параметри, що впливають на вибір стратегії агента. Через функції належності агент може визначити ступінь належності кожного параметра до конкретної категорії, що допомагає здійснити більш гнучкий і адаптивний вибір стратегії в умовах

змінюваних факторів середовища. Процес дозволяє агенту діяти в умовах неповної або нечіткої інформації, обираючи найбільш оптимальну стратегію для досягнення цілей.



Рисунок 3.1. Схема нечіткої логіки для варіативності агентів (система належності) (розроблено автором на основі [102])

Нечітка логіка дозволяє агентам у мультиагентних системах адаптувати свої стратегії в умовах невизначеності та неповної інформації. Вона дає можливість не лише кількісно оцінювати параметри, як-от ресурси або витрати, але й моделювати якісні фактори, як мотивація, ризики або інтуїція агентів. Фактори часто є суб'єктивними й не піддаються точному числовому вимірюванню, тому нечітка логіка забезпечує гнучкість у формулюванні і прийнятті рішень, враховуючи "м'які" аспекти, котрі мають значний вплив на поведінку агентів у змінному середовищі.

Для моделювання таких якісних параметрів, як мотивація або рівень ризику, використовуються функції належності, котрі відображають ступінь належності певного параметра до конкретної категорії. Мотивація може бути описана як ступінь "високої" або "низької" мотивації, а ризик — як "високий", "середній" чи "низький". Нечітка логіка дозволяє агенту оцінити, наскільки його поточний стан належить до кожної з цих категорій, і вибрати стратегію в залежності від ступеня належності кожного параметра до відповідної категорії.

Функція належності описує, наскільки певний рівень мотивації агента належить до категорії "висока" мотивація. Функція визначається на основі параметрів мотивації, як досягнення цілей, нагороди або зовнішні стимули [4].

$$\mu_{motivation}(x) = \frac{1}{1 + \frac{x-c^2}{\sigma}}, \quad (3.2)$$

де:  $x$  — значення параметра мотивації агента,  $c$  — центр функції належності (тобто значення, яке найкраще описує високу мотивацію),  $\sigma$  — стандартне відхилення, яке визначає ширину функції.

Нечіткий перехід між станами агентів описує зміну стратегії або поведінки в залежності від зміни середовища. Якщо агент, наприклад, змінює свою стратегію в залежності від того, чи знаходиться він у стані "низької" чи "високої" мотивації, то це можна моделювати за допомогою нечітких переходів, що враховують різні рівні належності до цих станів.

$$S(a_i) = \sum_{j=1}^n \mu_j(x_j), \quad (3.3)$$

де:  $S(a_i)$  — новий стан агента  $a_i$ ,  $\mu_j(x_j)$  — функція належності для параметра  $j$  агента,  $x_j$  — значення параметра  $j$  (наприклад, рівень мотивації або ризику).

Рисунок 3.2 ілюструє функції належності для нечітких параметрів, які використовуються агентами при виборі стратегії в умовах невизначеності. На рисунку представлені графіки, що демонструють ступінь належності різних параметрів, як мотивація чи ризик, до категорій "висока", "середня" та "низька". Функції належності дозволяють агентам оцінювати свою поточну ситуацію, враховуючи нечіткі, суб'єктивні критерії, і приймати рішення, адаптуючи свої стратегії відповідно до зміни умов середовища.

Сценарне управління є важливим інструментом для прогнозування можливих варіантів розвитку ситуацій у системах з агентами, де умови можуть змінюватися динамічно. Задача сценарного управління полягає в тому, щоб передбачити кілька різних варіантів майбутнього розвитку і на основі цього сформулювати стратегії для агентів, котрі дозволяють ефективно реагувати на зміни в середовищі.

У мультиагентних системах, де кожен агент діє автономно, важливо оцінювати не лише поточні умови, а й можливі зміни, що можуть виникнути в результаті взаємодії між агентами чи зміни зовнішнього середовища. У будівельних або бізнесових процесах, де кожен агент (підрядник, постачальник, інвестор) має власні цілі та стратегії, сценарне управління дозволяє визначити найбільш ймовірні варіанти розвитку подій, враховуючи різні чинники ризику, ресурсу або часу.

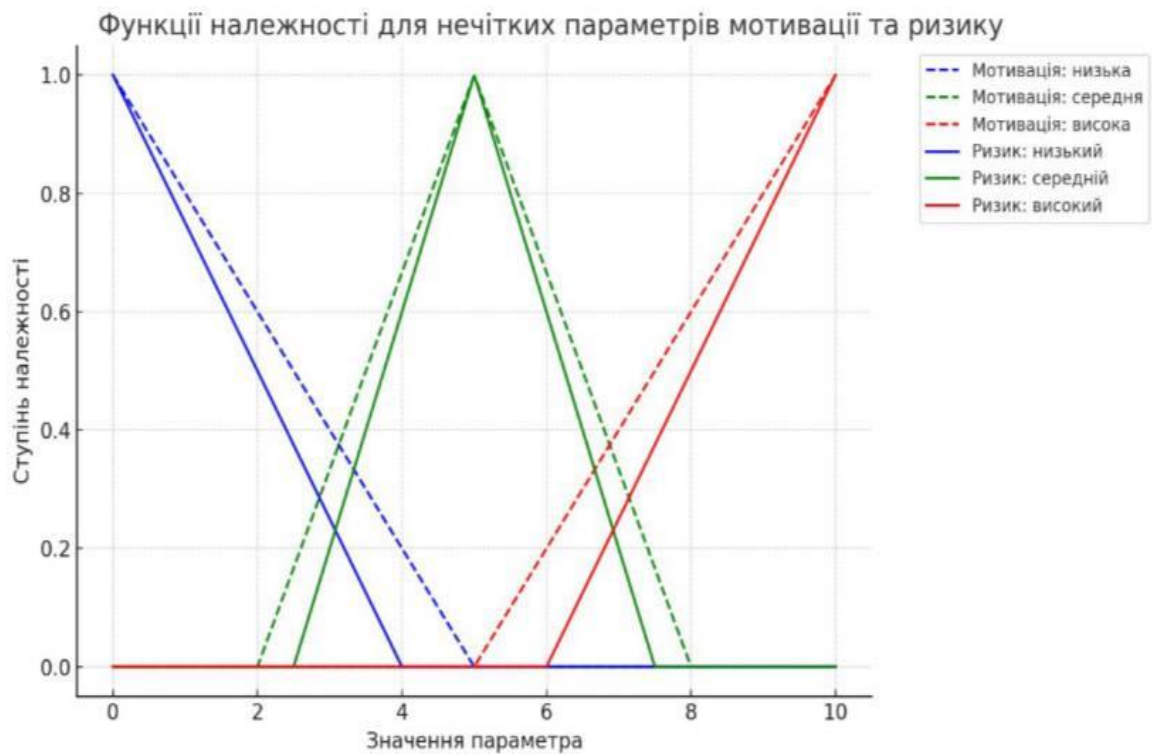


Рисунок 3.2. Функції належності нечітких параметрів для агентів (Джерело: розроблено автором на основі [78])

Сценарне управління допомагає зменшити невизначеність, прогнозуючи кілька варіантів майбутніх подій і створюючи стратегії, що максимально адаптовані до кожної з можливих ситуацій. Дозволяє агентам бути підготовленими до різних сценаріїв розвитку та швидко адаптувати свої стратегії до змін у навколишньому середовищі.

Оцінка ймовірностей для кожного агента в сценарному управлінні здійснюється за допомогою ймовірнісних функцій, котрі дозволяють визначити, з якою ймовірністю кожен сценарій може відбутися, враховуючи змінні фактори, ризики та стратегії взаємодії агентів. Дозволяє визначити оптимальний вибір стратегії для кожного агента в залежності від ймовірності кожного сценарію.

$$P(s_i | a_i) = \frac{P(a_i | s_i) \times P(s_i)}{P(a_i)}, \quad (3.4)$$

де:  $P(s_i | a_i)$  — ймовірність сценарію  $s_i$  для стратегії агента  $a_i$ ,  $P(a_i | s_i)$  — ймовірність того, що агент  $a_i$  вибере стратегію  $a_i$ , якщо відбудеться сценарій  $s_i$ ,  $P(s_i)$  — ймовірність виникнення сценарію  $s_i$ ,  $P(a_i)$  — ймовірність вибору стратегії  $a_i$  агентом.

Нижче наведений рисунок 3.3 демонструє діаграму сценаріїв поведінки агентів у змінному середовищі, котра ілюструє різні варіанти розвитку ситуацій, до яких агенти можуть адаптувати свої стратегії. Представлені можливі сценарії, що виникають внаслідок різних факторів, таких як зміни зовнішніх умов, ресурсу або ризиків. Кожен сценарій показує ймовірність того, як агент може змінити свою стратегію залежно від зміни параметрів середовища, що дає можливість агенту вибрати найбільш ефективну поведінку в конкретних умовах.

У мультиагентних системах, де агенти діють автономно і мають обмежену інформацію про навколишнє середовище або інших агентів, теорія ймовірностей є важливим інструментом для оцінки стратегій і прийняття рішень. Теорія ймовірностей дозволяє агентам оцінити різні варіанти стратегій з урахуванням невизначеності та неповної інформації, що є характерним для реальних умов. Вона дає змогу приймати оптимальні рішення, навіть коли агент має неповну або нечітку інформацію про майбутні події чи можливі стратегії інших агентів.

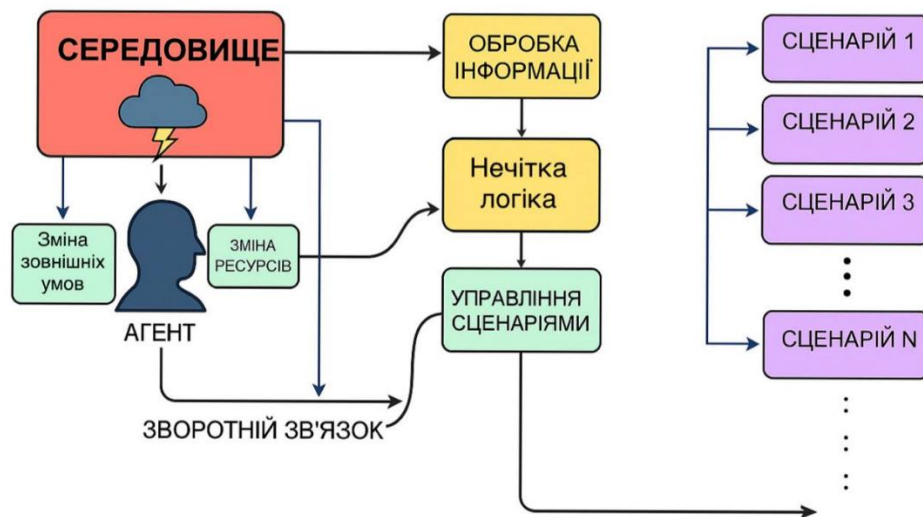


Рисунок 3.3. Діаграма сценаріїв поведінки агентів у змінному середовищі  
(Джерело: розроблено автором на основі [75])

Вибір оптимальної стратегії в умовах обмеженої інформації часто залежить від ймовірності успішного виконання кожної стратегії, враховуючи можливі ризики та невизначеності. Агент повинен оцінити ймовірність кожного можливого сценарію, що може виникнути внаслідок його дій, і

вибрати стратегію, котра максимально мінімізує ризики або максимізує вигоди в умовах цих ймовірностей.

Для оцінки ймовірності вибору стратегії агентом у мультиагентному середовищі використовують ймовірнісні функції. Вони описують, з якою ймовірністю агент вибирає певну стратегію в залежності від зовнішніх умов і ймовірності виникнення кожного сценарію.

$$P(a_i \rightarrow a_i) = \frac{P(a_i | s_j) \times P(s_j)}{P(a_i)}, \quad (3.5)$$

де:  $P(a_i \rightarrow a_i)$  — ймовірність того, що агент  $a_i$  вибере стратегію  $a_j$  в умовах сценарію  $s_j$ ,  $P(a_i | s_j)$  — ймовірність вибору стратегії  $a_i$  агента  $a_i$ , якщо відбудеться сценарій  $s_j$ ,  $P(s_j)$  — ймовірність виникнення сценарію  $s_j$ ,  $P(a_i)$  — ймовірність вибору стратегії  $a_i$  агентом  $a_i$ .

У більш складних ситуаціях, де агент може вибирати з кількох стратегій, теорія ймовірностей дозволяє оцінити, котра з можливих стратегій є оптимальною, враховуючи ймовірність кожної стратегії та її успішність у конкретному середовищі.

$$P_{opt} = \max(P(s_i | a_i)), \quad (3.6)$$

де:  $P_{opt}$  — ймовірність вибору оптимальної стратегії,  $(P(s_i | a_i))$  — ймовірність сценарію  $s_i$  для стратегії  $a_i$ ,  $\max(P(s_i | a_i))$  — максимальна ймовірність серед усіх варіантів стратегій.

Рисунок 3.4 демонструє граф ймовірнісних переходів між стратегічними станами агентів, що ілюструє, як агент може змінювати свою стратегію в залежності від ймовірності виникнення різних сценаріїв. Кожен вузол графа представляє можливий стратегічний стан агента, а стрілки між ними відображають ймовірнісні переходи, що залежать від змінних умов середовища та дій інших агентів. Граф допомагає зрозуміти, як ймовірності стратегічних виборів взаємодіють між собою, дозволяючи агентам приймати оптимальні рішення в умовах обмеженої інформації.

Створення інтегрованої моделі з нечіткою логікою, сценарним аналізом та ймовірнісними підходами дозволяє агентам приймати ефективні стратегічні

рішення в умовах високої невизначеності та змінного середовища. Кожен з підходів приносить свої переваги до загальної моделі.

Нечітка логіка допомагає моделювати та оцінювати якісні параметри, як мотивація, ризик, задоволеність, котрі не завжди можна чітко кількісно визначити. Сценарний аналіз дозволяє оцінити різні можливі варіанти розвитку ситуації, забезпечуючи агентів здатністю адаптувати свої стратегії до змін середовища.

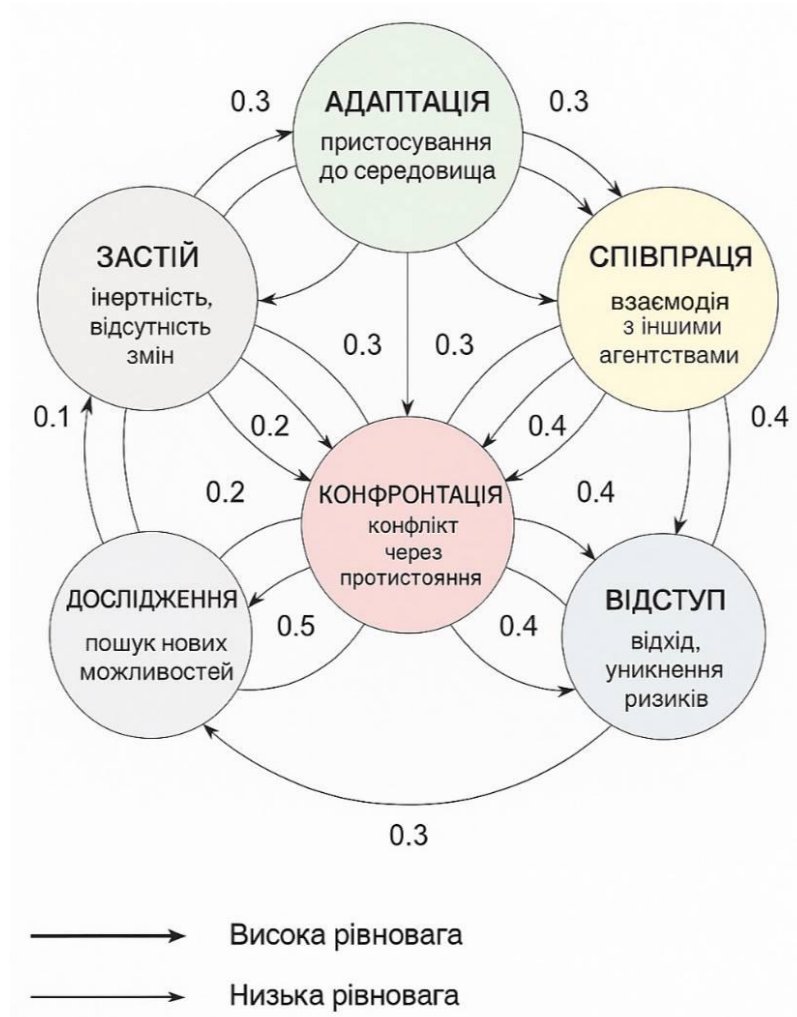


Рисунок 3.4. Граф ймовірнісних переходів між стратегічними станами агентів  
(Джерело: розроблено автором на основі [73])

Ймовірнісні підходи використовуються для вибору оптимальних стратегій на основі ймовірностей, що дає можливість агентам діяти з урахуванням невизначеності та змінних умов.

Поєднання підходів дозволяє створити більш гнучку та адаптивну модель, котра враховує визначені параметри, м'які фактори, як мотивація, або зовнішні впливи, наприклад, економічні чи соціальні фактори. Дозволяє

агентам більш точно оцінювати свої стратегії і приймати обґрунтовані рішення для досягнення поставлених цілей. Алгоритм, що інтегрує всі підходи, працює наступним чином: агент оцінює свою поточну ситуацію з використанням нечіткої логіки для параметрів, як мотивація та ризику. На основі сценарного аналізу він формує кілька можливих варіантів розвитку ситуації. Використовує ймовірнісні методи для вибору найбільш оптимальної стратегії, враховуючи ймовірності кожного сценарію. Всі фактори поєднуються в єдину модель, що дозволяє агенту вибрати стратегію, котра оптимізує його мотивацію та ефективність [66].

Інтегрована функція ефективності враховує всі параметри нечіткої логіки, сценарного аналізу та ймовірнісних підходів, поєднуючи їх у єдину оцінку для вибору стратегії агентом:

$$E(a_i) = \sum_{j=1}^n (w_j \times \mu_j(x_j) \times P(s_i | a_i)), \quad (3.7)$$

де:  $E(a_i)$  — інтегрована оцінка ефективності стратегії  $a_i$  для агента,  $w_j$  — ваговий коефіцієнт для параметра  $j$ ,  $\mu_j(x_j)$  — функція належності для параметра  $j$  (використовується нечітка логіка),  $P(s_i | a_i)$  — ймовірність сценарію  $s_i$  для стратегії  $a_i$ .

Рисунок 3.5 ілюструє блокову схему інтегрованої моделі, що поєднує нечітку логіку, ймовірнісний аналіз та сценарне управління. Схема демонструє, як три підходи взаємодіють між собою, дозволяючи агентам оцінювати різні варіанти розвитку ситуацій, обирати стратегії та оцінювати ефективність своїх рішень в умовах невизначеності. Кожен блок відповідає за обробку специфічних даних: нечітка логіка моделює м'які параметри, ймовірнісний аналіз оцінює варіанти сценаріїв, а сценарний аналіз допомагає формувати стратегії для подолання змінних умов середовища.

Інтегрована мультиагентна модель, поєднує нечітку логіку, сценарний аналіз та ймовірнісні підходи, може бути ефективно застосована для оцінки мотивації співробітників у контексті стратегічного управління компанією.

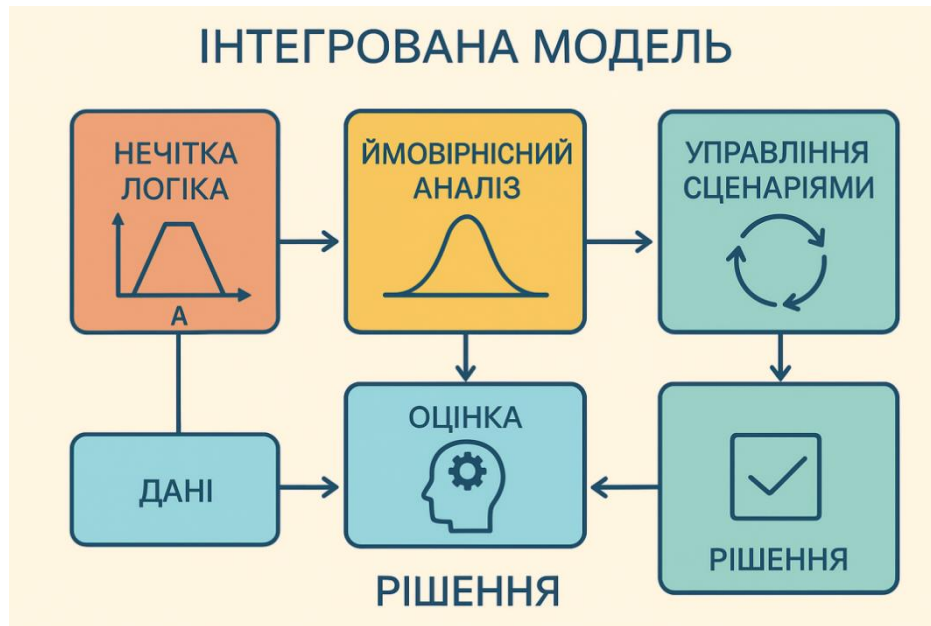


Рисунок 3.5. Блокова схема інтегрованої моделі з нечіткої логіки, ймовірнісного та сценарного аналізу (Джерело: розроблено автором на основі [94])

На прикладі міжнародних корпорацій, як Microsoft та Skanska, модель дозволяє враховувати кількісні та якісні параметри мотивації, включаючи рівень залученості працівників, ступінь задоволеності завданнями, вплив зовнішніх та внутрішніх стимулів, а також ризики, пов'язані з виконанням проєктів. Кожен агент у моделі може моделювати поведінку конкретного співробітника або команди, оцінюючи варіанти дій і оптимізуючи стратегію досягнення корпоративних цілей.

Застосування моделі дозволяє виявляти інноваційні аспекти в оцінці мотивації та управлінських рішень. Нечітка логіка забезпечує гнучке відображення суб'єктивних оцінок мотивації, а сценарний аналіз дозволяє прогнозувати, як зміни в умовах роботи або зовнішньому середовищі вплинуть на ефективність командних рішень. Ймовірнісні підходи дають змогу оцінювати ризики та ймовірності успіху різних стратегій, що допомагає керівництву приймати більш обґрунтовані та адаптивні рішення. У результаті компанії отримують інструмент для більш точної оцінки мотиваційної складової кадрового потенціалу, оптимізації розподілу ресурсів і підвищення ефективності управлінських рішень у складних і змінних умовах.

Рисунок 3.6 ілюструє практичне застосування інтегрованої моделі мультиагентного розподілу на основі кейсу з будівельного сектора.

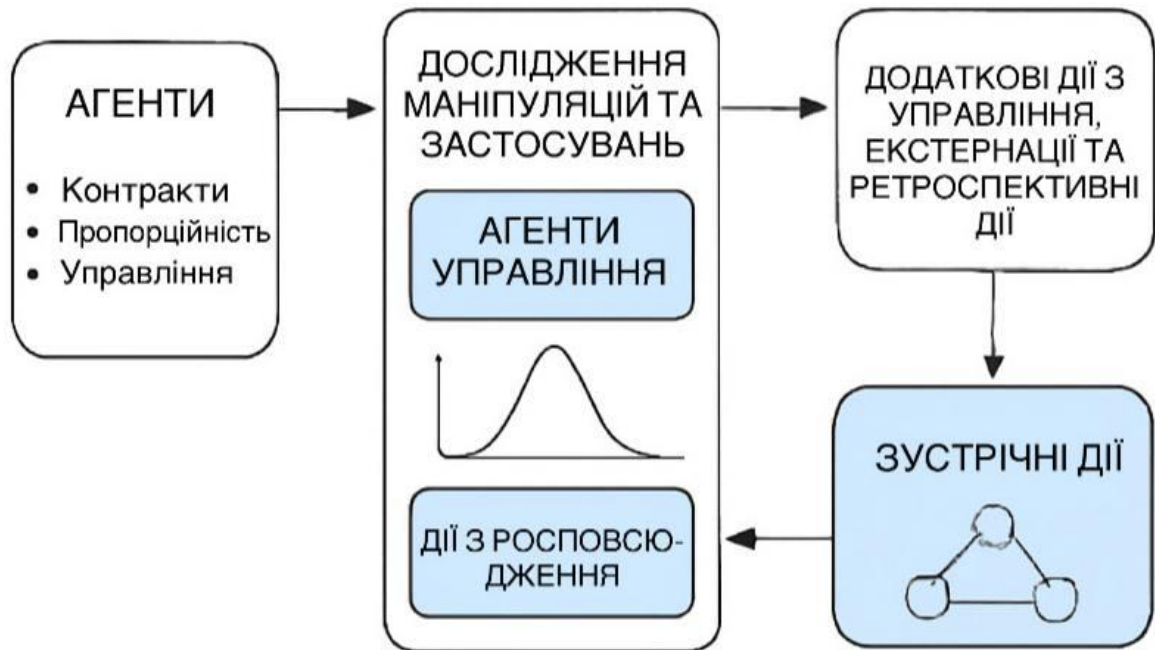


Рисунок 3.6. Практичне застосування на основі кейсу (Джерело: розроблено автором на основі [84])

На рисунку показано, як модель оцінює мотивацію та ефективність різних агентів (наприклад, підрядників, постачальників та управлінців) в умовах змінного середовища. Приклад демонструє, як нечітка логіка, сценарний аналіз та ймовірнісні підходи взаємодіють між собою для прийняття оптимальних управлінських рішень і ефективного розподілу ресурсів у реальному будівельному проєкті.

У межах дисертаційного дослідження запропоновано формалізовану модель мультиагентного управління трудовими ресурсами в умовах невизначеності, яка описує структуру, динаміку та критерії ефективності функціонування системи.

Модель базується на представленні трудових ресурсів у вигляді множини агентів  $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$

Кожен агент  $a_i$  характеризується вектором стану  $s_i = (x_i, \theta_i, c_i)$

де  $x_i$ — вектор компетенцій агента;

$\theta_i$ — продуктивність;

$c_i$ — адаптивність.

Динаміка зміни стану агента в часі визначається функцією переходу:

$$s_i(t+1) = F_i(s_i(t), \xi(t))$$

де  $F_i$  — функція адаптації агента;  $\xi(t)$  — зовнішні впливи (зміни середовища, навантаження, ризику).

Розподіл трудових ресурсів у системі формалізується як задача оптимізації по формулі (2.3.).

де  $f_i$  — показники ефективності використання ресурсів;

$w_i$  — вагові коефіцієнти;

$R$  — інтегральний ризик;

$\lambda$  — коефіцієнт урахування ризику.

Обмеження задачі враховують:

- ресурсні обмеження;
- часові параметри виконання робіт;
- компетентнісну відповідність агентів завданням;
- організаційні обмеження середовища.

Таким чином, запропонована модель описує мультиагентну систему як динамічну структуру, в якій відбувається адаптивна взаємодія агентів із метою оптимального розподілу трудових ресурсів у середовищі невизначеності.

Запропонована формалізована модель мультиагентного управління трудовими ресурсами відрізняється від існуючих підходів тим, що вперше забезпечує інтеграцію параметричного опису трудових ресурсів, динамічної адаптації агентів та багатокритеріальної оцінки ефективності в єдиному аналітичному контурі.

На відміну від традиційних моделей управління трудовими ресурсами, що базуються на статичних або централізованих принципах розподілу, у запропонованій моделі реалізовано децентралізований мультиагентний підхід, у якому кожен агент розглядається як автономна одиниця з власними характеристиками, поведінковими параметрами та здатністю до адаптації. Це дозволяє враховувати індивідуальні властивості трудових ресурсів, їхню динаміку та взаємодію в умовах змінного середовища.

Наукова новизна моделі полягає у наступному:

- вперше формалізовано трудові ресурси як множину цифрових агентів із векторним описом стану, що включає компетентнісні, продуктивні та адаптивні характеристики;
- запропоновано функцію динамічної адаптації агентів, яка дозволяє моделювати зміну їхнього стану під впливом зовнішніх факторів та внутрішніх механізмів навчання;
- розроблено інтегровану функцію ефективності, яка поєднує показники результативності та ризику, забезпечуючи багатокритеріальну оптимізацію розподілу ресурсів;
- забезпечено узгодження індивідуальної поведінки агентів із глобальними цілями системи через механізм балансування автономності та цілісності.

Запропонована модель також розширює наукові підходи до управління трудовими ресурсами шляхом врахування невизначеності середовища через введення зовнішніх впливів  $\xi(t)$ , що дозволяє реалізувати сценарний та ймовірнісний характер прийняття рішень.

Практичне значення моделі полягає у можливості її використання як аналітичного ядра інтелектуалізованих систем управління трудовими ресурсами, інтегрованих із цифровими платформами BIM, ERP та PLM. Це забезпечує підвищення ефективності розподілу ресурсів, адаптивності управлінських рішень та стійкості будівельних девелоперських проєктів в умовах динамічної невизначеності.

Таким чином, розроблена модель формує теоретико-методичне підґрунтя для переходу до нового класу систем управління трудовими ресурсами — мультиагентних, адаптивних та інтегрованих у цифрове середовище.

### **3.2. Алгоритмічне забезпечення самонавчання агентів і вибору стратегій взаємодії в умовах обмеженого доступу до інформації**

Інтеграція алгоритмів самонавчання у роботу агентів Skanska суттєво змінила їхню поведінкову модель і стратегічні підходи до прийняття рішень. Якщо раніше агенти діяли переважно за фіксованими інструкціями й реагували на проблеми постфактум, то тепер завдяки підкріплювальному навчанню вони навчилися прогнозувати наслідки своїх дій та оперативно адаптуватися до змін. Проявилось у здатності не лише швидко обирати найбільш ефективні варіанти дій серед кількох можливих, але й будувати довгострокові стратегії, котрі враховують можливі ризики та зміни середовища. Поведінка агентів стала менш реактивною й більш проактивною: вони не очікують на кризові ситуації, а завчасно коригують свої дії, щоб зменшити ймовірність їх виникнення.

Важливим результатом цього процесу стало скорочення ризиків, що особливо помітно у таких сферах, як логістика та ресурсне планування. Система дозволяє передбачати затримки постачання чи перевитрати бюджету, формуючи альтернативні сценарії розвитку подій. Завдяки цьому агенти отримують змогу знижувати невизначеність у власних діях і зменшувати кількість критичних відхилень. Оптимізація ресурсів проявляється у більш рівномірному їх розподілі: замість перевантаження одних підрядників чи відділів і недозавантаження інших, система пропонує баланс, котрий підвищує продуктивність усього проекту. Крім того, завдяки аналітичним панелям, що відображають результати навчання агентів, керівництво має змогу в реальному часі бачити ключові показники ефективності. Дозволило суттєво підвищити КРІ компанії: швидкість виконання завдань зросла, кількість помилок зменшилася, а використання ресурсів стало більш економним і результативним.

Результати створюють передумови для наступного етапу – інтеграції алгоритмічних моделей у корпоративні платформи управління. Завдяки масштабуванню рішень, відпрацьованих у середовищі окремих агентів, компанія може побудувати комплексну мультиагентну систему управління, де

результати самонавчання окремих виконавців інтегруються на рівні організаційної структури. Дозволяє створити цілісне цифрове середовище, у якому управлінські рішення ґрунтуються не лише на історичних даних, а й на постійному оновленні поведінкових стратегій, прогнозних моделей та КРІ-аналітики. Саме це забезпечує плавний перехід від локальних прикладних рішень до інтегрованої управлінської платформи, котра охоплює всі рівні корпоративного управління Skanska.

Необхідність прикладного інструментарію для реалізації моделі, обумовлена тим, що теоретичні положення, побудовані на основі нечіткої логіки, сценарного аналізу та ймовірнісних методів, потребують практичної перевірки на конкретних прикладах. Було створено базову інтегровану модель, котра демонструє, як агенти можуть адаптувати свої стратегії в умовах невизначеності. Проте, без інструментарію, здатного обробляти дані в реальному часі, навчатися на основі досвіду та забезпечувати зворотний зв'язок, модель залишиться лише теоретичною конструкцією. Прикладний інструментарій дозволяє здійснювати практичні розрахунки, верифікувати роботу системи, оцінювати її ефективність у реальних бізнесових і технічних умовах, що особливо важливо для масштабних будівельних компаній.

Специфіка роботи агентів у компанії Skanska чітко демонструє важливість таких інструментів. У проектах цього рівня кожен агент, будь то інженер, постачальник або підрядник, має доступ лише до частини інформації, яка стосується його безпосередніх завдань. Повної картини процесів не знає жоден окремий учасник. Створює ситуацію неповної інформації, де прийняття рішень ускладнене обмеженням часу, постійними змінами умов і високим рівнем ризиків. У таких умовах класичні централізовані підходи швидко втрачають ефективність, тоді як агенти, оснащені алгоритмами самонавчання, здатні адаптуватися, оновлювати свої стратегії й оптимізувати рішення навіть при мінімальному наборі даних. Прикладний інструментарій стає ключовим елементом, що з'єднує теоретичну модель і реальні практики управління складними будівельними проектами, забезпечуючи Skanska можливість підвищувати ефективність, зменшувати кількість помилок і швидше реагувати на виклики середовища [107].

Основою прикладного інструментарію, котрий забезпечує практичне функціонування розробленої моделі, є сукупність взаємопов'язаних підсистем. До них належать алгоритми самонавчання, модулі вибору стратегій та аналітичні панелі, що у комплексі формують цілісну архітектуру адаптивного управління. Кожна з цих підсистем виконує власну роль, однак найбільшої ефективності вони досягають саме у взаємодії між собою. Алгоритми самонавчання виконують завдання адаптації агентів до змінного середовища, вони забезпечують здатність до корекції власних дій на основі досвіду та зворотного зв'язку. Для Skanska означає, що інженери, постачальники й менеджери можуть оперативнo перебудовувати свою поведінку, коли з'являються нові ризики чи зовнішні обмеження, наприклад затримки з постачанням матеріалів або необхідність термінового коригування графіків. Система підкріплювального навчання, що є ядром алгоритмів, дозволяє поступово набувати знання на основі отриманих винагород або втрат, тобто кожна дія агента в оцінюваному середовищі формує досвід, який визначає наступні рішення. Процес навчання перетворюється на безперервний цикл, де агенти вдосконалюють свої стратегії за рахунок повторюваних взаємодій із середовищем.

Модулі вибору стратегій становлять наступний важливий компонент інструментарію. Вони відповідають за формалізацію та відбір варіантів дій, що є доступними для агентів у кожному конкретному сценарії. В умовах Skanska проявляється у тому, що модулі аналізують наявні ресурси, часові обмеження й ризики, після чого пропонують набір можливих стратегій. Агенти мають змогу обирати ті, котрі дають найвищий прогнозований результат у коротко- чи довгостроковій перспективі. Механізм дозволяє уникати хаотичних або інтуїтивних рішень і створює систему, в якій вибір обґрунтований на базі об'єктивних критеріїв, навіть якщо інформація неповна. Особливістю модулів є врахування ймовірнісної природи подій, завдяки чому стратегія не зводиться до єдиного правильного рішення, а розподіляється між декількома сценаріями, які згодом перевіряються у процесі взаємодії з середовищем.

Аналітичні панелі формують завершальний елемент підсистеми, інтегруючи дані, що надходять від агентів, та перетворюючи їх на зрозумілі

візуальні індикатори. Для керівництва Skanska означає можливість бачити в режимі реального часу зміни у ключових показниках ефективності, моніторити динаміку виконання завдань і своєчасно реагувати на відхилення. Панелі відображають інтегровані дані щодо продуктивності агентів, рівня використання ресурсів, дотримання графіків і ризиків. Вони стають інструментом контролю, механізмом для прогнозування подальших змін, оскільки на основі даних самонавчання можна будувати трендові криві та сценарні прогнози. Аналітичні панелі завершують цикл взаємодії, де алгоритми генерують дії, модулі визначають стратегії, а панелі забезпечують зворотний зв'язок і систематизацію результатів.



Рисунок 3.7. Схема принципу самонавчання агента (адаптованого до будівельних процесів Skanska) (Джерело: розроблено автором)

Візуалізація процесу самонавчання має важливе значення, дозволяє зрозуміти логіку функціонування агентів у межах складного будівельного середовища. На основі адаптації до прикладу Skanska була розроблена схема, що демонструє, як агент у процесі підкріплювального навчання взаємодіє із середовищем. Середовище може виступати у вигляді будівельного майданчика, ланцюга постачань або проектної команди, а агентом є конкретний виконавець чи підрозділ. Кожна дія агента викликає реакцію

середовища, котра оцінюється у вигляді винагороди або штрафу, і саме цей результат визначає подальшу поведінку агента [79].

У адаптації до Skanska схема показує, як цифрові модулі підкріплювального навчання дозволяють будівельним командам поступово вдосконалювати власні рішення, орієнтуючись на зниження затримок, підвищення ефективності ресурсів і досягнення оптимальних показників. Вона служить не лише ілюстрацією алгоритмічних принципів, а й базовим елементом прикладного інструментарію, що пояснює, яким чином компанія може інтегрувати інноваційні методи самонавчання у щоденну практику управління.

Інтегрована модель оцінки ефективності ґрунтувалася на формулі, котра враховує багатофакторність середовища, зокрема ризики, ймовірності сценаріїв і вагові коефіцієнти параметрів. Для прикладного застосування у компанії Skanska можна продемонструвати, як формула працює у трьох різних сценаріях: затримка постачання матеріалів, перевитрати бюджету та адаптація інноваційної технології.

Базова інтегрована функція ефективності описується у вигляді:

$$E_{int} = \sum_{j=1}^m w_j \times \mu_j(x) P(S_j), \quad (3.8)$$

де:  $E_{int}$  – інтегрована оцінка ефективності стратегії агента,  $w_j$  – ваговий коефіцієнт параметра,  $\mu_j(x)$  – функція належності для параметра  $j$ ,  $P(S_j)$  – ймовірність сценарію  $S_j$ .

Для того щоб деталізувати розрахунки, розглядають додаткові формалізації. У випадку затримки постачання матеріалів стратегія агента оцінюється з урахуванням часу простою, обсягу дефіциту та ваги впливу на критичний шлях проєкту. Можна застосувати допоміжну функцію:

$$E_{delay} = \frac{R_t \times w_t}{1 + \alpha \times D_t}, \quad (3.9)$$

де:  $R_t$  – ресурсний потенціал на кроці  $t$ ,  $w_t$  – ваговий коефіцієнт важливості цього ресурсу,  $\alpha$  – коефіцієнт впливу затримки,  $D_t$  – тривалість затримки.

У сценарії перевитрат бюджету доцільно врахувати баланс між витратами та прогнозованою вигодою. Можна представити як:

$$E_{budget} = \frac{B_{plan}}{B_{fact}} \times \gamma, \quad (3.10)$$

де:  $B_{plan}$  – планові витрати,  $B_{fact}$  – фактичні витрати,  $\gamma$  – коефіцієнт фінансової стійкості.

Третій сценарій – адаптація інноваційної технології – відображає здатність агентів інтегрувати нові інструменти у виробничий процес.

$$E_{innov} = \theta \times \frac{Q_{new}}{Q_{old} + Q_{new}}, \quad (3.11)$$

де:  $Q_{new}$  – кількість завдань, виконаних за допомогою нової технології,  $Q_{old}$  – кількість завдань у традиційному режимі,  $\theta$  – коефіцієнт адаптивності агента.

Інтегрований підхід полягає у тому, що всі три сценарії оцінюються одночасно, і загальний показник розраховується через суму їхніх часткових результатів, зважених на ймовірність настання кожного випадку:

$$E_{total} = P_1 \times E_{delay} + P_2 \times E_{budget} + P_3 \times E_{innov}, \quad (3.12)$$

де:  $P_1, P_2, P_3$  – ймовірності відповідних сценаріїв.

У випадку компанії Skanska, якщо ймовірність затримки постачання оцінюється як 0,3, перевитрати бюджету – 0,2, а адаптація нової технології – 0,5, то розрахунок покаже, який зі сценаріїв найбільше впливає на ефективність і яку стратегію слід прийняти. Підхід дозволяє на основі числових даних підтвердити гіпотезу про перевагу інноваційних технологій навіть в умовах обмеженої інформації, оскільки інтегрована функція демонструє вищі результати при збільшенні частки  $E_{innov}$ .

Нижче подано приклад прикладного застосування інтегрованої функції ефективності для трьох типових сценаріїв у Skanska. Інтегрована оцінка стратегії агента розраховується за формулою, а часткові індикатори для сценаріїв затримок, перевитрат і впровадження інновацій — за допоміжних співвідношень. Параметри нормовано в інтервалі [0;1], ймовірності сценаріїв прийнято як  $P_1=0,3$  (затримка постачання),  $P_2=0,2$  (перевитрати бюджету),  $P_3=0,5$  (адаптація інновації), що відбиває емпіричну вагомість ризиків у портфелі проєктів. Використовуються вище наведені формули.

Таблиця 3.1 демонструє порівняння трьох альтернативних стратегій агентів у Skanska: реактивної базової, збалансованої з мітигацією затримок та

проінноваційної. Для кожної стратегії подано нормовані часткові показники за трьома сценаріями та інтегральний результат  $E_{total}$ , розрахований за формулою з урахуванням імовірностей сценаріїв. Дозволяє обґрунтовано порівняти, яка конфігурація дій забезпечує найвищу очікувану ефективність у умовах неповної інформації.

Таблиця 3.1

**Розрахунок інтегрованої ефективності стратегій агентів у Skanska за різними сценаріями**

Стратегія	Пара-метри сценарію (узагальнено)	$E_{delay}$	$E_{budget}$	$E_{innow}$	$E_{total}$
<i>А. Реактивна (базова)</i>	$R_t = 1,0, w_t = 0,8, \alpha$ $= 0,2, D$ $= 6; B_{plan}$ $/B_{fact}$ $= 10/11,8, \gamma$ $= 0,85; \theta$ $= 0,9, \theta$ $= 0,364$	0,364	0,720	0,315	0,414
<i>В. Збалансована (мітигація затримок)</i>	$R_t = 1,0, w_t = 0,9, \alpha$ $= 0,15, D$ $= 5; B_{plan}$ $/B_{fact}$ $= 10/11,2, \gamma$ $= 0,9; \theta$ $= 1,1, \theta$ $= 0,50$	0,514	0,804	0,550	0,590
<i>С. Проінноваційна (пілот+масштабування)</i>	$R_t = 1,0, w_t = 0,95, \alpha$ $= 0,12, D$ $= 4; B_{plan}$ $/B_{fact}$ $= 10/10,8, \gamma$ $= 0,92; \theta$ $= 1,25, \theta$ $= 0,70$	0,642	0,852	0,875	0,800

На основі даних таблиці 3.1 формується візуалізація, котра відображає ймовірність вибору відповідних стратегій агентами Skanska в різних сценаріях. Рисунок 3.8 демонструє, як зростання очікуваної ефективності за рахунок інноваційної адаптації зміщує вибір агентів від реактивної моделі до проінноваційної, причому чутливість вибору до затримок постачання і

бюджетних перевитрат знижується в міру підвищення частки успішно імплементованих технологій. Графік дозволяє швидко і наочно зіставити, за яких умов імовірність прийняття інноваційної стратегії стає домінантною, що важливо для планування поетапного масштабування рішень у портфелі проєктів.

У практичній діяльності компанії Skanska алгоритми самонавчання впроваджуються у роботу різних груп агентів таким чином, щоб кожна з них отримувала можливість адаптувати власні стратегії до змінних умов. Для підрядників інтеграція полягає у застосуванні алгоритмів для планування виконання робіт і координації із суміжними командами. Наприклад, у випадку затримки постачання матеріалів система автоматично пропонує альтернативні сценарії виконання завдань, щоб знизити простоті і уникнути конфліктів між бригадами. Алгоритм аналізує історичні дані та формує пропозиції щодо перерозподілу ресурсів, дозволяючи підрядникам гнучкіше реагувати на нестабільні фактори.

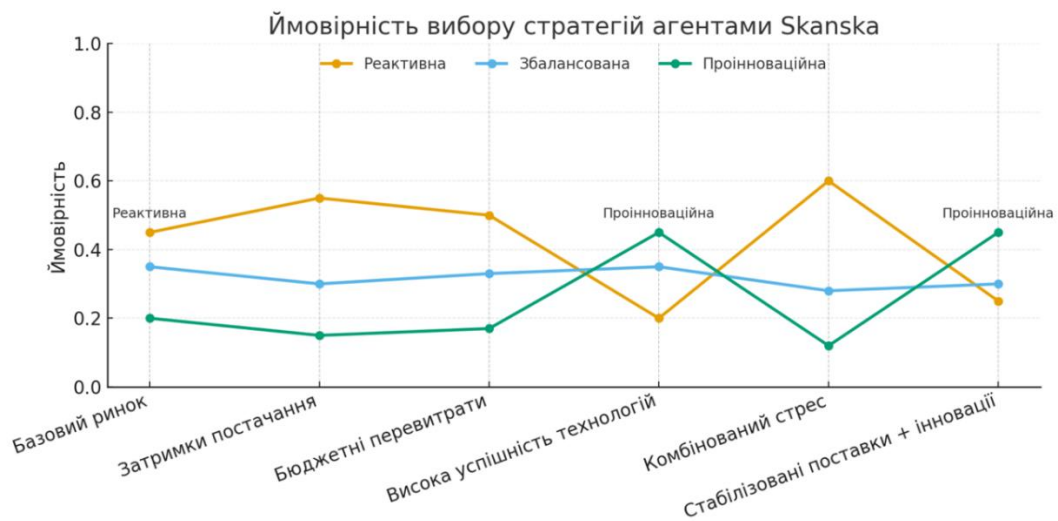


Рисунок 3.8. Графік ймовірності вибору стратегій агентами компанії Skanska при різних сценаріях

Для проєктних менеджерів алгоритми стають інструментом підвищення прозорості та якості прийняття рішень. Керівники отримують доступ до аналітичних панелей, котрі демонструють динаміку ключових показників, у тому числі продуктивності підрядників, рівня використання ресурсів та ризиків. Завдяки цьому вони не лише бачать поточний стан, але й отримують прогноз щодо можливих сценаріїв, що дозволяє ухвалювати рішення

превентивно, а не реактивно. Змінює характер управління: від централізованого й повільного – до децентралізованого й адаптивного.

Для постачальників інтеграція алгоритмів самонавчання означає створення умов для більш точного й швидкого планування логістики. Система дозволяє враховувати не лише поточні графіки поставок, але й можливі ризики їх зміни. У результаті постачальники отримують змогу коригувати маршрути, адаптувати обсяги та синхронізуватися із загальним планом робіт у режимі реального часу. Мінімізує ймовірність виникнення критичних вузьких місць у ланцюзі постачання, котрі часто стають головною причиною затримок у будівельних проєктах [89].

У порівнянні «до» і «після» інтеграції алгоритмів самонавчання різниця проявляється досить виразно. До впровадження система управління у Skanska була орієнтована на централізоване прийняття рішень із використанням частково застарілих даних, що не дозволяло вчасно реагувати на зміни у середовищі. У результаті спостерігалися часті затримки, низька продуктивність команд та перевитрати ресурсів. Після інтеграції алгоритмів підрядники отримали змогу швидко коригувати графіки робіт, проєктні менеджери почали використовувати прогнозні аналітичні панелі, а постачальники синхронізували логістику з потребами будівельних майданчиків. Знизило кількість простоїв і забезпечило більш рівномірне використання ресурсів, водночас підвищивши загальний рівень ефективності.

Рисунок 3.9 демонструє порівняння ключових показників «до» та «після» впровадження алгоритмів самонавчання у компанії Skanska. На візуалізації відображено, як завдяки інноваційним методам зменшилася кількість затримок у виконанні робіт і одночасно зростає ефективність використання ресурсів та продуктивність команд. Дозволяє наочно оцінити вплив інтеграції цифрових інструментів на практику управління та підтверджує доцільність подальшого масштабування таких рішень.

Аналітична панель, котра створюється для візуалізації результатів роботи агентів компанії Skanska, виступає центральним елементом у системі прикладного інструментарію. Вона об'єднує дані, отримані з алгоритмів самонавчання, модулів вибору стратегій та середовища будівельного проєкту,

і перетворює їх на зручний набір ключових показників ефективності. У такий спосіб менеджери та керівники отримують не лише узагальнене уявлення про стан процесів, але й деталізовану картину за кожним напрямом – від динаміки продуктивності підрядників до оцінки ресурсного завантаження та рівня ризиків [105].

Особливість адаптованої панелі для Skanska полягає у тому, що вона враховує як традиційні KPI (наприклад, дотримання графіків, відсоток виконаних завдань, рівень використання матеріальних ресурсів), так і нові індикатори, безпосередньо пов'язані з алгоритмічним самонавчанням. Серед них можна виділити індекс адаптивності агентів, що показує, наскільки швидко вони змінюють стратегії у відповідь на нові фактори, та показник ефективності інновацій, котрий відображає частку завдань, виконаних із застосуванням нових технологій. Включення параметрів робить дашборд не просто інструментом контролю, а повноцінною платформою підтримки рішень.

Завдяки інтеграції даних у режимі реального часу аналітична панель дозволяє своєчасно виявляти проблемні ділянки, моделювати сценарії розвитку та прогнозувати наслідки управлінських рішень. Вона надає можливість порівнювати стан «до» та «після» впровадження алгоритмів, що робить її важливим елементом оцінки результативності нововведень. Підтвердження ефективності прикладного інструментарію, що був розроблений на основі інтегрованих моделей і застосований до реалій компанії Skanska, виявляється у конкретних кількісних та якісних результатах, котрі можна зафіксувати після впровадження алгоритмів самонавчання й модулів вибору стратегій. Найбільш очевидним доказом є зменшення кількості затримок у виконанні проєктів, що стало можливим завдяки здатності агентів прогнозувати розвиток подій та завчасно змінювати свої стратегії. Якщо у традиційних умовах проблеми у ланцюгах постачання чи перевитрати бюджету часто призводили до значних відхилень від плану, то після інтеграції прикладного інструментарію ці ризики стали більш контрольованими. Система навчилася фіксувати факт відхилення, оцінювати його ймовірність ще

до виникнення критичної ситуації, що дозволило знизити рівень турбулентності у виконанні будівельних і цифрових проєктів.



Рисунок 3.9. Графік порівняння показників «до/після» впровадження алгоритмів самонавчання у Scanska

У випадку Skanska означає, що керівництво може спостерігати, як поступово скорочується кількість затримок, підвищується стабільність командної роботи та зростає продуктивність.

Ефективність інструментарію також підтверджується у сфері ресурсного менеджменту. Агенти, озброєні алгоритмами підкріплювального навчання, стали здатними приймати рішення виходячи з локальної інформації, враховуючи прогнозні дані, що формуються з усього середовища. Дало змогу уникати нераціонального використання ресурсів, збалансувати завантаження підрядників і підвищити ефективність комунікації між учасниками проєкту. Раніше ресурси могли концентруватися у кількох напрямках із перевантаженням окремих підрозділів і простоем інших, що створювало асиметрію. Після впровадження аналітичних модулів і самонавчання агенти синхронізували свої дії, у результаті чого підвищилась узгодженість і зроста швидкість виконання завдань. Дозволило компанії досягнути стабільного

підвищення ключових показників ефективності без додаткового залучення значних фінансових чи людських ресурсів.



Рисунок 3.10. Аналітична панель візуалізації результатів роботи агентів Skanska

Роль алгоритмів у підвищенні гнучкості та адаптивності системи управління складно переоцінити, адже вони дозволяють будувати динамічні стратегії в умовах постійної невизначеності. Будівельна галузь завжди характеризується великою кількістю зовнішніх чинників – від коливань ринкових цін і логістичних ризиків до погодних умов і регуляторних змін. Алгоритми самонавчання дозволяють трансформувати цю невизначеність із загрози у керований параметр, адже система не боїться змін, а пристосовується до них у процесі безперервної оптимізації. Створює гнучку систему управління, яка замість статичного слідування за планом формує адаптивні стратегії з урахуванням нових обставин. Алгоритмічне підґрунтя забезпечує не лише швидкість реакції, а й випереджувальну дію, оскільки агенти вчаться прогнозувати ризики ще до того, як вони втіляться у конкретні проблеми.

Важливо й те, що завдяки алгоритмам самонавчання система управління Skanska набула нової якості прозорості. Аналітичні панелі, побудовані на даних агентів, відображають результати в реальному часі, а також дозволяють керівництву бачити тренди й сценарні прогнози. Зміцнило довіру до цифрових інструментів, сформувало культуру прийняття управлінських рішень на основі даних. Прикладний інструментарій виконує роль не лише технологічної

надбудови, а й механізму трансформації управлінської культури компанії, переводячи її на рівень цифрової зрілості [91].

Ефективність прикладного інструментарію підтверджується як кількісними показниками – зниженням ризиків, скороченням простоїв, підвищенням КРІ, – так і якісними змінами в організаційній поведінці. Алгоритми самонавчання стали ключовим чинником формування гнучкої та адаптивної системи управління, яка здатна функціонувати у високоризиковому й динамічному середовищі, перетворюючи невизначеність на ресурс для розвитку та оптимізації. Дана властивість робить їх стратегічно важливим елементом для подальшої інтеграції у корпоративні платформи, що стане наступним логічним кроком у розбудові цілісної цифрової екосистеми управління в Skanska.

### **3.3. Інтеграція мультиагентних моделей в системи підтримки прийняття рішень управлінського рівня для ІТ-проектів різної складності**

Інтеграція мультиагентних моделей та алгоритмів самонавчання у цифрові системи управління будівельними проектами є необхідним кроком для підвищення ефективності та адаптивності сучасних компаній, як Skanska, котрі працюють у складних, динамічних і високоризикових умовах будівництва. У таких проектах одночасно задіяні численні підрядники, постачальники, інженерні команди та управлінські підрозділи, кожен з яких має власні завдання, обмежену інформацію та різний рівень впливу на загальний процес. Традиційні централізовані системи управління часто не можуть оперативно реагувати на зміни в реальному часі або враховувати неповні дані, що призводить до зниження ефективності, помилок у розподілі ресурсів та затримок у виконанні проектів. Мультиагентні моделі дозволяють симулювати поведінку кожного окремого агента або групи агентів у системі, моделюючи їхні взаємодії, конфлікти і співпрацю, що забезпечує більш точне прогнозування та оптимізацію процесів.

Алгоритми самонавчання додають цьому процесу ще один рівень інтелекту, дозволяючи агентам не лише виконувати задані сценарії, а й

адаптуватися на основі зворотного зв'язку від середовища і результатів попередніх дій. Завдяки цьому агенти можуть коригувати свої стратегії у реальному часі, підлаштовуючись під змінні умови, як затримки постачання матеріалів, зміни в бюджеті, погодні умови або зміни нормативних вимог. Робить систему гнучкою та здатною до самостійної оптимізації, що критично важливо для будівельних проєктів високої складності, де будь-яка затримка або невірне рішення може мати значні фінансові та часові наслідки.

Демонстрація результатів «до» та «після» впровадження інноваційних алгоритмів є ключовим інструментом для оцінки ефективності цих рішень. Вона дозволяє наочно показати, як зміни у мультиагентній системі та алгоритмах самонавчання вплинули на продуктивність агентів, розподіл ресурсів, швидкість прийняття рішень та загальну ефективність IT-проєктів. Порівняння стану системи до впровадження і після нього дає можливість оцінити реальний вплив інновацій, виявити сильні та слабкі сторони, а також визначити, які додаткові фактори або модулі можуть бути інтегровані для подальшого підвищення ефективності [85].

Мета полягає у тому, щоб показати, як результати впливають на управлінські рішення та оптимізацію IT-проєктів у Skanska. Включає демонстрацію того, як інтегровані моделі дозволяють агентам оцінювати свої стратегії, взаємодіяти один з одним і з системою управління, адаптуватися до нових факторів та приймати обґрунтовані рішення на всіх рівнях управлінської ієрархії. Підхід забезпечує комплексну оцінку ефективності роботи компанії, дозволяє прогнозувати ризики, підвищує прозорість управлінських процесів і формує підґрунтя для впровадження наступних інновацій, котрі можуть ще більше оптимізувати продуктивність та адаптивність системи.

Система інтеграції мультиагентних моделей, алгоритмів самонавчання та сценарного ймовірнісного аналізу в платформі управління проєктами Skanska є складною, багаторівневою архітектурою, котра забезпечує ефективну взаємодію всіх учасників проєкту та оперативну аналітику у реальному часі. В її основі лежать мультиагентні моделі, котрі представляють собою автономних агентів, що відповідають за різні функції в межах проєкту: від управління ресурсами та планування робіт до контролю якості, фінансових

потоків і ризик-менеджменту. Кожен агент здатний приймати рішення на основі локальної інформації та власного досвіду, при цьому взаємодіючи з іншими агентами для досягнення загальних цілей компанії. Структура дозволяє розподіляти завдання динамічно, оптимізувати процеси і забезпечувати максимальну продуктивність навіть у випадках обмеженої або неповної інформації.

Алгоритми самонавчання додають системі гнучкість, оскільки агенти здатні адаптувати свої стратегії на основі отриманого зворотного зв'язку та аналізу результатів попередніх дій. Вони враховують успіх або невдачу попередніх рішень, зміну ресурсних або часових обмежень і вплив зовнішніх факторів, таких як погодні умови, затримки постачання або зміни нормативів [106].

Завдяки цьому агенти можуть оптимізувати свої рішення автономно, коригуючи стратегії у режимі реального часу, що підвищує ефективність управління проєктом у цілому.

Сценарний та ймовірнісний аналіз інтегрується в систему як механізм прогнозування альтернативних варіантів розвитку подій та оцінки ймовірності їхнього виникнення. Дозволяє агентам приймати обґрунтовані рішення в умовах невизначеності, прогнозувати ризики та оцінювати можливі наслідки своїх дій для всієї системи. Сценарії формуються на основі змінних параметрів проєкту, таких як ресурси, терміни, ризики і взаємодія з іншими підрозділами, що дозволяє адаптувати стратегії кожного агента під конкретну ситуацію.

Взаємозв'язок агентів, підсистем і аналітичних панелей у реальному часі забезпечує цілісну координацію всіх процесів. Дані, що генеруються агентами, автоматично передаються на аналітичні панелі, де вони обробляються, візуалізуються та інтегруються у звіти для управлінців компанії. Кожен агент може отримувати інформацію про стан інших агентів, зміни у ресурсах або нові ризики, що дозволяє коригувати власні дії та синхронізувати їх із загальними цілями проєкту. Аналітичні панелі відображають ключові показники ефективності (KPI), динаміку виконання завдань, розподіл ресурсів, ризики та прогнози сценаріїв розвитку подій, що робить процес прийняття рішень більш прозорим та обґрунтованим.

Завдяки такій інтеграції Skanska отримує змогу здійснювати оперативний контроль і стратегічне планування одночасно, коригувати ресурси у реальному часі та прогнозувати наслідки різних управлінських рішень. Дозволяє підвищувати продуктивність та ефективність проєктів, забезпечує адаптацію всієї системи до нових факторів та умов, роблячи управління більш гнучким, прозорим та інноваційним.

Рисунок 3.11 ілюструє схему інтеграції мультиагентних моделей, алгоритмів самонавчання та сценарного ймовірнісного аналізу у корпоративну платформу Skanska. На схемі показано, як автономні агенти взаємодіють між собою та з підсистемами управління, обробляють дані у реальному часі і передають їх на аналітичні панелі для прийняття обґрунтованих управлінських рішень. Схема демонструє потік інформації між агентами, підсистемами і аналітичними інструментами, а також показує, як інтеграція цих компонентів забезпечує прозорість процесів, адаптивність до змінних умов і підвищення ефективності будівельних проєктів.



Рисунок 3.11. Схема інтеграції моделей у корпоративну платформу Skanska

Аналіз стану «до» впровадження інновацій дозволяє чітко оцінити, як функціонувала система управління будівельними проєктами Skanska до інтеграції мультиагентних моделей та алгоритмів самонавчання. На цьому етапі вивчаються ключові показники ефективності (KPI), котрі відображають продуктивність команд, рівень використання ресурсів, завантаженість працівників та часові показники виконання завдань. Візуалізація KPI демонструє, які процеси відбуваються ефективно, а де спостерігаються затримки, низька продуктивність або нерівномірний розподіл ресурсів, що може призводити до додаткових витрат часу та бюджету.

Важливим аспектом є оцінка мотивації команд, котра впливає на швидкість і якість виконання завдань. На етапі «до» впровадження інноваційні механізми розподілу ресурсів та адаптивне навчання агентів ще не застосовувалися, тому стратегії команд формувалися переважно на основі традиційних підходів і централізованого управління [92]. Означає, що агенти — як фізичні працівники, так і автоматизовані системи — мали обмежену здатність адаптуватися до змінних умов і взаємодіяти між собою у режимі реального часу.

Візуалізація ресурсного розподілу показує, як матеріальні та трудові ресурси були розподілені між підрозділами і завданнями, які зони залишалися перевантаженими, а де ресурси використовувалися не повністю. Дозволяє виявити вузькі місця у процесах, котрі можуть бути оптимізовані після інтеграції мультиагентної моделі. Графіки «до» впровадження показують рівень взаємодії між підрозділами, частоту конфліктів через неповну або несвоєчасну інформацію, а також ефективність управлінських рішень, прийнятих без використання алгоритмів самонавчання.

Комплексний аналіз дозволяє наочно оцінити стан проєкту і ефективність існуючих процесів, створюючи базу для порівняння з результатами «після» інтеграції інноваційної моделі. Він дає змогу виявити слабкі місця, визначити потенційні точки оптимізації та підготувати аналітичну основу для подальшого впровадження алгоритмів самонавчання та мультиагентних моделей, котрі будуть адаптуватися до змінних умов і підвищувати ефективність управління будівельними проєктами.

Рисунок 3.12 демонструє панель аналітики «до» впровадження інноваційної моделі в Skanska. На рисунку представлені графіки ефективності команд, таблиці розподілу ресурсів, показники продуктивності та мотивації працівників. Панель дозволяє візуально оцінити, які процеси відбуваються ефективно, а де спостерігаються затримки або перевантаження ресурсів. Створює базу для порівняння з результатами «після» інтеграції мультиагентних моделей і алгоритмів самонавчання.

Процес інтеграції мультиагентних моделей і алгоритмів самонавчання у роботу компанії Skanska передбачає поетапне впровадження системи, котра

дозволяє кожному агенту ефективно взаємодіяти з іншими та приймати оптимальні рішення в умовах динамічного будівельного проєкту. На першому етапі проводиться налаштування цифрової платформи, в яку інтегруються всі агентні модулі, алгоритми адаптивного навчання та сценарного ймовірнісного аналізу. Кожен агент отримує доступ до локальних і глобальних даних про стан проєкту, включаючи інформацію про ресурси, завдання, часові рамки та ризики, що дозволяє йому оцінювати свої дії у контексті колективних цілей.



Рисунок 3.12. Панель аналітики «до» впровадження (графіки ефективності, таблиці ресурсів) (Джерело: розроблено автором)

Алгоритми самонавчання забезпечують адаптацію агентів до нових факторів, котрі можуть виникати під час реалізації проєкту, таких як затримки постачання матеріалів, зміни у фінансуванні, перебої у роботі обладнання або коливання робочої сили. Кожен агент здатний аналізувати отримані зворотні дані, коригувати власні стратегії та прогнозувати ймовірні сценарії розвитку подій. Завдяки цьому вони можуть швидко реагувати на непередбачувані ситуації, оптимізуючи розподіл ресурсів і пріоритети виконання завдань.

Система дозволяє агентам приймати локально оптимальні рішення, синхронізувати їх із колективними цілями компанії, забезпечуючи баланс між індивідуальною ефективністю та ефективністю всієї організації. Завдяки

інтеграції сценарного аналізу та ймовірнісного прогнозування агенти можуть оцінювати ризики і визначати найбільш ймовірні варіанти розвитку подій, що дозволяє мінімізувати негативні наслідки та підвищити продуктивність усіх підрозділів компанії [97].

У результаті інтеграції мультиагентних моделей і алгоритмів самонавчання Skanska отримує динамічну і адаптивну систему управління проектами, котра забезпечує оперативний контроль, прозорість прийняття рішень та оптимізацію використання ресурсів у реальному часі, підвищуючи загальну ефективність будівельних проєктів.

Рисунок 3.13 ілюструє діаграму процесу інтеграції алгоритмів самонавчання та мультиагентних моделей у роботу проєктів Skanska.

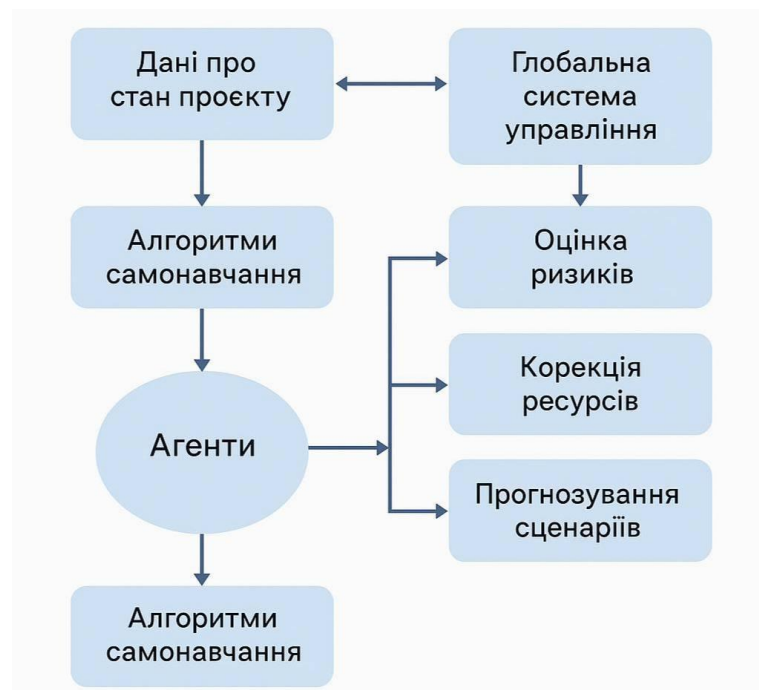


Рисунок 3.13. Діаграма процесу інтеграції алгоритмів самонавчання та мультиагентних моделей у роботу проєктів Skanska (Джерело: розроблено автором)

На діаграмі показано, як агенти отримують дані про стан проєкту, взаємодіють між собою та адаптують свої стратегії на основі алгоритмів самонавчання і сценарного аналізу. Схема демонструє потік інформації від локальних агентів до глобальної системи управління, включаючи оцінку ризиків, корекцію ресурсів та прогнозування можливих сценаріїв розвитку подій, що дозволяє ефективно оптимізувати процеси та підвищувати

продуктивність команд у реальному часі. Рисунок 3.14 демонструє графіки «до/після» для ключових показників ефективності у проєктах Skanska. На графіках відображено зміни продуктивності команд, розподілу ресурсів, мотивації працівників та рівня ризиків після впровадження мультиагентних моделей і алгоритмів самонавчання. Візуалізація дозволяє наочно оцінити ефект інтеграції інновацій на процеси управління, підкреслюючи покращення у адаптації агентів та загальній ефективності проєктів.

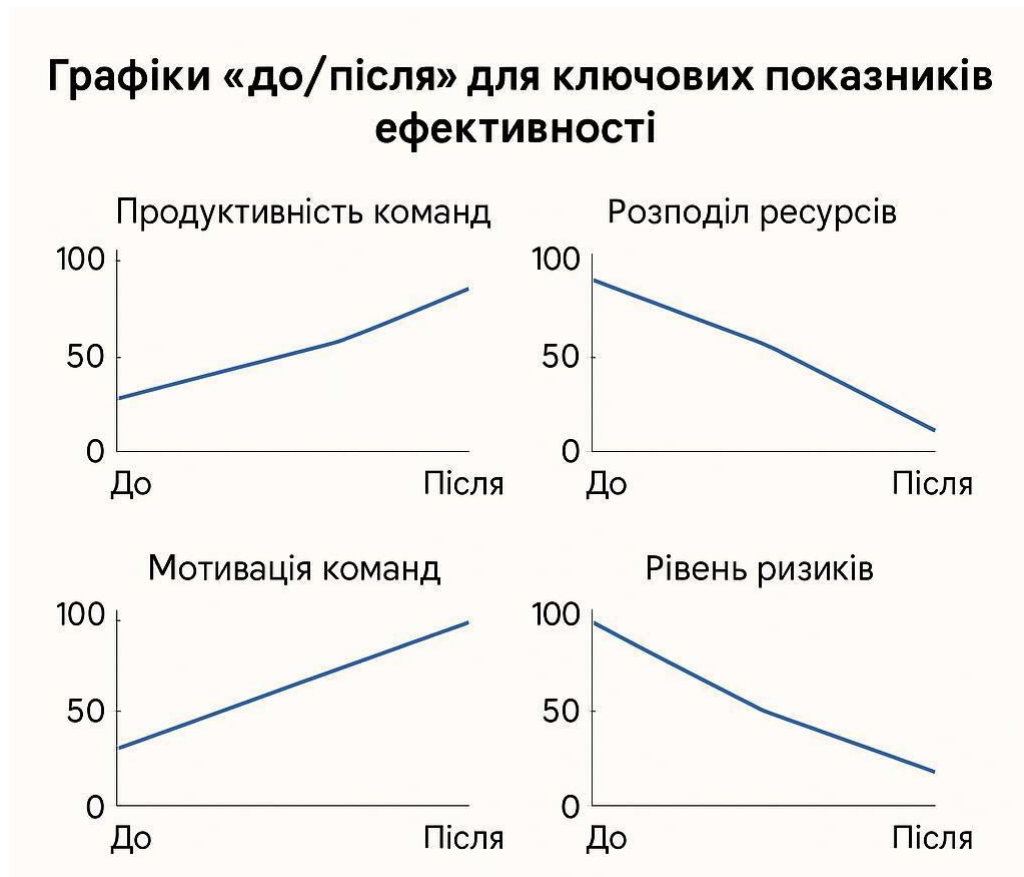


Рисунок 3.14. Графіки «до/після» для ключових показників ефективності  
(Джерело: розроблено автором)

Рисунок 3.15 показує панель аналітики «після» інтеграції інновацій. Панель відображає оновлені КРІ, динаміку продуктивності агентів, стан ресурсів та оцінку ризиків у режимі реального часу. Інтерфейс дозволяє керівництву оперативно оцінювати ефективність впроваджених алгоритмів, контролювати адаптацію агентів та приймати обґрунтовані управлінські рішення на основі інтегрованих даних.

Для аналізу та візуалізації даних у будівельних проєктах компанії Skanska застосовуються сучасні програмні комплекси, котрі дозволяють

інтегрувати мультиагентні моделі, алгоритми самонавчання та сценарний аналіз у зручні для користувача панелі управління.

Одним із ключових інструментів є Microsoft Power BI, який забезпечує обробку великих обсягів даних, інтеграцію різних джерел інформації та створення динамічних, інтерактивних дашбордів. Він дозволяє в режимі реального часу відображати KPI, аналізувати продуктивність команд, розподіл ресурсів та ефективність стратегій агентів, а також проводити порівняння стану «до» і «після» впровадження інновацій.



Рисунок 3.15. Панель аналітики «після» інтеграції інновацій (Джерело: розроблено автором)

Для більш детальної візуалізації та аналітики часто використовують Tableau, який дає змогу створювати інтерактивні графіки, теплові карти і складні панелі, що відображають взаємозв'язки між агентами, ресурсами і

ризиками. Tableau дозволяє швидко аналізувати великі масиви даних, оцінювати ефективність впровадження алгоритмів самонавчання і приймати управлінські рішення на основі комплексної аналітики. Jira Insights використовується для моніторингу виконання завдань, оцінки продуктивності команд і контролю за ресурсами в рамках ІТ-проектів та будівельних процесів. Інструмент забезпечує прозоре відстеження прогресу завдань і дозволяє аналізувати взаємодію агентів у мультиагентній системі, надаючи можливість швидко коригувати стратегії у випадку зміни умов проекту. Для планування, координації та візуалізації процесів, що вимагають колективної роботи і інтерактивного обговорення, застосовується Miro. Інструмент дозволяє створювати інтерактивні карти процесів, блок-схеми, панелі для колективного аналізу сценаріїв і візуалізації результатів роботи агентів, забезпечуючи ефективну комунікацію між підрозділами компанії [81].

Комбінація цих програмних комплексів дозволяє Skanska відстежувати і аналізувати ключові показники ефективності, інтегрувати результати роботи мультиагентних моделей у реальний процес управління проектами. Вони забезпечують високу точність прогнозів, наочність даних і дозволяють приймати обґрунтовані управлінські рішення в умовах обмеженої інформації та динамічних змін у будівельному середовищі. Рисунок 3.16 ілюструє приклад українського інтерфейсу аналітичної панелі, котра демонструє ключові показники ефективності (KPI) та результати роботи агентів у будівельному проекті Skanska. На панелі відображаються дані про продуктивність команд, розподіл ресурсів, виконання завдань і ризики, що дозволяє керівництву швидко оцінити ефективність впроваджених алгоритмів та прийняти обґрунтовані управлінські рішення в режимі реального часу.

Рисунок 3.17 показує додаткову панель та графік для оцінки адаптації агентів і впливу нових факторів на процеси проекту. На візуалізації відображено, як агенти змінюють свої стратегії у відповідь на затримки ресурсів, зміни термінів або інші зовнішні фактори, а також як впливає на загальну ефективність і взаємодію команд. Панель дозволяє проводити порівняльний аналіз «до/після» інтеграції мультиагентних моделей і оцінювати ступінь адаптації агентів до нових умов.

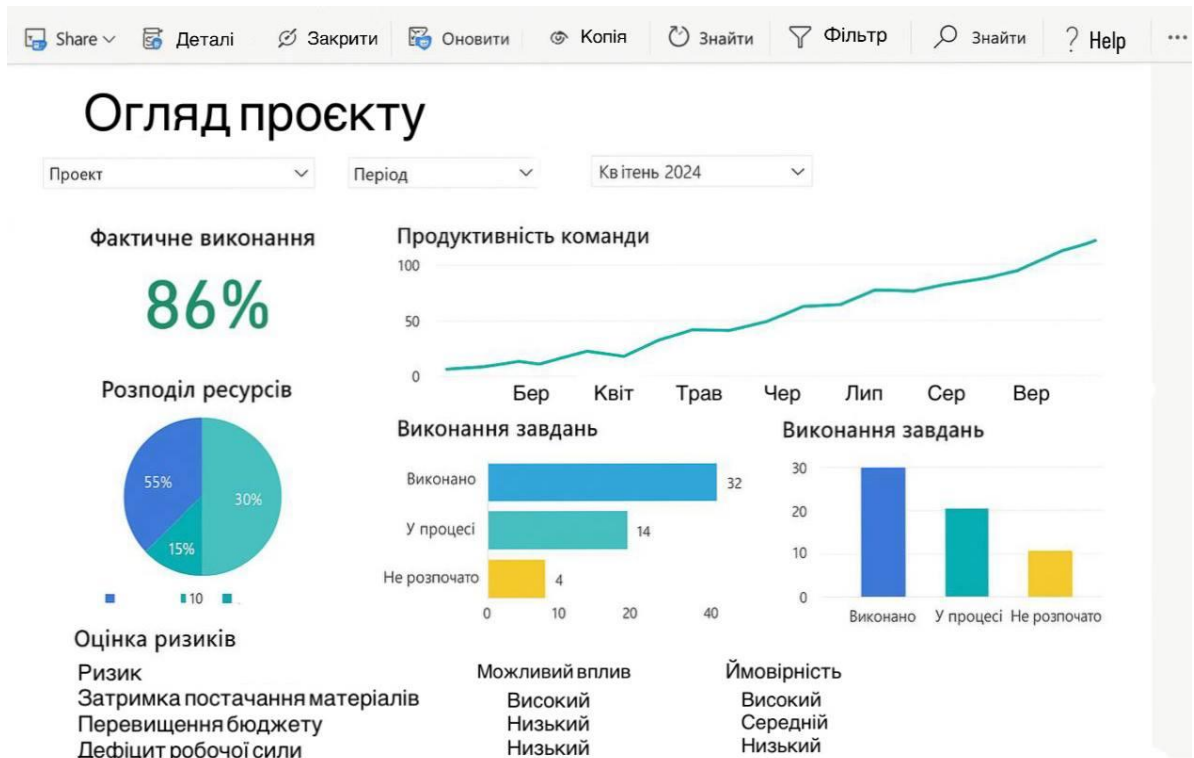


Рисунок 3.16. Приклад українського інтерфейсу аналітичної панелі  
(Джерело: розроблено автором)

Після інтеграції мультиагентних моделей і алгоритмів самонавчання в системи управління проєктами компанії Skanska спостерігається суттєве покращення продуктивності, більш ефективний розподіл ресурсів та підвищення мотивації команд. Агенти стали здатні оперативно адаптувати свої стратегії до змінних умов, що дозволило мінімізувати затримки у виконанні завдань, скоротити простой обладнання та оптимізувати використання матеріальних і людських ресурсів. КРІ команд показують більш стабільні та високі значення, а графіки «до/після» демонструють видиме покращення ефективності при виконанні критичних завдань та зменшення ризиків у проєкті.

Сильними сторонами інтеграції є висока адаптивність агентів, здатність до автономного самонавчання, прозорість прийняття рішень і можливість моніторингу продуктивності в реальному часі. Інтеграція дозволяє скоротити час реакції на непередбачувані зміни у ресурсах та графіку проєкту і забезпечує більш рівномірний розподіл завдань між командами, що підвищує загальну ефективність.

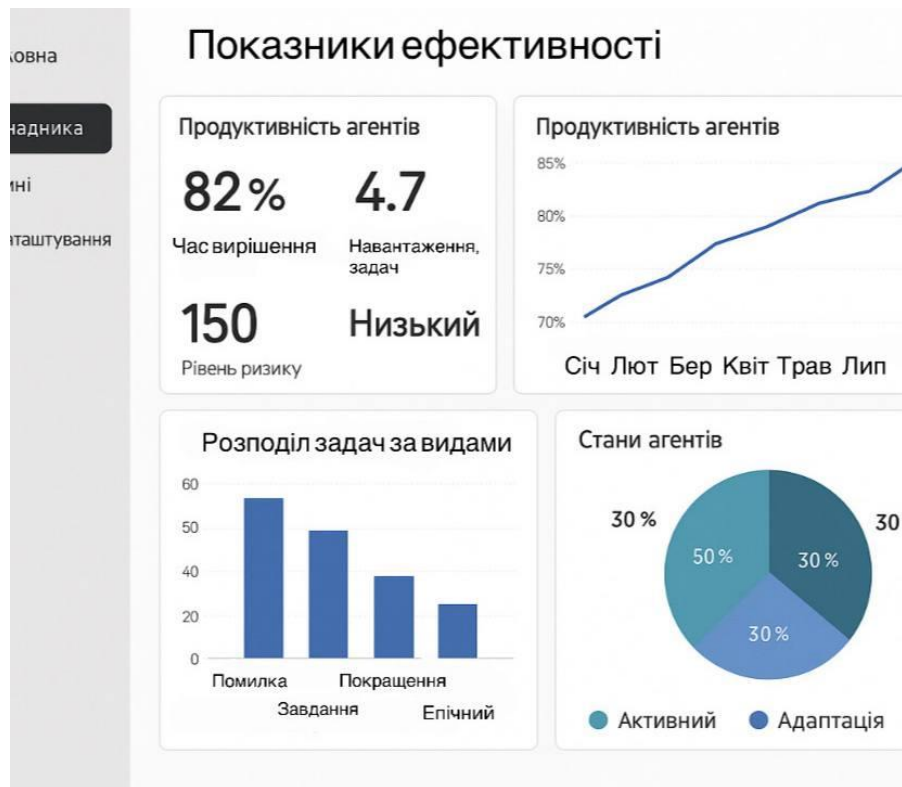


Рисунок 3.17. Додаткова панель та графік для оцінки адаптації агентів і впливу нових факторів на процеси проєкту (Джерело: розроблено автором)

Слабкі сторони інтеграції полягають у необхідності значних початкових інвестицій у цифрову інфраструктуру, високій залежності від точності вхідних даних та потребі у навчанні персоналу для ефективного використання аналітичних панелей. Крім того, певна складність у налаштуванні взаємодії агентів та їх алгоритмів може потребувати додаткового часу для оптимізації на початкових етапах впровадження [67].

Рисунок 3.18 демонструє додаткові графіки, які ілюструють адаптацію мультиагентної системи та ефект впровадження інновацій у будівельних проєктах Skanska.

На графіках відображено, як агенти коригують свої стратегії у відповідь на зміни ресурсів, ризику, терміни та інші зовнішні фактори. Графіки показують, як інтеграція мультиагентних моделей та алгоритмів самонавчання вплинула на продуктивність команд, рівень мотивації працівників і ефективність розподілу ресурсів, дозволяючи наочно порівнювати стан системи «до» і «після» впровадження інновацій.



Рисунок 3.18. Додаткові графіки, котрі ілюструють адаптацію мультиагентної системи та ефект впровадження інновацій у будівельних проєктах Skanska  
(Джерело: розроблено автором)

Візуалізації допомагають керівництву оцінити, наскільки система стала адаптивною, як швидко агенти реагують на зміни і який ефект має на результати проєкту загалом. Рекомендації щодо подальшого вдосконалення включають регулярне оновлення алгоритмів самонавчання з урахуванням нових сценаріїв, покращення інтеграції аналітичних панелей з внутрішніми корпоративними системами, а також впровадження навчальних модулів для персоналу щодо ефективного використання мультиагентних моделей. Доцільно розширювати аналітичні модулі для прогнозування ризиків та планування ресурсів, що дозволить ще більш підвищити продуктивність і адаптивність агентів у масштабних будівельних проєктах.

З метою практичної реалізації запропонованої багаторівневої методичної системи у роботі сформовано прикладний інструментарій у вигляді модульної мультиагентної системи управління трудовими ресурсами. Архітектура інструменту побудована відповідно до логіки інтеграції методологічних, модельних, інфраструктурних і технологічних компонентів та забезпечує реалізацію наукової новизни дослідження у прикладній площині.

Запропоновано науково обґрунтований підхід до формування архітектури прикладного інструментарію мультиагентної системи управління

трудовами ресурсами, що базується на інтеграції методів системного аналізу, мультиагентного моделювання, економіко-математичної оптимізації та цифрових платформ. Розроблений інструментарій реалізує концепцію переходу від традиційних статичних моделей управління трудовими ресурсами до динамічної адаптивної системи, в якій кожен працівник представлений у вигляді цифрового агента з формалізованими характеристиками.



Рисунок 3.19. Архітектура прикладного інструментарію мультиагентної системи управління трудовими ресурсами (Джерело: розроблено автором)

Методологічно-аналітичний модуль забезпечує формування наукового базису дослідження та параметризацію задачі, використовуючи системний аналіз, структурно-функціональний підхід і методи експертних оцінок. Це дозволяє формалізувати управління трудовими ресурсами як складну відкриту соціально-економічну систему, визначити її ключові параметри, обмеження та гіпотези функціонування. Наукова новизна даного модуля полягає у поєднанні якісних і кількісних методів у єдиній параметричній моделі мультиагентної системи.

Модуль формування цифрових профілів агентів реалізує концепцію «цифрового працівника», відповідно до якої кожен агент описується вектором

стану  $s_i=(x_i, \theta_i, c_i)$ , що включає компетенції, продуктивність та адаптивність. Така формалізація дозволяє перейти від описових характеристик персоналу до їх математичного представлення, що забезпечує можливість подальшого алгоритмічного управління. Наукова новизна полягає у введенні формалізованої моделі цифрового двійника працівника з урахуванням параметра адаптивності як ключового чинника динаміки системи.

Модуль мультиагентного розподілу ресурсів реалізує оптимізаційне ядро системи та забезпечує ефективний розподіл трудових ресурсів у мультипроектному середовищі. Він базується на поєднанні мультиагентного моделювання, мережних моделей та економіко-математичних методів оптимізації, що дозволяє враховувати як структуру взаємодій між агентами, так і обмеження ресурсів. Наукова новизна полягає у розробці мультиагентної моделі розподілу трудових ресурсів із децентралізованим прийняттям рішень, що суттєво відрізняється від класичних централізованих підходів.

Модуль адаптації та самонавчання агентів забезпечує динамічну поведінку системи та її здатність до еволюції в умовах невизначеності. Зміна стану агента описується функцією (3.2.), що враховує як попередній стан, так і зовнішні впливи. У модулі використовуються методи нечіткої логіки, ймовірнісного та сценарного аналізу, а також алгоритми самонавчання, що дозволяє формувати адаптивні стратегії поведінки агентів. Наукова новизна полягає у розробці моделей реактивної адаптації та самонавчання трудових ресурсів у складі мультиагентної системи.

Модуль інтеграції з цифровими платформами забезпечує функціонування системи у єдиному інформаційному середовищі шляхом інтеграції з BIM, ERP та PLM-системами. Це дозволяє синхронізувати дані про ресурси, процеси та об'єкти проекту, забезпечуючи їх узгодженість і актуальність. Наукова новизна полягає у поєднанні мультиагентного підходу з сучасними цифровими платформами, що створює передумови для практичної реалізації розроблених моделей у реальних проєктних середовищах.

Модуль оцінювання ефективності та ризиків реалізує аналітичний механізм прийняття управлінських рішень на основі інтегрованої функції ефективності формула (3.1.), яка враховує як показники результативності, так і ризики. Це дозволяє здійснювати багатокритеріальну оцінку альтернатив та обирати оптимальні рішення в умовах невизначеності. Наукова новизна полягає у формуванні інтегрованої функції ефективності, що поєднує продуктивність і ризики в єдиній формалізованій моделі.

Модуль моніторингу та реконфігурації системи забезпечує функціонування системи як замкненого адаптивного контуру управління. Він включає механізми моніторингу стану ресурсів, виявлення відхилень, реконфігурації розподілу та формування зворотного зв'язку для подальшого навчання системи. Це дозволяє системі адаптуватися до змін у реальному часі та підтримувати оптимальний режим функціонування. Наукова новизна полягає у розробці механізмів динамічної реконфігурації мультиагентної системи та забезпеченні цифрової когерентності її функціонування.

Узагальнюючи, наукова новизна запропонованого інструментарію полягає у створенні інтегрованої мультиагентної системи управління трудовими ресурсами, яка поєднує формалізовану модель цифрового працівника, адаптивні алгоритми самонавчання, багатокритеріальну оптимізацію та інтеграцію з цифровими платформами. Такий підхід забезпечує перехід до нового рівня управління трудовими ресурсами, що характеризується динамічністю, адаптивністю, здатністю до самонавчання та ефективною роботою в умовах невизначеності.

Основні наукові результати по даному розділу опубліковані у працях [116, 117, 118, 120, 121].

### **ВИСНОВКИ ДО 3-ГО РОЗДІЛУ**

1. Дослідження третього розділу спрямовані на формування аналітико-прикладного інструментарію для управління трудовими ресурсами в будівельних девелоперських проєктах. Узагальнено результати побудови моделей мультиагентного розподілу персоналу та інтеграції інтелектуальних

технологій у систему ухвалення рішень. Показано, що запропонований підхід забезпечує формалізоване представлення взаємодії учасників проєкту та підвищує керованість організаційних процесів.

2. Обґрунтовано доцільність використання гібридних методів, що поєднують мультиагентне моделювання, нечітку логіку, ймовірнісний аналіз і сценарне управління в умовах нестабільності середовища. Штучний інтелект визначено як ключове аналітичне ядро для адаптивного навчання агентів і прогнозування сценаріїв розвитку подій. Розроблена інтегрована функція ефективності дозволяє поєднати оцінку ризиків, мотивацію персоналу та ймовірності альтернативних управлінських рішень.

3. Обґрунтовано доцільність використання мультиагентних моделей для управління в умовах динамічності та неповної інформації. Показано, що поєднання нечіткої логіки, сценарного аналізу та теорії ймовірностей забезпечує гнучке налаштування стратегій агентів. Розкрито роль варіативності поведінки агентів, їх автономності та здатності адаптуватися до змін середовища. Запропоновані моделі дозволяють враховувати як кількісні, так і якісні чинники, включаючи мотивацію, ризики та ресурсні обмеження. Це створює підґрунтя для підвищення ефективності управлінських рішень у складних проєктних системах.

4. Розроблено інтегровану модель мультиагентного розподілу, яка поєднує нечіткі функції належності, ймовірнісні оцінки та сценарне управління. Доведено, що застосування таких підходів дає змогу оцінювати варіативність стратегій агентів та прогнозувати їхню поведінку за різних сценаріїв розвитку подій. Показано механізми адаптивної зміни станів агентів залежно від мотивації, ризику та зовнішніх впливів. Сформовано інструментарій вибору оптимальних стратегій в умовах невизначеності, що забезпечує підвищення стійкості й результативності управління будівельними девелоперськими проєктами.

5. Інтеграція алгоритмів самонавчання значно підвищила адаптивність агентів досліджуваного підприємства, трансформувавши їхню поведінку від

реактивної до проактивної. Агенти навчилися прогнозувати наслідки своїх дій, оперативно коригувати стратегії та враховувати ризики й зміни середовища. Це дозволяє зменшувати невизначеність, оптимізувати ресурси і уникати критичних відхилень у логістиці, плануванні та виконанні проєктів, підвищуючи загальний рівень продуктивності та ефективності.

6. Розроблений прикладний інструментарій, що включає алгоритми самонавчання, модулі вибору стратегій та аналітичні панелі, забезпечує практичну реалізацію моделей у реальному часі. Він дозволяє оцінювати ефективність дій агентів за різними сценаріями, прогнозувати наслідки управлінських рішень і формувати альтернативні стратегії. Така інтеграція підвищує точність планування, синхронізацію роботи підрядників і постачальників, а також підтримує децентралізоване, адаптивне управління проєктами.

7. Завдяки алгоритмам самонавчання управлінська система досліджуваного підприємства набула гнучкості, прозорості та можливості випереджувальної дії. Аналітичні панелі відображають ключові KPI у реальному часі, демонструють тренди та сценарні прогнози, що зміцнює довіру до цифрових інструментів. Підвищено ефективність ресурсного менеджменту, знижено ризики та простой, а організаційна поведінка стала більш координаційною та адаптивною, створюючи підґрунтя для масштабування інноваційних рішень у корпоративній екосистемі.

8. Інтеграція мультиагентних моделей та алгоритмів самонавчання у цифрові системи управління проєктами досліджуваного підприємства підвищує адаптивність і ефективність управління. Агенти моделюють поведінку підрозділів, підрядників і постачальників, враховуючи взаємодії, конфлікти та обмежену інформацію. Алгоритми самонавчання дозволяють агентам коригувати стратегії у реальному часі залежно від змін у ресурсах, термінах, ризиках та зовнішніх умовах. Це забезпечує динамічну оптимізацію процесів, прогнозування ризиків і зменшення ймовірності затримок та фінансових втрат.

9. Впровадження мультиагентних моделей забезпечує автономне прийняття рішень агентами та синхронізацію їхніх дій із загальними цілями проєкту. Сценарний та ймовірнісний аналіз дозволяє прогнозувати альтернативні варіанти розвитку подій, оцінювати ймовірності ризиків і планувати ресурси ефективніше. Інтеграція з аналітичними панелями, такими як Power BI, Tableau, Jira та Miro, створює прозору систему моніторингу KPI, продуктивності команд і розподілу ресурсів. Це дає змогу управлінцям приймати обґрунтовані рішення на всіх рівнях і підвищує гнучкість управлінської системи.

10. Порівняння стану системи «до» і «після» впровадження мультиагентних моделей демонструє суттєве покращення продуктивності команд, рівномірності розподілу ресурсів та мотивації персоналу. Агенти швидко адаптуються до змінних умов, зменшуючи затримки та простої, оптимізують ресурси і пріоритети завдань. Система забезпечує прозорість управлінських процесів, прогнозування ризиків та підґрунтя для впровадження подальших інновацій. Сильними сторонами є автономність, адаптивність і інтеграція даних у реальному часі, слабкими – потреба у навчанні персоналу та значних початкових інвестиціях.

11. Принципова інноваційність результатів досліджень полягає у створенні науково-методичного та аналітичного базису для управління трудовими ресурсами у будівельних девелоперських проєктах за умов невизначеності. Розроблено інтелектуалізовану систему, здатну до адаптації, самоорганізації та самонавчання. Запропоновано концепт «цифрового працівника», що діє як активний агент у BIM- та ERP-системах. Вдосконалено інструменти оцінки інноваційного потенціалу підприємств та інтеграційну модель його нарощування. Розроблено архітектуру агентної взаємодії, модель реконфігурації операційної діяльності та функцію ефективності управління, яка забезпечує баланс між автономністю агентів і цілісністю системи.

12. Практична цінність дослідження полягає у впровадженні мультиагентного інструментарію управління трудовими ресурсами, що

забезпечує цифрову інтеграцію, адаптивність та підвищення ефективності організаційно-трудових процесів. Запропоновані моделі дозволяють оптимізувати розподіл персоналу, прогнозувати сценарії змін у виробничому середовищі та підвищувати продуктивність праці в умовах невизначеності. Архітектура агентної взаємодії та алгоритми реконфігурації операцій впроваджені у практичну діяльність досліджуваних підприємств, що підтверджує їхню ефективність у реальних девелоперських проєктах.

13. Методичні рекомендації та цифрові рішення інтегровані в освітній процес КНУБА під час підготовки бакалаврів і магістрів за спеціальністю 192 «Будівництво та цивільна інженерія». Реалізація результатів сприяє підвищенню цифрової компетентності управлінського персоналу та формуванню навичок роботи з інтелектуальними системами. Впровадження мультиагентних підходів у будівельний девелопмент і HR-менеджмент забезпечує підвищення ефективності управління персоналом та поширення сучасних методів цифрової організації праці.

### **ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ**

1. Науковими та прикладними передумовами дослідження є те, що сучасна операційна система девелоперського проєкту розглядається як складна мультиагентна структура, де підрядники, постачальники, проєктанти, управлінці та цифрові платформи взаємодіють у режимі безперервної координації та обміну даними. Актуальним стає впровадження ІТ-методів управління персоналом у цифрові платформи, що формують нову архітектуру організації праці. Цифровий працівник у такій системі виступає активним агентом інформаційної взаємодії та аналітичним учасником управлінських рішень. Науково-методично обґрунтовано необхідність розробки та верифікації моделей і методів мультиагентного розподілу трудових ресурсів у будівельних проєктах за умов динамічної невизначеності. Особливе значення має дослідження організації й управління трудовими ресурсами як виробничого, так і управлінського персоналу в умовах цифрової трансформації девелоперської діяльності. Виникає потреба у вдосконаленні організаційно-

технологічних і структурних моделей, алгоритмів та методів мультиагентного розподілу праці, що забезпечують адаптивність і узгоджену взаємодію учасників проєкту. Поєднання мультиагентних моделей із концепцією цифрового працівника та динамічною реконфігурацією операційних структур створює науково-прикладну базу для децентралізованого управління, підвищуючи ефективність, прозорість та цифрову когерентність процесів у девелоперських проєктах.

2. Доведено доцільність формування інтелектуалізованої системи управління трудовими ресурсами, здатної до адаптивного функціонування в умовах постійних організаційно-технологічних змін. Така система передбачає самонавчання агентів, накопичення досвіду взаємодії та коригування управлінських рішень з урахуванням нових факторів. Мультиагентний підхід забезпечує узгодженість дій учасників, зменшує ризики дезкоординації та підвищує ефективність кадрового потенціалу. Розроблений методичний інструментарій сприяє цифровій узгодженості організаційно-трудова процесів, підвищенню гнучкості систем управління та результативності проєктної діяльності. Запропоновані рішення базуються на принципах інноваційності та сталого розвитку, формуючи основу для ефективної реалізації сучасних девелоперських проєктів.

3. Здійснено концептуально-теоретичне обґрунтування моделей і методів мультиагентного розподілу трудових ресурсів у будівельних проєктах за умов невизначеності. Показано вплив цифрової трансформації та розвитку ІТ-середовища на еволюцію управління персоналом, обґрунтовано інтеграцію інноваційних технологій у HR-менеджмент для підвищення продуктивності та стійкості команд. Систематизовано типи невизначеності та їхній вплив на поведінкові стратегії агентів, доведено необхідність переходу до гнучких мережевих структур. Визначено принципи цифрового лідерства, інноваційної спроможності та адаптивності мультиагентних систем, що створює теоретичне підґрунтя для розробки практичного інструментарію.

4. Сформовано методичну основу для дослідження методів і моделей мультиагентного розподілу трудових ресурсів у девелоперських проєктах, що поєднує класичні наукові підходи з інструментами мережевого моделювання, мультиагентного програмування та цифрової симуляції. Така інтеграція дозволяє формалізувати управлінські процеси девелоперського циклу, об'єднуючи аналітику, цифрові технології та стратегічне управління. Розроблена аналітична платформа забезпечує узгодженість управлінських рішень і підвищує адаптивність системи до змін зовнішнього середовища, створюючи умови для ефективного функціонування проєктних команд.

5. Обґрунтовано підходи до оцінки інноваційної спроможності підприємств-учасників як ключового чинника адаптивності, а також розроблено інтеграційну модель нарощування інноваційного потенціалу, що включає технологічні, кадрові, організаційні та фінансові компоненти. Введено концепцію стратегічно залежної реконфігурації ресурсів у часі та моделі реактивної адаптації агентів, які дозволяють прогнозувати поведінку трудових ресурсів у динамічному середовищі. Показано, що поєднання реактивних та прогностичних підходів забезпечує стійкість, гнучкість і автономність мультиагентних систем управління у будівельному девелопменті.

6. Досліджуване підприємство розглядається як складна мультиагентна операційна система, представлена у вигляді направленого графа, де вузли відповідають підрозділам, функціям та технологічним платформам, а орієнтовані зв'язки відображають потоки інформації, ресурсів і рішень. Використання коефіцієнта структурної когерентності дозволяє кількісно оцінити рівень інтегрованості системи, виявляти критичні точки надмірної централізації або розбалансованості ресурсного контролю, а також забезпечує підґрунтя для оптимізації внутрішніх потоків і підвищення ефективності управлінських рішень.

7. Диференціальна модель стратегічно залежної реконфігурації операційної структури забезпечує її динамічну адаптацію до змін зовнішнього

середовища, включаючи коливання ринку, зміну фінансування або регіональну релокацію будівництва. Поєднання структурного та часово-адаптивного опису багатовимірної конфігурації дозволяє прогнозувати розвиток подій, оптимізувати розподіл ресурсів між підмодулями та забезпечувати гнучке прийняття стратегічних рішень. Такий підхід формує науково-прикладну основу для підвищення ефективності та адаптивності операційної діяльності девелоперських проєктів у реальних умовах.

8. Доведено доцільність застосування гібридних підходів, що поєднують мультиагентне моделювання, нечітку логіку, ймовірнісний аналіз та сценарне управління в умовах нестабільного середовища. Штучний інтелект виступає ключовим аналітичним ядром для адаптивного навчання агентів та прогнозування сценаріїв розвитку подій. Розроблена інтегрована функція ефективності забезпечує комплексну оцінку ризиків, мотиваційних факторів і альтернативних управлінських рішень, що сприяє підвищенню адаптивності та продуктивності управлінських процесів у будівельних девелоперських проєктах.

9. Показано ефективність мультиагентних моделей для управління в умовах динамічності та неповної інформації, де поєднання нечіткої логіки, ймовірнісного та сценарного аналізу дозволяє гнучко налаштовувати стратегії агентів. Інтегровані алгоритми самонавчання трансформують поведінку агентів від реактивної до проактивної, дозволяючи прогнозувати наслідки дій, адаптувати стратегії до змін середовища та зменшувати ризики. Це створює підґрунтя для підвищення стійкості, ефективності та результативності управлінських рішень у складних проєктних системах.

10. Оцінка ймовірностей для кожного агента в сценарному управлінні здійснюється за допомогою ймовірнісних функцій, які дозволяють визначити, з якою ймовірністю кожен сценарій може реалізуватися з урахуванням змінних факторів, ризиків та взаємодії агентів. Такий підхід забезпечує можливість обґрунтованого вибору оптимальної стратегії для кожного агента залежно від ймовірності настання конкретного сценарію. Формалізація цієї оцінки

здійснюється за допомогою формули Баєса, де ймовірність сценарію для стратегії агента визначається через умовні ймовірності вибору стратегії та ймовірності виникнення сценарію. Це дозволяє інтегрувати різні варіанти розвитку подій у процес прийняття рішень, підвищуючи адаптивність і точність управлінських дій у мультиагентних системах. Застосування ймовірнісного підходу сприяє прогнозуванню поведінки агентів і оптимізації стратегій у складних та динамічних девелоперських проєктах.

11. На основі дослідження підтверджено ефективність впровадження моделей мультиагентного розподілу трудових ресурсів у діяльність ТОВ «Фомальгаут-Полімін» та ТОВ «Архітектурно-будівельні інновації». Реалізовано інтелектуалізовану систему управління персоналом із використанням алгоритмів самонавчання, нечіткої логіки та сценарного аналізу, що передбачає формування цифрових профілів працівників, мультиагентний розподіл завдань, адаптивне управління ресурсами та аналітичний моніторинг показників ефективності. Впровадження забезпечило оптимізацію завантаження персоналу, підвищення точності управлінських рішень, зниження невизначеності та зростання продуктивності, формуючи основу для адаптивного цифрового управління девелоперськими проєктами.

12. Розроблений аналітико-прикладний інструментарій для управління трудовими ресурсами в мультиагентній девелоперській компанії забезпечує інтеграцію стратегічних орієнтирів з операційною конфігурацією підприємства, дозволяючи агентам оцінювати варіанти стратегій у нечітких умовах. Використання функцій належності та вагових коефіцієнтів для моделювання варіативності стратегій підвищує гнучкість управлінських рішень, адаптивність до зовнішніх ризиків і оптимізує процеси розподілу ресурсів, формуючи нову інтелектуальну основу для цифрового HR-менеджменту в девелоперських проєктах.

13. Інноваційність створеного інструментарію проявляється у поєднанні мультиагентного підходу, цифрових платформ та моделей оцінки стратегічної варіативності, що дозволяє автоматизувати та персоналізувати управлінські

рішення для кожного агента. Такий підхід забезпечує ефективне синхронізоване планування, оптимізацію витрат і підвищення конкурентоспроможності компанії, створюючи практичну платформу для адаптивного управління та інтегрованої координації трудових ресурсів у складних і динамічних девелоперських проєктах.

14. В цілому наукова новизна результатів дослідження полягає в удосконаленні науково-методичних та аналітичних підходів до моделі управління трудовими ресурсами в будівельних організаціях за умов динамічної невизначеності. Це включає прогнозування потреб, формування цифрових профілів працівників-агентів, мультиагентне призначення завдань із врахуванням автономності та командної взаємодії, моніторинг, адаптацію ресурсів, оцінку ефективності й ризиків, самоорганізацію та самонавчання агентів, а також постпроєктний аналіз для підвищення продуктивності. Розроблено архітектуру агентної взаємодії з урахуванням нечіткості, ймовірності та сценарності поведінки ресурсів, а також модель стратегічно залежної реконфігурації операційної діяльності для забезпечення цифрової когерентності структур і прогнозування змін ресурсного балансу. Запроваджено методико-прикладний апарат оцінки інноваційного потенціалу підприємств через інтеграцію технологічних, кадрових та організаційних чинників. Набуло розвитку застосування концепту «цифрового працівника девелоперського проєкту» як активного агента у BIM- та ERP-системах, удосконалено методи виявлення та нейтралізації відхилень у стані трудових ресурсів, а також науково-методичний підхід протидії ризикам у мультиагентному розподілі ресурсів. Використано гібридний підхід, що поєднує мультиагентне моделювання, нечітку логіку, ймовірнісний і сценарний аналіз, створюючи інтегровану функцію ефективності для підвищення стійкості, адаптивності та результативності девелоперських проєктів у цифровому середовищі.

15. Теоретична цінність дослідження полягає в сутнісному розширенні науково-методичних підходів та аналітичного інструментарію щодо

організації будівельних девелоперських проєктів як наукової підсистеми спеціальності 192 «Будівництво та цивільна інженерія» шляхом інтеграції концепту «цифрового працівника» як активного агента мультиагентної взаємодії, що забезпечує узгодженість процесів планування, координації та прийняття рішень у BIM- і ERP-середовищах. Систематизовано типи невизначеності та оцінено їхній вплив на поведінкові стратегії агентів і моделі розподілу трудових ресурсів, обґрунтовано перехід від ієрархічної до гнучкої мережевої структури управління персоналом. Розроблено архітектуру агентної взаємодії, модель стратегічно залежної реконфігурації операційної діяльності та інтегровану функцію ефективності управління, що враховує ризики, мотиваційні чинники та ймовірності сценаріїв. Використання ймовірнісних функцій дозволяє прогнозувати вибір стратегій агентами у мультиагентному середовищі, підвищуючи гнучкість і адаптивність управлінських рішень. Запропонований інструментарій моделювання об'єднує технологічні, кадрові та організаційні чинники, створюючи наукову основу для цифрової трансформації процесів організації праці та управління трудовим потенціалом у девелоперських проєктах.

16. Практична цінність дисертаційного дослідження полягає у створенні та впровадженні прикладного інструментарію управління трудовими ресурсами на основі мультиагентного підходу, що забезпечує цифрову інтеграцію, адаптивність та підвищення ефективності організаційно-трудова процесів у будівельному девелопменті. Запропоновані моделі та методи дозволяють оптимізувати розподіл персоналу, прогнозувати сценарії змін у виробничому середовищі та підвищувати продуктивність праці в умовах невизначеності. Архітектура агентної взаємодії та алгоритми реконфігурації операційної діяльності впроваджені у практику компаній ТОВ «Фомальгаут-Полімін» та ТОВ «Архітектурно-будівельні інновації», що підтверджує їх ефективність у реальних девелоперських проєктах.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Afanasieva O., Volska O., Rakhimova Kh., Yemtsev V., Matveeva V. Strategic Management Mechanism of Innovative Development of Industrial Companies // Academy of Strategic Management Journal. – 2020. – 7 p. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://dspace.ksaeu.kherson.ua/bitstream/handle/123456789/6634/Strategic-management-mechanism-of-innovative-development-of-industrial-companies-1939-6104-19-4-574.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
2. Albrecht S. V., Christianos F., Schäfer L. Multi-Agent Reinforcement Learning: Foundations and Modern Approaches. – Cambridge, MA : The MIT Press, 2024. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <file:///C:/Users/Hp/Downloads/marl-book.pdf>
3. Ali Z., Zhu F., Hussain S. Identification and Assessment of Uncertainty Factors that Influence the Transaction Cost in Public Sector Construction Projects in Pakistan // Buildings. – 2018. – Vol. 8, No. 11. – Article 157. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://doi.org/10.3390/buildings8110157>
4. Arends S. C. Development of a Firm-Level Innovation Capability Maturity Model and Identification of Innovation Archetypes / S. C. Arends. – Eindhoven University of Technology, Master Thesis, 2018. – 145 p.
5. Barney J. B. Firm Resources and Sustained Competitive Advantage / J. B. Barney // Journal of Management. – 1991. – Vol. 17, № 1. – P. 99–120.
6. Bersin J. People Analytics, A Complex Domain, Is About To Be Transformed by AI // Josh Bersin. – 2024. – URL: <https://joshbersin.com/2024/11/people-analytics-a-complex-domain-is-about-to-be-transformed-by-ai/>
7. Blöbaum B. (Ed.). Trust and Communication in a Digitized World: Models and Concepts of Trust Research. – Cham: Springer, 2016. – 251 p. – DOI: 10.1007/978-3-319-28059-2.
8. Bonasso R. P., Firby R. J., Gat E., Kortenkamp D., Miller D. P., Slack M. G. Experiences with an Architecture for Intelligent Reactive Agents. – 23 p. [Електронний ресурс] – Режим доступу: [https://www.researchgate.net/profile/David-Miller-121/publication/227293587\\_Experiences\\_with\\_an\\_architecture\\_for\\_intelligent\\_reactive\\_agents/](https://www.researchgate.net/profile/David-Miller-121/publication/227293587_Experiences_with_an_architecture_for_intelligent_reactive_agents/)

[inks/53ee5bcd0cf23733e80dad8c/Experiences-with-an-architecture-for-intelligent-reactive-agents.pdf](https://arxiv.org/abs/2410.05910v2)

9. Casilli A. A. Digital Labor and the Inconspicuous Production of Artificial Intelligence // arXiv preprint. – 2025. – arXiv:2410.05910v2 [cs.CY]. DOI: 10.48550/arXiv.2410.05910 [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2410.05910>

10. Curto D., Acebes F., González-Varona J. M., Poza D. Impact of Aleatoric, Stochastic and Epistemic Uncertainties on Project Cost Contingency Reserves // arXiv preprint arXiv:2406.03500. – 2024. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://arxiv.org/abs/2406.03500>

11. Davenport T. H. The AI Advantage: How to Put the Artificial Intelligence Revolution to Work. – Cambridge, MA : The MIT Press, 2018. – 232 p. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://repo.darmajaya.ac.id/4846/1/The%20AI%20Advantage%20How%20to%20Put%20the%20Artificial%20Intelligence%20Revolution%20to%20Work%20%28%20PDFDrive%20%29.pdf>

12. de Juana-Espinosa, S., Fernández-Sánchez, J. A., Manresa-Marhuenda, E., & Valdés-Conca, J. (Eds.). (2011). Human Resource Management in the Digital Economy: Creating Synergy between Competency Models and Information. IGI Global. <https://www.igi-global.com/book/human-resource-management-digital-economy/52745>

13. De Meyer A., Loch C. H., Pich M. T. A Framework for Project Management under Uncertainty // ResearchGate. – 2002. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://www.researchgate.net/publication/255621356\\_A\\_Framework\\_for\\_Project\\_Management\\_under\\_Uncertainty](https://www.researchgate.net/publication/255621356_A_Framework_for_Project_Management_under_Uncertainty)

14. Eisenhardt K. M. Making Fast Strategic Decisions in High-Velocity Environments // Academy of Management Journal. – 1989. – Vol. 32, No. 3. – P. 543–576. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://journals.aom.org/doi/10.5465/256434>

15. Ferrar J., Verghese N. How Leading Companies Turn People Analytics Into Business Value // Digital HR Leaders Podcast. – 2025. – URL: <https://www.myhrfuture.com/digital-hr-leaders-podcast/how-leading-companies-turn-people-analytics-into-business-value>

16. Gao Y., González V. A., Yiu T. W., Cabrera-Guerrero G., Deng R. Predicting Construction Workers' Intentions to Engage in Unsafe Behaviours Using Machine Learning Algorithms and Taxonomy of Personality // *Buildings*. – 2022. – Vol. 12, No. 6. – 841. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://doi.org/10.3390/buildings12060841>
17. Gautier A. Resource Allocation for Constrained Multi-Agent Systems [Electronic resource]: PhD Thesis. – University of Oxford, 2023. – 212 p. – [Electronic resource]. – Access mode: <https://ora.ox.ac.uk/objects/uuid:443266f2-c49a-467a-a911-1c6bf6a0067a>
18. 18th ISoP Annual Meeting “Pharmacovigilance without borders”, Geneva, Switzerland, 11–14 November 2018 : Abstracts // *Drug Safety*. – 2018. – Vol. 41. – P. 1103–1273. DOI: 10.1007/s40264-018-0719-2 [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40264-018-0719-2>
19. Grant R. M. Prospering in dynamically-competitive environments: Organizational capability as knowledge integration // *Organization Science*. – 1996. – Vol. 7. – No. 4. – P. 375–387. DOI: 10.1287/orsc.7.4.375 [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://surl.lt/jnndzb>
20. Guessoum Z. Adaptive agents and multiagent systems // *IEEE Distributed Systems Online*. – 2004. – Vol. 5. – No. 7. DOI: 10.1109/MDSO.2004.10 [Электронный ресурс] – Режим доступа: [https://www.researchgate.net/publication/3453143\\_Adaptive\\_agents\\_and\\_multiagent\\_systems](https://www.researchgate.net/publication/3453143_Adaptive_agents_and_multiagent_systems)
21. Hausmann R. Economic Development and the Accumulation of Know-how // *Welsh Economic Review*. – 2016. – Vol. 24. – P. 13–16. – DOI: 10.18573/j.2016.10049.
22. Hillson D. A. Towards a Risk Maturity Model // *International Journal of Project & Business Risk Management*. – 1997. – Vol. 1, No. 1. – P. 35–45. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://risk-doctor.com/wp-content/uploads/2020/06/RMM-IJPBRM-Mar97.pdf>
23. Hofstede G. Culture's Consequences: International Differences in Work-Related Values. – Beverly Hills, CA : Sage Publications, 1984. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=2010603>

24. Jennings, N. R. (2001). An agent-based approach for building complex software systems. *Communications of the ACM*, 44(4), 35–41. <https://doi.org/10.1145/367211.367250>
25. Jennings, N. R., & Wooldridge, M. (1995). Applications of intelligent agents. In *Agent Technology: Foundations, Applications, and Markets* (pp. 3–28). Springer. <https://www.jasss.org/2/3/sichman.html>
26. Judson L., Paul V. K. Uncertainty Factors Affecting Construction Project Cost // *The SPA Journal of Planning and Architecture*. – 2019. – Vol. 23, No. 3–4. – С. 1–17. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://www.researchgate.net/publication/357504962\\_Uncertainty\\_Factors\\_Affecting\\_Construction\\_Project\\_Cost](https://www.researchgate.net/publication/357504962_Uncertainty_Factors_Affecting_Construction_Project_Cost)
27. Katiyar A., Kumar P. A Review of Internet of Things (IoT) in Construction Industry: Building a Better Future // *International Journal of Advanced Computing Science and Engineering*. – 2021. – Vol. 3, No. 2. – P. 65–72. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://www.researchgate.net/publication/367619119\\_A\\_Review\\_of\\_Internet\\_of\\_Things\\_IoT\\_in\\_Construction\\_Industry\\_Building\\_a\\_Better\\_Future](https://www.researchgate.net/publication/367619119_A_Review_of_Internet_of_Things_IoT_in_Construction_Industry_Building_a_Better_Future)ResearchGate
28. Khatun M. T., Hiekata K., Nakashima T. Multi-project resource allocation under uncertainty: a concept of using resource buffers // *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*. – 2024. – Vol. 18, No. 7. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://www.researchgate.net/publication/386166242\\_Multi-project\\_resource\\_allocation\\_under\\_uncertainty\\_a\\_concept\\_of\\_using\\_resource\\_buffers](https://www.researchgate.net/publication/386166242_Multi-project_resource_allocation_under_uncertainty_a_concept_of_using_resource_buffers)
29. Lawson B., Samson D. Developing innovation capability in organisations: a dynamic capabilities approach / B. Lawson, D. Samson. // *International Journal of Innovation Management*, 2001. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://www.researchgate.net/publication/228694840\\_DEVELOPING\\_INNOVATION\\_CAPABILITY\\_IN\\_ORGANISATIONS\\_A\\_DYNAMIC\\_CAPABILITIES\\_APPROACH](https://www.researchgate.net/publication/228694840_DEVELOPING_INNOVATION_CAPABILITY_IN_ORGANISATIONS_A_DYNAMIC_CAPABILITIES_APPROACH)
30. Leffingwell D., Knaster R., Oren I., Jemilo D. *SAFe Reference Guide: Scaled Agile Framework for Lean Enterprises*. – Boston : Pearson, 2018. – 793 p.

[Электронный ресурс] – Режим доступа:

[https://books.google.com.ua/books/about/SAFE\\_Reference\\_Guide.html?id=STqvtAEACAAJ](https://books.google.com.ua/books/about/SAFE_Reference_Guide.html?id=STqvtAEACAAJ)

31. Hao J., Li C., Yuan R., Ahmed M., Khan M. A., Oláh J. The Influence of the Knowledge-Based Network Structure Hole on Enterprise Innovation Performance: The Threshold Effect of R&D Investment Intensity // Sustainability. – 2020. – Vol. 12. – No. 15. – Article 6155. DOI: 10.3390/su12156155 [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.mdpi.com/2071-1050/12/15/6155>

32. Vivas López S. Competitive advantage and strategy formulation: The key role of dynamic capabilities // Management Decision. – 2005. – Vol. 43. – No. 5. – P. 661–669. DOI: 10.1108/00251740510597699 [Электронный ресурс] – Режим доступа: [https://www.researchgate.net/publication/240258664\\_Competitive\\_advantage\\_and\\_strategy\\_formulation\\_The\\_key\\_role\\_of\\_dynamic\\_capabilities](https://www.researchgate.net/publication/240258664_Competitive_advantage_and_strategy_formulation_The_key_role_of_dynamic_capabilities)

33. Marinho M. L. M., Sampaio S. C. B., Lima T. L. A., Moura H. P. A Systematic Review of Uncertainties in Software Project Management // arXiv preprint arXiv:1412.3690. – 2014. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://arxiv.org/abs/1412.3690>

34. Mazzetto S. Interdisciplinary Perspectives on Agent-Based Modeling in the Architecture, Engineering, and Construction Industry: A Comprehensive Review // Buildings. – 2024. – Vol. 14, No. 11. – Article 3480. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://doi.org/10.3390/buildings14113480>

35. Miceli M., Posada J. The Data-Production Dispositif // arXiv preprint arXiv:2205.11963. – 2022. – URL: <https://arxiv.org/abs/2205.11963>

36. Mintzberg H. The Structuring of Organizations: A Synthesis of the Research. – Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1979. – 512 с. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://archive.org/details/structuringoforg0000mint>

37. Müller, J. P., Pischel, M., & Thiel, M. (1995). Modeling reactive behaviour in vertically layered agent architectures. In M. J. Wooldridge & N. R. Jennings (Eds.), Intelligent Agents: Theories, Architectures, and Languages (pp. 261–276). Springer-Verlag. DOI: <https://doi.org/10.1007/3-540-58855-8>

38. Nezamoddini, N., & Gholami, A. (2022). A Survey of Adaptive Multi-Agent Networks and Their Applications in Smart Cities. Smart Cities, 5(1), 318–347. <https://doi.org/10.3390/smartcities5010019>

39. Nonaka I., Takeuchi H. The Knowledge-Creating Company: How Japanese Companies Create the Dynamics of Innovation. – New York: Oxford University Press, 1995. – 284 с. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://global.oup.com/academic/product/the-knowledge-creating-company-9780195092691>
40. Preisler, T., & Renz, W. (2015). Structural adaptations for self-organizing multi-agent systems. ResearchGate. Доступно за посыланням: [https://www.researchgate.net/publication/274248803\\_Structural\\_Adaptations\\_for\\_Self-Organizing\\_Multi-Agent\\_Systems](https://www.researchgate.net/publication/274248803_Structural_Adaptations_for_Self-Organizing_Multi-Agent_Systems)
41. Raoufi M., Fayek A. R. Hybrid fuzzy Monte Carlo agent-based modeling of workforce motivation and performance in construction // Construction Innovation. – 2021. – Vol. 21, No. 3. – С. 398–416. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://doi.org/10.1108/CI-03-2020-0045>
42. Rehman, M. M. (2025). Agile Project Management: A Deep Dive into Scrum, Kanban, and SAFe. GETUS Communications Ltd. Доступно за посыланням: <https://www.linkedin.com/pulse/agile-project-management-deep-dive-scrum-kanban-safe-rehman-mmr--mmncf>
43. Reinwald P., Leitner S., Wall F. An Agent-Based Model of Delegation Relationships With Hidden-Action: On the Effects of Heterogeneous Memory on Performance // arXiv preprint arXiv:2009.07124. – 2020. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://arxiv.org/abs/2009.07124>
44. Reve T. Torger Reve – BI Norwegian Business School. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.bi.no/om-bi/ansatte/institutt-for-strategi-og-entreprenorskap/torger-reve/>
45. Sadeghi, S. Employee Well-being in the Age of AI: Perceptions, Concerns, Behaviors, and Outcomes [Электронный ресурс] / S. Sadeghi // arXiv preprint. – 2024. – № arXiv:2412.04796. – Режим доступа: <https://arxiv.org/pdf/2412.04796>
46. Schreyögg G., Kliesch-Eberl M. How dynamic can organizational capabilities be? A temporal perspective on capability development / G. Schreyögg, M. Kliesch-Eberl // Organization Science. – 2007. – Vol. 18, № 2. – P. 210–224. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://surl.li/rvuyvph>

47. Schweitzer F., Garcia D. An Agent-Based Model of Collective Emotions in Online Communities // arXiv preprint arXiv:1006.5305. – 2010. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://arxiv.org/abs/1006.5305>
48. Seidl D. Luhmann's Theory of Autopoietic Social Systems / D. Seidl // Münchner betriebswirtschaftliche Beiträge. – München, 2004. – Vol. 2004-2. – 38 p. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://www.researchgate.net/publication/277293382\\_Luhmann's\\_theory\\_of\\_autopoietic\\_social\\_systems](https://www.researchgate.net/publication/277293382_Luhmann's_theory_of_autopoietic_social_systems)
49. Sepúlveda, J. and Vasquez, E. (2014) Multicriteria Analysis for Improving the Innovation Capability in Small and Medium Enterprises in Emerging Countries. *American Journal of Industrial and Business Management*, **4**, 199-208. doi: [10.4236/ajibm.2014.44027](https://doi.org/10.4236/ajibm.2014.44027).
50. Paliszkievicz J. (ed.), Guerrero Cusumano J. L., Gołuchowski J. (eds.). Trust, Digital Business and Technology: Issues and Challenges. – 1st ed. – London : Routledge, 2022. – 256 p. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.amazon.ca/Trust-Digital-Business-Technology-Challenges-ebook/dp/B0B8TNXW7X>
51. Hwang J. The role of emotional intelligence in team dynamics // International Journal of Science and Research Archive. – 2024. – Vol. 13. – No. 2. – P. 1396–1406. DOI: 10.30574/ijusra.2024.13.2.1875. [Электронный ресурс] – Режим доступа: [https://ijusra.net/sites/default/files/fulltext\\_pdf/IJSRA-2024-1875.pdf](https://ijusra.net/sites/default/files/fulltext_pdf/IJSRA-2024-1875.pdf)
52. Зелтен, Р. (1965) Spieltheoretische Behandlung eines Oligopolmodells mit Nachfrageträgheit. *Zeitschrift für die Gesamte Staatswissenschaft*, 121, 301-324 і 667-689. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://surl.li/ifxnev>
53. Sidiropoulos G., Kiourt C., Moussiades L. Metis: Multi-Agent Based Crisis Simulation System // arXiv preprint arXiv:2009.03934. – 2020. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://arxiv.org/abs/2009.03934>
54. Soleymani M., Bonyani M., Attarzadeh M. Autonomous Resource Management in Construction Companies Using Deep Reinforcement Learning Based on IoT // arXiv preprint arXiv:2208.08087. – 2022. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://arxiv.org/abs/2208.08087>

55. Stepanov V., Ferson S. Agent-based models under uncertainty // F1000Research. – 2024. – Vol. 12. – Article 834. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://f1000research.com/articles/12-834>

56. Sükei E., Norbury A., Pérez-Rodríguez M. M., Artés-Rodríguez A. Predicting Emotional States Using Behavioral Markers Derived From Passively Sensed Data: Data-Driven Machine Learning Approach // JMIR Mhealth Uhealth. – 2021. – Vol. 9, No. 3. – e24465. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC8088855/>

57. Syvytskyi Y., Shevchenko V. Computer Simulation Model of the Organization at the Stage of Transformation for the Purpose of Adaptation to New Projects // CEUR Workshop Proceedings. – 2024. – Vol. 3806. – С. 1–12. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://ceur-ws.org/Vol-3806/S\\_61\\_Shevchenko\\_Syvytskyi.pdf](https://ceur-ws.org/Vol-3806/S_61_Shevchenko_Syvytskyi.pdf)

58. Grześ M., Taylor M. E. (eds.) Proceedings of the Adaptive and Learning Agents Workshop (ALA 2010), held in conjunction with the Ninth International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS-10). – Toronto, Canada, May 10, 2010. – 99 p. [Electronic resource] – Access mode: <https://www.cs.kent.ac.uk/people/staff/mg483/documents/ala10proceedings.pdf>

59. Teece D. J. Explicating Dynamic Capabilities: The Nature and Microfoundations of (Sustainable) Enterprise Performance // Strategic Management Journal. – 2007. – Vol. 28. – No. 13. – P. 1319–1350. DOI: 10.1002/smj.640. [Электронный ресурс] – Режим доступа: [http://sjbae.pbworks.com/w/file/fetch/93336378/Teece%20\(2007\).%20Explicating%20dynamic%20capabilities\\_The%20nature%20and%20microfoundations%20of%20\(sustainable\)%20.pdf](http://sjbae.pbworks.com/w/file/fetch/93336378/Teece%20(2007).%20Explicating%20dynamic%20capabilities_The%20nature%20and%20microfoundations%20of%20(sustainable)%20.pdf)

60. Xu, W. , Carifio, J. and Dagostino, L. (2013) Validating a Research-Based Monograph for Teaching Post-Secondary EFL Reading Teachers the Meta-Cognitive Aspects of How to Teach Summarizing Strategies for Expository Text: Phase II of a Harvard Business School Type Case Study. *Creative Education*, 4, 322-334. doi: [10.4236/ce.2013.45048](https://doi.org/10.4236/ce.2013.45048).

61. Weiss, G. (Ed.). (2013). Multiagent Systems: A Modern Approach to Distributed Artificial Intelligence. Cambridge: MIT Press. Доступно за посыланьям: <https://mitpress.mit.edu/books/multiagent-systems>

62. Wenger E. *Communities of Practice: Learning, Meaning, and Identity*. – Cambridge: Cambridge University Press, 1998. – 336 с. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://doi.org/10.1017/CBO9780511803932>
63. Xia Y., Zhu J., Zhu L. Dynamic Role Discovery and Assignment in Multi-Agent Task Decomposition // *Complex & Intelligent Systems*. – 2023. – Vol. 9, No. 2. – P. 6211–6222. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40747-023-01071-x>
64. Yang B., Liu B., Han Y., Meng X., Wang Y., Yang H., Xia J. Multiagent Reinforcement Learning Enhanced Decision-making of Crew Agents During Floor Construction Process // *arXiv preprint arXiv:2409.01060*. – 2024. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://arxiv.org/abs/2409.01060>
65. Hongladarom S. Shoshana Zuboff, *The Age of Surveillance Capitalism: The Fight for a Human Future at the New Frontier of Power* // *AI & Society*. – 2020. – Vol. 38. – No. 6. DOI: 10.1007/s00146-020-01100-0. [Електронний ресурс] – Режим доступу: [https://www.researchgate.net/publication/346844216\\_Shoshana\\_Zuboff\\_The\\_age\\_of\\_surveillance\\_capitalism\\_the\\_fight\\_for\\_a\\_human\\_future\\_at\\_the\\_new\\_frontier\\_of\\_power\\_New\\_York\\_Public\\_Affairs\\_2019\\_704\\_pp\\_ISBN\\_978-1-61039-569-4\\_hardcover\\_978-1-61039-270-0\\_eboo](https://www.researchgate.net/publication/346844216_Shoshana_Zuboff_The_age_of_surveillance_capitalism_the_fight_for_a_human_future_at_the_new_frontier_of_power_New_York_Public_Affairs_2019_704_pp_ISBN_978-1-61039-569-4_hardcover_978-1-61039-270-0_eboo)
66. Пілецька С.Т., Коритько Т.Ю., Кравчук Н.М. Механізм забезпечення економічної безпеки підприємства. Науковий журнал. Вісник економічної науки України. №1 (42). 2022. С.64–68. DOI: [https://doi.org/10.37405/1729-7206.2022.1\(42\).64-69](https://doi.org/10.37405/1729-7206.2022.1(42).64-69) .
67. Бідюк П. І., Тимошук О. Л., Коваленко А. Є., Коршевніук Л. О. Системи і методи підтримки прийняття рішень : навч. посіб. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 259 с. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/73de1d73-bd75-41b3-b775-a5bcfa95a454/content>
68. Берсін, Дж. Визначний посібник з досвіду працівників / Дж. Берсін. – 2021. – Режим доступу: <https://joshbersin.com/ex-definitive-guide-2021/>
69. Боррманн А., Кеніг М., Кох К., Бесц Я. Інформаційне моделювання будівель: технологічні основи та галузева практика. – Берлін: Springer, 2018. – 584 с. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-319-92862-3>

70. Вайдмен, Р. М. (2001). Total Project Management of Complex Projects: Improving Performance with Modern Techniques. – AEW Services. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [https://www.researchgate.net/publication/228467516\\_Total\\_Project\\_Management\\_of\\_Complex\\_Projects\\_Improving\\_Performance\\_with\\_Modern\\_Techniques](https://www.researchgate.net/publication/228467516_Total_Project_Management_of_Complex_Projects_Improving_Performance_with_Modern_Techniques)
71. Данілов С. Принципи конфігурації агентних взаємодій у складному трудовому середовищі ІТ-проектів. Шляхи підвищення ефективності, вип.. 56(2), 2025, С.3-13. DOI: [https://doi.org/10.32347/2707-501x.2025.56\(2\).3-13](https://doi.org/10.32347/2707-501x.2025.56(2).3-13)
72. Видатний світовий менеджер Пітер Друкер. Реферат. Освіта.УА. URL: <https://osvita.ua/vnz/reports/management/14669/>
73. Kloeden, P.E. & Platen, E. (1992). Numerical Solution of Stochastic Differential Equations. Springer, Berlin. ISBN 3-540-54062-8.
74. Вулдрідж, М., & Дженнінгс, Н. (1995). Intelligent agents: theory and practice. The Knowledge Engineering Review, 10(2), 115–152. <https://doi.org/10.1017/S0269888900008122>
75. Makarchuk I., Malyshko V., Yaremenko L. Financial Security of Enterprises: Characteristics, Components, Main Threats and Dangers // Економічний вісник університету. – 2023. – № 56. – Р. 183–193. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.cceol.com/search/article-detail?id=1148027>
76. Грушецький А. М. Агентне моделювання: основні ідеї та перспективи. — Наукові записки НаУКМА. — 2014. — Т. 161: Соціологічні науки. — С. 21–27. — [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://ekmair.ukma.edu.ua/handle/123456789/3194>
77. Збірник матеріалів Х Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих вчених «Наукова молодь-2022» (Київ, 15 листопада 2022 р.). К.: КОМПРИНТ, 2022. 294 с. ISBN 978-617-8269-26-5
78. Балан О. С. Сценарне управління процесом прийняття інвестиційних рішень // Інновації. Інвестиції. Конкурентоспроможність. – 2014. – № 5. – С. 128–132. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://economics.net.ua/files/archive/2014/No5/128-132.pdf>
79. Інформаційно-аналітичне забезпечення управління фінансовоекономічною безпекою держави, регіону, суб'єктів господарювання

в умовах COVID-19: матеріали X Міжнар. наук.-практ. конф., Харків, 18-19 листопада 2021 року / Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2021. – 321 с. УДК 005.934:[330.34.1:657:616-036.21](06)

80. Проблеми ефективності професійної мовної комунікації в умовах інформаційної агресії : матеріали II Всеукр. наук.-практ. конф. з міжнародною участю (м. Київ, 28 листопада 2025 року). Київ : Київський інститут Національної гвардії України, 2025. 320 с. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://surl.li/qzbzlf>

81. Положення про порядок формування та організацію роботи Екзаменаційних комісій в Луцькому національному технічному університеті з проведення підсумкової атестації здобувачів вищої освіти». URL: <https://drive.google.com/file/d/13safvasgGZ4S6-Y-gU4DzQOFjw9YzeAC/view>.

82. Канеман Д. Мислення, швидке і повільне. – Нью-Йорк: Farrar, Straus and Giroux, 2011. – 499 с. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [https://en.wikipedia.org/wiki/Thinking,\\_Fast\\_and\\_Slow](https://en.wikipedia.org/wiki/Thinking,_Fast_and_Slow)

83. Кононович Т., М'ясоїд П. Теорія перспектив в процесах прийняття рішення: аналіз за допомогою Single Case Study // Психологические исследования. – 2020. – Т. 13. – № 70. DOI: 10.54359/ps.v13i70.200. [Електронний ресурс] – Режим доступу: [https://www.researchgate.net/publication/359101182\\_Teorija\\_perspektiv\\_v\\_processah\\_priyatia\\_r esenia\\_analiz\\_s\\_pomосу\\_Single\\_Case\\_Study](https://www.researchgate.net/publication/359101182_Teorija_perspektiv_v_processah_priyatia_r esenia_analiz_s_pomосу_Single_Case_Study)

84. Касьяненко, В. Є. Управління економічною ефективністю підприємства: кваліф. робота ... магістра : 073 / В. Є. Касьяненко. – Запоріжжя : ЗНУ, 2024. – 85 с. – Режим доступу: [https://dspace.znu.edu.ua/jspui/bitstream/12345/25266/1/06%20Касьяненко\\_В\\_Є\\_кваліф\\_робота\\_магістра\\_ЕК\\_2024.pdf](https://dspace.znu.edu.ua/jspui/bitstream/12345/25266/1/06%20Касьяненко_В_Є_кваліф_робота_магістра_ЕК_2024.pdf)

85. Коваленко О. Є. Моделі і методи побудови конвергентних систем ситуаційного управління : дис. ... д-ра техн. наук : 05.13.05 – комп'ютерні системи та компоненти. – Київ : Інститут проблем моделювання в енергетиці ім. Г. Є. Пухова НАН України, 2021. – 113 с. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://ipme.kiev.ua/wp-content/uploads/2021/04/%D0%94%D0%B8%D1%81%D0%B5%D1%80%D1%82%D0%B0%>

[D1%86%D1%96%D1%8F\\_%D0%9A%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D0%BB%D0%B5%D0%BD%D0%BA%D0%BE-%D0%9E.%D0%84..pdf](#)

86. Liu J. Reactive Agents for Adaptive Image Analysis // Proceedings of the Second International Conference on Autonomous Agents (AGENTS '98). – 1998. – P. 441–448. DOI: 10.1145/280765.280886. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://dl.acm.org/doi/10.1145/280765.280886>

87. Мозаїка проєктів. (2024). Project Size and Categorisation – Guideline Updated. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://mosaicprojects.wordpress.com/2024/07/01/project-size-and-categorization-guideline-updated/>

88. Нуйтен, В. В. Л., & де Вріс, Б. (2024). Reactive Environments for Active Inference Agents with RxEnvironments.jl. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://arxiv.org/abs/2409.11087>

89. Штучний інтелект у вищій освіті: ризики та перспективи інтеграції: матеріали всеукраїнського науково-педагогічного підвищення кваліфікації, 1 липня – 11 серпня 2024 року. – Львів – Торунь : Liha-Pres, 2024. 328 с. ISBN 978-966-397-412-5

90. Паченца, Ф. (2019). Reasoning in Highly Reactive Environments. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://arxiv.org/abs/1909.08260>

91. Сучасні аспекти модернізації науки: стан, проблеми, тенденції розвитку: матеріали LVII-ої Міжнародної науково-практичної конференції / за ред. І.В. Жукової, Є.О. Романенка. (м. Клуж-Напока (Румунія)): ВАДНД, 07 червня 2025 р. 244 с. Режим доступу: <https://perspectives.pp.ua/public/site/conferency/conf-57.pdf>

92. Бідюк П. І., Тимошук О. Л., Коваленко А. Є., Коршевніук Л. О. Системи і методи підтримки прийняття рішень : підручник. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/6958f683-fbac-4506-9c85-5115c8f8b4c6/content>

93. Пінто, М. Б. (1990). Determinants of Cross-Functional Cooperation in the Project Implementation Process. – Project Management Journal, 21(2), 13–20. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.wcu.edu/pmi/1996/J91JUN13.PDF>

94. Балджи М.Д. Економічний ризик та методи його вимірювання. Навчальний посібник. – Харків: Промарт, 2015. – 300 с. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://dspace.oneu.edu.ua/server/api/core/bitstreams/2e8dcd17-469c-4963-8cf4-6852daad2ad2/content>
95. Цифрова трансформація освіти: теоретико-методичні засади : збірник мат. Міжнародної науково-практичної конф., присвяч. 70-річчю проф. В. П. Сергієнка. – Київ : Вид-во УДУ імені Михайла Драгоманова, 2024. – 485 с. ISBN 978-966-931-316-4
96. Серета Г. Об'єкт управління персоналом в Індустрії 4.0 // Вісник Хмельницького національного університету. Економічні науки. – 2024. – Т. 332. – № 4. – С. 214–219. DOI: 10.31891/2307-5740-2024-332-31.
97. Довгаль О. А. Інтелектуалізація глобального економічного розвитку : монографія / О. А. Довгаль, Є. В. Фоміна. – Харків : ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2022. – 192 с. ISBN 978-966-285-738-2
98. Системні дослідження та інформаційні технології. – 2015. – № 1. – Режим доступу: <https://surl.li/ndpeir>
99. Системні науки та інформатика. – 2024. – Режим доступу: [http://mmsa.kpi.ua/sites/default/files/systemni\\_nauky\\_ta\\_informatyka\\_2024.pdf](http://mmsa.kpi.ua/sites/default/files/systemni_nauky_ta_informatyka_2024.pdf)
100. Дудар А. В., Осипенко І. М. Моделі прийняття рішень в управлінні // Бізнес Інформ. – 2011. – № 5(2). – С. 90–91. [Електронний ресурс] – Режим доступу: [https://www.business-inform.net/export\\_pdf/business-inform-2011-5\\_2-pages-90\\_91.pdf](https://www.business-inform.net/export_pdf/business-inform-2011-5_2-pages-90_91.pdf)
101. Неітеративні, еволюційні та мультиагентні методи синтезу нечіткологічних і нейромережних моделей : монографія / під заг. ред. С. О. Субботіна. – Запоріжжя : ЗНТУ, 2009. – 375 с. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://eir.zntu.edu.ua/handle/123456789/2643>
102. Kolumbet V. P., Svynchuk O. V. Simulation of Resource Distribution in Large Information Systems Based on Multiagent Approach // Телекомунікаційні та інформаційні технології. – 2021. – № 3 (72). DOI: 10.31673/2412-4338.2021.030411. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://tit.dut.edu.ua/index.php/telecommunication/article/view/2389/2272>

103. Стельмах О. В., Данілов С. Ю., Кривда К. Є., Науменко Є. В. Системний аналіз концептуальних основ управління трудовими ресурсами в ІТ-середовищі з урахуванням трансформації парадигм під впливом динаміки цифрової економіки // Будівельне виробництво. – 2025. – № 80. – С. 77–85. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <file:///C:/Users/Hp/Downloads/554-Article%20Text-524-1-10-20251214.pdf>

104. Феррар Дж., Вергезе Н. How Leading Companies Turn People Analytics Into Business Value [Електронний ресурс] / Дж. Феррар, Н. Вергезе // myHRfuture. – 2024. – URL: <https://www.myhrfuture.com/digital-hr-leaders-podcast/how-leading-companies-turn-people-analytics-into-business-value>

105. Хмельницький А. В. Цифрова модернізація публічного управління в Україні: роль штучного інтелекту у формуванні суспільної цінності та забезпеченні керованості : дис. на здобуття ступеня доктора філософії : спец. 281 «Публічне управління та адміністрування». – Харків : Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, 2025. – 230 с. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://karazin.ua/storage/static-content/source/documents/aspirantura/zakhysty/Khmelnyskyi/15-07/dysertatsia-15-07.pdf>

106. Черноус Г. О. Моделювання процесу прийняття управлінських рішень в соціально-економічних системах на основі інтелектуального аналізу даних : дис. на здобуття наукового ступеня доктора економічних наук : спец. 08.00.11 «Математичні методи, моделі та інформаційні технології в економіці». – Київ : Київський національний університет імені Тараса Шевченка, 2015. – 485 с. [Електронний ресурс] – Режим доступу: [https://scc.knu.ua/upload/iblock/af3/dis\\_Chornous%20G,O..p](https://scc.knu.ua/upload/iblock/af3/dis_Chornous%20G,O..p)

107. Стратегія розвитку штучного інтелекту в Україні: монографія / А.І.Шевченко, С.В.Барановський [За заг. ред. А.І.Шевченка]. Київ: ІПШІ, 2023. 305 с. ISBN: 978-617-7894-89-5. [Електронний ресурс] – Режим доступу: [https://doi.org/10.15407/development\\_strategy\\_2023](https://doi.org/10.15407/development_strategy_2023)

108. Данілов С. Принципи конфігурації агентних взаємодій у складному трудовому середовищі ІТ-проектів. Шляхи підвищення

ефективності будівництва, 2025, 2(56), 3–13. [https://doi.org/10.32347/2707-501x.2025.56\(2\).3-13](https://doi.org/10.32347/2707-501x.2025.56(2).3-13) <https://ways.knuba.edu.ua/article/view/348032/334960>

109. Козак А., Данілов С., Поліщук О., Устинов Є. Структура інтеграційного підходу до оптимізації критеріально-параметричної системи управління економікою та менеджментом будівельних проєктів. Шляхи підвищення ефективності будівництва, 2025, 1(55), 201–216. [https://doi.org/10.32347/2707-501x.2025.55\(1\).201-216](https://doi.org/10.32347/2707-501x.2025.55(1).201-216).  
<https://ways.knuba.edu.ua/article/view/327012/316818>

110. Данілов С.Ю., Стельмах О.В., Кривда К.Є., Науменко Є.В. Теоретичні основи мультиагентного моделювання у системах управління трудовими ресурсами з акцентом на міждисциплінарну інтеграцію та поведінкову складову. Просторовий розвиток, 2025, 14, С. 110-121 <https://doi.org/10.32347/2786-7269.2025.14.110-121> .  
<https://library.knuba.edu.ua/books/zbirniki/29/2025/SD2514.pdf>

111. Малихін М.О., Данілов С.Ю., Іванина О.М., Зяхор Д.О. Трансформація економічних підходів до диверсифікації підприємницької діяльності в контексті будівництва. Просторовий розвиток, 2025, 13, С. 358-373 <https://doi.org/10.32347/2786-7269.2025.13.358-373>  
<https://library.knuba.edu.ua/books/zbirniki/29/2025/SD2513.pdf>

112. Данілов С.Ю. Класифікація типів невизначеності в управлінні іт-проєктами та їхній вплив на формування стратегій агентного розподілу трудових ресурсів. Просторовий розвиток, 2025, 15, С. 313-324 <https://doi.org/10.32347/2786-7269.2025.15.313-324>  
<https://library.knuba.edu.ua/books/zbirniki/29/2025/SD2515.pdf>

113. Стельмах О., Данілов С., Кривда К., Науменко Є. Системний аналіз концептуальних основ управління трудовими ресурсами в іт-середовищі з урахуванням трансформації парадигм під впливом динаміки цифрової економіки. будівельне виробництво, 2025, 80, 77-85. <https://doi.org/10.36750/2524-2555.80.77-85>. <https://ndibv-building.com.ua/index.php/building/article/view/554/286>

114. Данілов С.Ю. Моделі реактивної адаптації агентів до контекстів невизначеності та зміни параметрів навколишнього середовища. Управління розвитком складних систем. 2025. № 64. С. 185 – 193

<https://doi.org/10.32347/2412-9933.2025.64.185-193>

<https://urss.knuba.edu.ua/files/zbirnyk-64/185-193.pdf>

115. Козак А., Герасимчук Я., Стельмах О., Данілов С. Шляхи модернізації системи організаційно-технологічного моделювання проєктів будівництва в бік подолання можливих невизначеностей та загроз циклу проєктів будівельного девелопменту. Будівельне виробництво, 2024, 77, 31-42.

<https://doi.org/10.36750/2524-2555.77.31-42>

<https://ndibv->

[building.com.ua/index.php/Building/article/view/506/238](https://ndibv-building.com.ua/index.php/Building/article/view/506/238)

116. Козак А., Соболев Д., Данілов С., Оксенчук Р., Шаршун Ф. Концептуалізація енергоадаптованих будівельних проєктів у контексті сталого розвитку, регуляторного поля та цифрової трансформації. Шляхи підвищення ефективності будівництва, 2022, 2(49), 305–319. [https://doi.org/10.32347/2707-501x.2022.49\(2\).305-319](https://doi.org/10.32347/2707-501x.2022.49(2).305-319)

<https://ways.knuba.edu.ua/article/view/342154/330046>

117. Данілов С.Ю. Алгоритмічне забезпечення самонавчання агентів і вибору стратегій взаємодії в умовах обмеженого доступу до інформації. Налаштування освітніх траєкторій в підготовці менеджерів будівництва в контексті відбудови України: матеріали круглого столу, 30 травня 2023 р. К.: КНУБА, 2023. С. 25. . <https://lnk.ua/FL4IPeGIId>

118. Данілов С.Ю. Розробка варіативних моделей мультиагентного розподілу із залученням нечіткої логіки, сценарного аналізу та теорії ймовірностей. Енергоощадні машини і технології: програма V Міжнародної науково-практичної конференції, 22-24 травня 2024 р. К.: КНУБА, 2024. С. 44

<https://lnk.ua/wmbp18Yos>

119. Кричевська Ю.В., Грабчак П.В., Данілов С.Ю. Теоретико-методичні основи організації ресурсів та технологічного планування в проєктах зведення багатоповерхових будівель на основі девелоперських і мультиагентних моделей. Проблеми генезису економіки інтелектуально-

інноваційного капіталу: матеріали доповідей V Міжнародної науково-практичної конференції (м. Київ, 4-5 листопада 2025 року) / за заг. ред. В. М. Лича, Л.О. Згалат-Лозинської. Київ: КНУБА, 2025. С. 653-655 [https://cf.knuba.edu.ua/wp-content/uploads/2026/01/Konference-program-KNUCA-4-5\\_11\\_2025.pdf](https://cf.knuba.edu.ua/wp-content/uploads/2026/01/Konference-program-KNUCA-4-5_11_2025.pdf)

120. Грабчак П.В., Данілов С.Ю. Інтеграція організаційно-технологічних рішень у девелоперських проєктах будівництва та моделей мультиагентного розподілу трудових ресурсів в умовах невизначеності на ґрунті наукового процесу. Актуальні проблеми освітнього процесу в контексті європейського вибору України: матеріали VIII Міжнародної конференції (12 листопада 2025 року). Київ: Видавництво Ліра-К, 2025. С. 620-621 <https://repository.knuba.edu.ua/items/d0b87d1f-fb32-4375-8961-42e490aeda9b>

121. Данілов С.Ю., Кривда К.Є. Моделі та методи мультиагентного управління ресурсами та моніторингу стійкості ІТ-проєктів і будівельних мереж в умовах невизначеності. Архітектура, Будівництво, Дизайн: Виробництво, Інформатизація, Менеджмент: Міжнародний науково-технічний форум: програма та тези доповідей (24-25 листопада 2025 р., м. Київ). Київ : Видавництво Ліра-К, 2025. С. 522-523 <https://drive.google.com/file/d/1h5Zrq3IXNGrt06JuGw2-5oeijf26i8SX/view>

## ДОДАТКИ

### Додаток А. СПИСОК ПРАЦЬ ЗДОБУВАЧА

*Статті у наукових фахових виданнях України, які індексуються в міжнародних наукометричних базах:*

1. Данілов С. Принципи конфігурації агентних взаємодій у складному трудовому середовищі ІТ-проектів. Шляхи підвищення ефективності будівництва, 2025, 2(56), 3–13. [https://doi.org/10.32347/2707-501x.2025.56\(2\).3-13](https://doi.org/10.32347/2707-501x.2025.56(2).3-13) <https://ways.knuba.edu.ua/article/view/348032/334960>

2. Козак А., Данілов С., Поліщук О., Устинов Є. Структура інтеграційного підходу до оптимізації критеріально-параметричної системи управління економікою та менеджментом будівельних проектів. Шляхи підвищення ефективності будівництва, 2025, 1(55), 201–216. [https://doi.org/10.32347/2707-501x.2025.55\(1\).201-216](https://doi.org/10.32347/2707-501x.2025.55(1).201-216).

<https://ways.knuba.edu.ua/article/view/327012/316818> (*Особистий внесок здобувача*: розроблено інтеграційний підхід до оптимізації критеріально-параметричної системи управління будівельними проектами, який забезпечує узгодження економічних, ресурсних і управлінських рішень у цифровому середовищі)

3. Данілов С.Ю., Стельмах О.В., Кривда К.Є., Науменко Є.В. Теоретичні основи мультиагентного моделювання у системах управління трудовими ресурсами з акцентом на міждисциплінарну інтеграцію та поведінкову складову. Просторовий розвиток, 2025, 14, С. 110-121 <https://doi.org/10.32347/2786-7269.2025.14.110-121> .

<https://library.knuba.edu.ua/books/zbirniki/29/2025/SD2514.pdf> (*Особистий внесок здобувача*: сформовано теоретичні засади мультиагентного моделювання управління трудовими ресурсами з урахуванням поведінкових факторів та міждисциплінарної інтеграції, що підвищує ефективність організації будівництва).

4. Малихін М.О., Данілов С.Ю., Іванина О.М., Зяхор Д.О. Трансформація економічних підходів до диверсифікації підприємницької діяльності в

контексті будівництва. Просторовий розвиток, 2025, 13, С. 358-373  
<https://doi.org/10.32347/2786-7269.2025.13.358-373>

<https://library.knuba.edu.ua/books/zbirniki/29/2025/SD2513.pdf> (Особистий внесок здобувача: обґрунтовано напрями трансформації економічних підходів до диверсифікації діяльності будівельних підприємств з урахуванням інвестиційних ризиків і умов ринкової нестабільності).

5. Данілов С.Ю. Класифікація типів невизначеності в управлінні іт-проектами та їхній вплив на формування стратегій агентного розподілу трудових ресурсів. Просторовий розвиток, 2025, 15, С. 313-324  
<https://doi.org/10.32347/2786-7269.2025.15.313-324>

<https://library.knuba.edu.ua/books/zbirniki/29/2025/SD2515.pdf>

6. Стельмах О., Данілов С., Кривда К., Науменко Є. Системний аналіз концептуальних основ управління трудовими ресурсами в іт-середовищі з урахуванням трансформації парадигм під впливом динаміки цифрової економіки. Будівельне виробництво, 2025, 80, 77-85.  
<https://doi.org/10.36750/2524-2555.80.77-85>.

<https://ndibv-building.com.ua/index.php/building/article/view/554/286> (Особистий внесок здобувача: узагальнено концептуальні засади управління трудовими ресурсами в умовах цифрової трансформації, зокрема із застосуванням hr-аналітики та гнучких моделей зайнятості в іт-орієнтованому середовищі).

7. Данілов С.Ю. Моделі реактивної адаптації агентів до контекстів невизначеності та зміни параметрів навколишнього середовища. Управління розвитком складних систем. 2025. № 64. С. 185 – 193  
<https://doi.org/10.32347/2412-9933.2025.64.185-193>

<https://urss.knuba.edu.ua/files/zbirnyk-64/185-193.pdf>

8. Козак А., Герасимчук Я., Стельмах О., Данілов С. Шляхи модернізації системи організаційно-технологічного моделювання проектів будівництва в бік подолання можливих невизначеностей та загроз циклу проектів будівельного девелопменту. Будівельне виробництво, 2024, 77, 31-42.  
<https://doi.org/10.36750/2524-2555.77.31-42>

<https://ndibv->

[building.com.ua/index.php/Building/article/view/506/238](http://building.com.ua/index.php/Building/article/view/506/238)(*Особистий внесок здобувача: запропоновано підходи до модернізації організаційно-технологічного моделювання будівельних проєктів, орієнтовані на зниження ризиків і підвищення ефективності управління проєктом циклом*).

9. Козак А., Соболев Д., Данілов С., Оксенчук Р., Шаршун Ф. Концептуалізація енергоадаптованих будівельних проєктів у контексті сталого розвитку, регуляторного поля та цифрової трансформації. Шляхи підвищення ефективності будівництва, 2022, 2(49), 305–319. [https://doi.org/10.32347/2707-501x.2022.49\(2\).305-319](https://doi.org/10.32347/2707-501x.2022.49(2).305-319) <https://ways.knuba.edu.ua/article/view/342154/330046> (*Особистий внесок здобувача: обґрунтовано концепцію енергоадаптованих будівельних проєктів у контексті сталого розвитку та цифрової трансформації, із використанням BIM-технологій та інструментів енергетичної оптимізації*).

*Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:  
тези доповідей на конференціях:*

10. **Данілов С.Ю.** Алгоритмічне забезпечення самонавчання агентів і вибору стратегій взаємодії в умовах обмеженого доступу до інформації. Налаштування освітніх траєкторій в підготовці менеджерів будівництва в контексті відбудови України: матеріали круглого столу, 30 травня 2023 р. К.: КНУБА, 2023. С. 25. . <https://lnk.ua/FL4IPeGIId>

11. **Данілов С.Ю.** Розробка варіативних моделей мультиагентного розподілу із залученням нечіткої логіки, сценарного аналізу та теорії ймовірностей. Енергоощадні машини і технології: програма V Міжнародної науково-практичної конференції, 22-24 травня 2024 р. К.: КНУБА, 2024. С. 44 <https://lnk.ua/wmbp18Yos>

12. Кричевська Ю.В., Грабчак П.В., **Данілов С.Ю.** Теоретико-методичні основи організації ресурсів та технологічного планування в проєктах зведення багатоповерхових будівель на основі девелоперських і мультиагентних моделей. Проблеми генезису економіки інтелектуально-інноваційного капіталу: матеріали доповідей V Міжнародної науково-практичної конференції

(м. Київ, 4-5 листопада 2025 року) / за заг. ред. В. М. Лича, Л.О. Згалат-Лозинської. Київ: КНУБА, 2025. С. 653-655 [https://cf.knuba.edu.ua/wp-content/uploads/2026/01/Konference-program-KNUCA-4-5\\_11\\_2025.pdf](https://cf.knuba.edu.ua/wp-content/uploads/2026/01/Konference-program-KNUCA-4-5_11_2025.pdf)

13. Грабчак П.В., **Данілов С.Ю.** Інтеграція організаційно-технологічних рішень у девелоперських проєктах будівництва та моделей мультиагентного розподілу трудових ресурсів в умовах невизначеності на ґрунті наукового процесу. Актуальні проблеми освітнього процесу в контексті європейського вибору України: матеріали VIII Міжнародної конференції (12 листопада 2025 року). Київ: Видавництво Ліра-К, 2025. С. 620-621 <https://repository.knuba.edu.ua/items/d0b87d1f-fb32-4375-8961-42e490aeda9b621>

14. **Данілов С.Ю.**, Кривда К.Є. Моделі та методи мультиагентного управління ресурсами та моніторингу стійкості ІТ-проєктів і будівельних мереж в умовах невизначеності. Архітектура, Будівництво, Дизайн: Виробництво, Інформатизація, Менеджмент: Міжнародний науково-технічний форум: програма та тези доповідей (24-25 листопада 2025 р., м. Київ). Київ : Видавництво Ліра-К, 2025. С. 522-523 <https://drive.google.com/file/d/1h5Zrq3IXNGrt06JuGw2-5oeijf26i8SXX/view>

## ДОДАТОК Б. ДОВІДКИ ПРО ВПРОВАДЖЕННЯ



## ТОВ «Фомальгаут-Полімін»

162-1 від 26.11.2025

**ДОВІДКА**  
**про впровадження результатів дисертаційної роботи**  
**Данілова Сергія Юрійовича.**

Даною довідкою підтверджується, що результати наукових досліджень Данілова Сергія Юрійовича практично апробовані у проєктах будівництва та продажу житла у м. Вінниці та Вінницькій області, а саме у проєктах ЖК «Добробуд» у м. Хмільник та ЖК «Дрім Лейк» у м. Вінниця по вул. Келецькій (далі – «Проєкти»), де ТОВ «Фомальгаут-полімін» виступав координатором та співвиконавцем. Співпраця Данілова С.Ю. із фахівцями Інституту стосувалась залучення його наукового доробку до обґрунтування управлінських і організаційно-технологічних рішень у складі Проєкту.

У межах даних проєктів було застосовано наступні ключові результати доробку здобувача:

1. Аналіз потреб і ресурсів – визначення кількісних та якісних потреб у трудових ресурсах, формування цифрових профілів працівників і агентів для подальшого планування.

2. Прогнозування динаміки ресурсів – оцінка змін у складі персоналу, завантаженості та компетенцій із урахуванням ймовірності різних сценаріїв розвитку подій.

3. Мультиагентне призначення завдань – автоматизований розподіл ролей і функцій між агентами з урахуванням їх автономності та командної взаємодії.

4. Моніторинг і адаптація ресурсів – відстеження фактичного виконання завдань, оперативне коригування навантаження та ресурсного балансу в реальному часі.

5. Оцінка ефективності та управління ризиками – застосування аналітичних моделей для вимірювання продуктивності та мінімізації негативного впливу відхилень у роботі агентів.

6. Самоорганізація та самонавчання агентів – розвиток здатності працівників і цифрових агентів прогнозувати наслідки власних дій та адаптувати стратегії до змін середовища.

7. Інтеграція цифрових платформ – використання BIM- та ERP-систем для синхронізації процесів планування, координації та прийняття управлінських рішень.

8. Постпроєктний аналіз і вдосконалення процесів – оцінка результативності виконання проєктів, виявлення вузьких місць та корекція моделей для підвищення стійкості та продуктивності організації.

Запроваджений автором науково-прикладний підхід до формалізованого моделювання та адміністрування трудових ресурсів будівельних організацій у межах девелоперських проєктів дозволив всебічно

оцінити й оптимізувати організаційно-технологічні рішення як на рівні всього проєкту, так і на рівні окремих учасників – організацій-виконавців. Оцінка здійснювалась як за допомогою різноаспектних індивідуальних індикаторів, так і через інтегральний показник надійності виконавців, що охоплює всі ключові сфери операційно-виробничої діяльності. Завдяки застосуванню цього підходу було досягнуто зниження трудомісткості виконання робіт у межах проєкту на 11,2%, а також оптимізовано окремі статті зведеного кошторису та бюджету девелоперського проєкту.

Позитивні результати впровадження науково-прикладних розробок Данілова С.Ю. у практику організації будівництва та функціонально-технологічного обґрунтування процесів будівельного девелопменту в межах Проєктів дають керівництву ТОВ «Фомальгаут-полімін» підстави оцінити рівень авторських інновацій як такий, що відповідає науковому фаховому рівню доктора філософії за спеціальністю 192 «Будівництво та цивільна інженерія»

Директор



Єршов О.С

**ТОВАРИСТВО З ОБМЕЖЕНОЮ ВІДПОВІДАЛЬНІСТЮ****"АРХІТЕКТУРНО-БУДІВЕЛЬНІ НОВАЦІЇ"**

№ 267/1 від «16» 10.2025р

*Інформація про впровадження в практику компанії «Архітектурно-будівельні новації» наукових результатів здобувача КНУБА Данілова С.Ю., одержаних ним при підготовці дисертації освітнього ступеня «доктор філософії» за спеціальністю «Будівництво та цивільна інженерія».*

Повідомляємо про позитивні результати взаємодії компанії зі здобувачем ступеня «доктор філософії» в КНУБА Даніловим Сергієм Юрійовичем. Компанія ознайомила з інноваційним науково-прикладним доробком здобувача, який було сформовано ним під час підготовки дисертації на здобуття наукового ступеня «доктор філософії» на тему: «Моделі та методи мультиагентного розподілу трудових ресурсів в середовищі будівельних девелоперських проєктів в умовах невизначеності».

У складі цього доробку компанія при впровадженні будівельних девелоперських проєктів у м. Кисві та Вінниці використала певні компоненти здобутку Данілова С.Ю. В практичній діяльності «Архітектурно-будівельні новації» застосовано розроблену здобувачем архітектуру агентної взаємодії, яка враховує нечіткість, ймовірнісність та сценарність поведінки ресурсів. Було впроваджено модель стратегічно залежної реконфігурації операційної діяльності для забезпечення цифрової когерентності структур та прогнозування змін ресурсного балансу. Також використано методико-прикладний апарат оцінки інноваційного потенціалу підприємств, що інтегрує технологічні, кадрові та організаційні чинники.

Впроваджено авторську концепцію «цифрового працівника девелоперського проєкту» як активного агента у BIM- та ERP-системах. Удосконалено методи виявлення та нейтралізації відхилень у стані трудових ресурсів, а також науково-методичний підхід протидії ризикам у мультиагентному розподілі ресурсів. Застосовано гібридний підхід, що поєднує мультиагентне моделювання, нечітку логіку, ймовірнісний та сценарний аналіз, формуючи інтегровану функцію ефективності для підвищення стійкості, адаптивності та результативності будівельних проєктів у цифровому середовищі.

У практичній діяльності компанії використано прикладний інструментарій управління трудовими ресурсами на основі мультиагентного підходу. Інструмент забезпечує цифрову інтеграцію, підвищує адаптивність і ефективність організаційно-трудова процесів у будівельному девелопменті. Запропоновані моделі та методи дозволяють оптимізувати розподіл персоналу, прогнозувати сценарії змін у виробничому середовищі та підвищувати продуктивність праці за умов невизначеності.

Ці результати здобувача були використані як сучасний інструмент цифрового управління та моніторингу вартісно-іміджевого зростання підприємства. Зазначені розробки впроваджувалися в практику компанії «Архітектурно-будівельні новації» протягом 2024–2025 рр. щодо застосування організаційно-управлінських технологій інноваційного змісту у регламент адміністрування трудових ресурсів. За результатами застосування науково-прикладного доробку Данілова С.Ю. в практиці організації будівельних девелоперських проєктів досягнуто таких позитивних результатів: адміністративно-управлінські витрати компанії скорочено на 6,3 %, тривалість будівництва по проєктах зменшено на 2,3–4,5 місяців, рівень річного виробітку за 2025 р. щодо всіх працівників компанії зріс на 9,13 %.

Зазначена ефективність використання доробку здобувача свідчить про значну практичну цінність науково-прикладного результату, одержаного Даніловим С.Ю. при підготовці дисертації на здобуття наукового ступеня PhD. Вважаємо, що позитивна оцінка компанії щодо фахової компетентності Данілова С.Ю. у рамках застосованого ним науково-прикладного доробку буде важливим аргументом при прийнятті рішення про присудження Сергію Юрійовичу ступеня доктора філософії за спеціальністю 192 «Будівництво та цивільна інженерія».

Директор



Архіпенко С.М.

№86-1 від 14. 10.2025 р.

ПОВІДОМЛЕННЯ ПРО ПІДСУМКИ ВПРОВАДЖЕННЯ НАУКОВИХ РЕЗУЛЬТАТІВ З ДОБУВАЧА КНУБА Данілова С.Ю. в практику ЗАТ «Українська академія інвестицій в науку і будівництво», які одержані в результаті підготовки дисертації на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 192 «Будівництво та цивільна інженерія»

Науково-методичні та прикладні розробки, представлені Даніловим С.Ю. у дисертаційній роботі на здобуття ступеня доктора філософії за темою «Моделі та методи мультиагентного розподілу трудових ресурсів в середовищі будівельних девелоперських проєктів в умовах невизначеності», були застосовані як складові науково-прикладних та науково-пошукових робіт, що готувалися та впроваджувалися у Київському національному університеті будівництва і архітектури.

Автор є співвиконавцем науково-дослідної теми з державною реєстрацією №0124U005196 «Розробка науково-технічного інструментарію для формування та реалізації внутрішньовиробничих планів діяльності будівельної організації в якій виконувалися дослідження ЗАТ «Українська академія інвестицій в науку і будівництво» як виконавець науково-дослідної роботи (НДР).

У межах зазначеної НДР при розробленні моделей адаптивного планування та комплексної координації діяльності учасників будівельного процесу були застосовані результати наукових розробок Данілова С.Ю., зокрема положення щодо мультиагентного розподілу трудових ресурсів у девелоперських проєктах. Зокрема було використано:

сценарний підхід до моделювання девелоперських проєктів як мультиагентних систем, що дозволяє прогнозувати альтернативні варіанти розвитку подій з урахуванням невизначеності, ризиків та поведінкових характеристик агентів;

архітектуру агентної взаємодії та модель стратегічно залежної реконфігурації операційної діяльності, а також інтегровану функцію ефективності управління, що враховує ризики, мотиваційні фактори та ймовірності сценаріїв. Використання ймовірнісних функцій дозволяє прогнозувати вибір стратегій агентами, підвищуючи гнучкість і адаптивність управлінських рішень у мультиагентному середовищі.

Застосування в даній НДР компонентів розробленого Даніловим С.Ю. інструментарію управління трудовими ресурсами дозволило інтегрувати стратегічні орієнтири компанії з операційною конфігурацією підприємства, даючи агентам можливість оцінювати варіанти стратегій у нечітких умовах. Використання функцій належності та вагових коефіцієнтів для моделювання варіативності стратегій підвищує адаптивність до зовнішніх ризиків і оптимізує процеси розподілу ресурсів.

Участь Данілова С.Ю. у виконанні НДР засвідчила інноваційність створеного автором інструментарію, що полягає у поєднанні мультиагентного підходу, цифрових платформ та моделей оцінки стратегічної варіативності, що дозволяє персоналізувати управлінські рішення для кожного агента.

У зазначених роботах рівень участі автора – виконавець.

Директор



Бригінець В.М.