

УДК: 69.003:004.94:005.8

Олександр МЕНЕЙЛЮК

Д.т.н., зав.каф. технології будівельного виробництва

ORCID: 0000-0002-1007-309X

Одеська державна академія будівництва і архітектури, м. Одеса

СИСТЕМНЕ МОДЕЛЮВАННЯ АГЕНТНИХ ВЗАЄМОДІЙ У БАГАТОКОМПОНЕНТНИХ ТРУДОВИХ СЕРЕДОВИЩАХ БУДІВЕЛЬНОЇ ГАЛУЗІ

Складні трудові середовища будівельної галузі характеризуються багаторівневою структурою, значною кількістю взаємопов'язаних учасників та динамічністю процесів, що відбуваються в межах реалізації проєктів. Ефективність функціонування таких середовищ значною мірою залежить від якості організації взаємодій між окремими елементами системи, зокрема виконавцями, управлінським персоналом, підрядниками та іншими зацікавленими сторонами. При цьому кожен учасник діє відповідно до власних цілей, ресурсних обмежень і поведінкових стратегій, що ускладнює процеси координації та прийняття рішень. Застосування системного підходу у поєднанні з агентним моделюванням дозволяє відобразити внутрішню логіку функціонування таких середовищ, врахувати індивідуальні характеристики суб'єктів та їх взаємозалежність. Агент як елемент моделі інтерпретується як автономна одиниця, здатна до прийняття рішень, адаптації до змін та взаємодії з іншими агентами в межах визначених правил. Формування моделей базується на описі структури середовища, визначенні типів агентів, їх властивостей і поведінкових сценаріїв.

Особливе значення має можливість відтворення процесів координації робіт, розподілу ресурсів і реагування на зовнішні та внутрішні збурення. Імітаційні експерименти забезпечують оцінювання наслідків різних управлінських рішень та дозволяють виявити найбільш ефективні конфігурації взаємодій. Це створює передумови для зниження ризиків, пов'язаних із невизначеністю, та підвищення узгодженості дій між учасниками будівельного процесу. Додатково важливим аспектом є інтеграція агентного моделювання з цифровими технологіями управління будівництвом, зокрема інформаційним моделюванням будівель (BIM), системами моніторингу та аналітики даних. Це дозволяє підвищити точність моделей, забезпечити їх актуалізацію в реальному часі та сформуванню основи для підтримки прийняття управлінських рішень на всіх етапах життєвого циклу об'єкта. В умовах цифрової трансформації галузі агентні моделі виступають ефективним інструментом

прогнозування поведінки складних систем, оцінювання сценаріїв розвитку подій та оптимізації взаємодій між учасниками.

Використання системного агентного підходу сприяє формалізації не лише техніко-економічних, але й організаційно-поведінкових аспектів діяльності, включаючи комунікації, конфлікти інтересів і рівень кооперації. Це забезпечує більш глибоке розуміння функціонування багатокомпонентних трудових середовищ та створює методичну основу для розроблення адаптивних управлінських механізмів, спрямованих на підвищення ефективності реалізації будівельних проєктів.

Ключові слова: *агентне моделювання, системний аналіз, будівельні проєкти, трудове середовище, управління взаємодіями, багатокомпонентні системи, імітаційне моделювання, обмеження, категорії технічного об'єкта, відновлювальні роботи, життєвий цикл, технічне обмеження, неруйнівні методи, моніторинг, організаційно-методичний інструментарій, позапроєктні впливи, технічний нагляд, моускладнюючі фактори, рівень впливу, конструктивна надійність, організація будівництва, організаційно-технологічні процеси.*

Вступ. Сучасний розвиток будівельної галузі характеризується ускладненням організаційно-технологічних процесів, зростанням кількості учасників проєктної діяльності та підвищенням вимог до ефективності управління ресурсами і строками виконання робіт. Реалізація будівельних проєктів відбувається в умовах високої невизначеності, динамічності зовнішнього середовища та необхідності узгодження інтересів різних суб'єктів, що формує складні багатокомпонентні трудові середовища. У таких умовах традиційні підходи до управління виявляються недостатньо гнучкими для адекватного відображення процесів взаємодії між учасниками будівельного виробництва.

З огляду на це, зростає потреба у використанні сучасних методів моделювання, здатних враховувати поведінкові характеристики суб'єктів, їх адаптивність та взаємозалежність. Одним із перспективних напрямів є застосування системного підходу в поєднанні з агентним моделюванням, що дозволяє формалізувати складні взаємодії, відтворювати сценарії функціонування трудових середовищ і оцінювати наслідки управлінських рішень. Такий підхід відкриває нові можливості для підвищення ефективності координації робіт, оптимізації використання ресурсів і забезпечення узгодженості дій усіх учасників будівельного процесу.

Актуальність дослідження. Актуальність теми зумовлена необхідністю підвищення ефективності функціонування будівельних підприємств в умовах зростаючої складності проєктів, обмеженості ресурсів та посилення конкуренції. Важливим фактором є також цифрова трансформація галузі, яка передбачає впровадження інтелектуальних систем управління, здатних обробляти значні обсяги даних і підтримувати прийняття рішень у реальному часі. У цьому контексті агентне

моделювання виступає як ефективний інструмент дослідження поведінки складних систем, що дозволяє враховувати індивідуальні характеристики учасників та їх взаємодію в межах єдиного середовища. Крім того, актуальність підсилюється потребою у зниженні ризиків, пов'язаних із неузгодженістю дій, затримками виконання робіт та неефективним розподілом ресурсів. Використання системного моделювання агентних взаємодій сприяє виявленню критичних точок у процесах управління, формуванню адаптивних стратегій та підвищенню стійкості будівельних систем до впливу зовнішніх і внутрішніх збурень.

Постановка проблеми. Сучасна будівельна галузь функціонує в умовах зростаючої складності виробничих процесів, що обумовлено інтеграцією інноваційних технологій, підвищенням вимог до якості реалізації проєктів та необхідністю ефективного використання ресурсів. Трудові середовища будівельних проєктів є багатокомпонентними системами, в яких взаємодіють численні учасники — від інженерів і менеджерів до підрядних організацій та постачальників. Кожен із елементів має власні цілі, функції та обмеження, що ускладнює процеси координації та управління.

Традиційні методи управління, які базуються на лінійних моделях та централізованому контролі, часто не здатні адекватно відобразити динаміку таких систем і врахувати вплив людського фактору, інформаційних потоків та невизначеності середовища, що призводить до виникнення конфліктів, неефективного розподілу ресурсів і зниження загальної продуктивності проєктів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій, виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Проблематика моделювання складних систем та управління взаємодіями у виробничих середовищах активно досліджується в сучасній науковій літературі. Значна увага приділяється розвитку системного підходу, який дозволяє розглядати будівельні проєкти як цілісні динамічні системи з великою кількістю взаємопов'язаних елементів. У цьому контексті важливим є поєднання методів системного аналізу з сучасними інформаційними технологіями.

Окремий напрям досліджень пов'язаний із застосуванням агентно-орієнтованого моделювання, яке розглядається як ефективний інструмент для аналізу поведінки складних соціально-економічних та виробничих систем. У наукових працях підкреслюється здатність агентних моделей відображати індивідуальні характеристики суб'єктів, їх адаптивність та здатність до взаємодії в умовах невизначеності. Це дозволяє досліджувати процеси координації, конкуренції та співпраці між учасниками будівельних проєктів.

У сучасних дослідженнях розглядається також інтеграція агентного моделювання з цифровими технологіями, такими як інформаційне моделювання будівель та системи підтримки прийняття рішень, що сприяє підвищенню точності прогнозування та ефективності управлінських

рішень. Водночас, незважаючи на значну кількість наукових напрацювань, питання адаптації агентних моделей до специфіки будівельної галузі та їх практичного впровадження залишаються недостатньо розробленими.

Метою даної статті є розробка та теоретичне обґрунтування підходів до системного моделювання агентних взаємодій у багатокомпонентних трудових середовищах будівельної галузі з урахуванням специфіки організаційно-технологічних процесів. У межах дослідження передбачається визначення сутності та структури агентних систем у контексті будівельних проєктів, а також ідентифікація основних типів агентів і характеристик їх поведінки. Особлива увага приділяється формуванню методичних засад побудови моделей, що дозволяють відобразити складні взаємозв'язки між учасниками процесу, врахувати динамічність середовища та забезпечити можливість проведення імітаційних експериментів. Також метою є визначення практичних напрямів використання агентного моделювання для підвищення ефективності управління, оптимізації ресурсного забезпечення та мінімізації ризиків у будівельних проєктах.

Виклад основної інформації. Складність організації будівельного виробництва зумовлена багаторівневим характером трудових процесів, наявністю значної кількості учасників та високим рівнем взаємозалежності між ними. У таких умовах ефективність реалізації проєктів визначається не лише якістю ресурсного забезпечення, а й здатністю системи до узгодженого функціонування її елементів. Саме тому системне моделювання агентних взаємодій набуває особливого значення як інструмент формалізації та аналізу складних виробничих процесів [1].

Агент у межах будівельного середовища трактується як автономний елемент системи (індивід, група або організація), який володіє певними ресурсами, має власні цілі та здатний до прийняття рішень у межах визначених умов. До таких агентів можуть належати підрядники, інженери, менеджери проєктів, постачальники матеріалів та інші учасники будівельного процесу. Ключовими характеристиками агентів є адаптивність, автономність та здатність до взаємодії, що дозволяє відтворювати реальні процеси функціонування трудового середовища [2].

У межах системного підходу будівельне середовище розглядається як відкрита система, що складається з множини взаємопов'язаних агентів, між якими здійснюється обмін інформацією, ресурсами та управлінськими впливами. Взаємодія агентів визначається набором правил, які формують поведінкові сценарії та впливають на досягнення загальних цілей проєкту, що представлено на рисунку 1.

Як видно з рисунка, система включає декілька рівнів: операційний (виконавці робіт), управлінський (керівники проєктів) та забезпечувальний (ресурсні та інформаційні потоки). Взаємодія між рівнями забезпечує цілісність функціонування системи.

Для формалізації ефективності взаємодії агентів використовується інтегральний показник:

$$E = \frac{\sum_{i=1}^n P_i \times w_i}{\sum_{i=1}^n R_i}, \quad (1)$$

де P_i — продуктивність i -го агента; w_i — ваговий коефіцієнт значущості агента; R_i — витрати ресурсів агента.

Нехай $P_1=80$, $P_2=70$, $w_1=0.6$, $w_2=0.44$, $R_1=50$, $R_2=40$.

$$E = \frac{80 \times 0.6 + 70 \times 0.4}{50 + 40} = \frac{48 + 28}{90} = 7690 = 0.844.$$



Рис. 1. Структура агентної системи у будівельному середовищі (розроблено автором на основі [2])

Отримане значення свідчить про достатньо високий рівень ефективності взаємодії.

Крім того, рівень узгодженості між агентами може бути визначений через коефіцієнт координації:

$$K_c = \frac{I_{\phi}}{I_{\pi}}, \quad (2)$$

де I_{ϕ} — фактичний обсяг виконаних взаємодій; I_{π} — плановий обсяг взаємодій.

Приклад:

$$K_c = \frac{85}{100} = 0.85.$$

Це означає, що система функціонує з рівнем координації 85 %.

Для кращого розуміння ролей агентів доцільно систематизувати їх функції.

Таблиця 1

Класифікація агентів у будівельному середовищі
(розроблено автором на основі [2; 3])

Тип агента	Основні функції	Рівень управління
Виконавець	Виконання будівельних робіт	Операційний
Інженер	Технічний контроль	Середній
Менеджер проекту	Координація процесів	Вищий
Постачальник	Забезпечення ресурсами	Забезпечувальний

Така класифікація дозволяє структурувати систему та визначити місце кожного агента в загальній моделі.

Важливим елементом є також оцінка інтенсивності взаємодій:

$$I = \frac{N_{вз}}{T}, \quad (3)$$

де $N_{вз}$ — кількість взаємодій; T — час.

Приклад:

$$I = \frac{120}{8} = 15 \text{ взаємодій/год}$$

Отримане значення характеризує динамічність процесів у системі.

Формалізація агентних взаємодій у будівельному середовищі передбачає побудову математичного апарату, який дозволяє кількісно

оцінювати поведінку агентів, їх взаємозв'язки та вплив на результати функціонування системи. Такий підхід базується на поєднанні методів системного аналізу, імітаційного моделювання та цифрових технологій управління будівельними процесами, що підтверджується сучасними науковими дослідженнями у сфері будівництва [5].

Функція корисності агента відображає ступінь досягнення його цілей у межах системи та може бути подана у вигляді:

$$U_i = \alpha_i P_i - \beta_i C_i, \quad (4)$$

де U_i — корисність i -го агента; P_i — результативність; C_i — витрати ресурсів; α_i, β_i — вагові коефіцієнти.

Як приклад розрахунку:

$$U_1 = 0.7 \times 90 - 0.3 \times 50 = 63 - 15 = 48.$$

Отриманий результат демонструє позитивний баланс між ефективністю діяльності агента та витратами ресурсів, що є важливим критерієм у процесі оптимізації управління [6].

Взаємодія між агентами описується через функціональні залежності, які враховують рівень ресурсного забезпечення та інтенсивність зв'язків:

$$I_{ij} = k_{ij} \times (R_i \times R_j), \quad (5)$$

де I_{ij} — інтенсивність взаємодії; k_{ij} — коефіцієнт взаємозалежності; R_i, R_j — ресурси агентів.

Приклад:

$$I_{12} = 0.02 \times (100 \times 80) = 160.$$

Такий підхід дозволяє оцінити силу взаємодії між агентами та визначити критичні зв'язки в системі, що мають найбільший вплив на результативність проекту [5].

Баланс ресурсів у системі визначається як:

$$\sum_{i=1}^n R_i^{in} = \sum_{i=1}^n R_i^{out} + R_{res}, \quad (6)$$

де R_{res} — резерв ресурсів.

Приклад:

$$300 = 260 + 30 + 10.$$

Це свідчить про наявність резерву, який може бути використаний для підвищення гнучкості системи та зниження ризиків [7].

Перед подальшим аналізом доцільно представити логіку взаємодії агентів у вигляді структурної схеми.

Узагальнену логіко-функціональну схему взаємодії агентів наведено на рисунку 2.

Схема відображає процеси передачі інформації, ресурсів та управлінських впливів між агентами, що формують єдину систему управління будівельним проектом.

Для оцінки впливу інтенсивності взаємодій на ефективність функціонування системи використовується залежність:

$$E = 1 - e^{-\lambda I}, \quad (7)$$

де E — ефективність системи; I — інтенсивність взаємодій; λ — коефіцієнт чутливості:

$$E = 1 - e^{-0.05 \times 20} \approx 0.633.$$

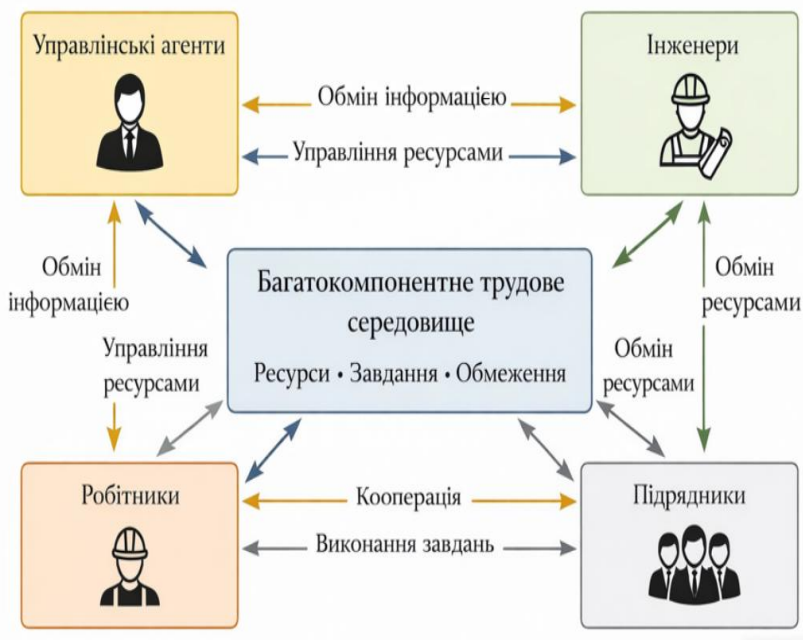


Рис. 2. Логіко-функціональна схема взаємодії агентів у будівельному середовищі (розроблено автором на основі [6])

Залежність ефективності від інтенсивності взаємодій наведено на рисунку 3.

Графік демонструє нелінійний характер залежності, при якому на початкових етапах спостерігається швидке зростання ефективності, а надалі — стабілізація.

Динаміка продуктивності системи у часі описується функцією:

$$P(t) = P_0(1 + \gamma t)e^{-\delta t}.$$

де P_0 — початковий рівень продуктивності; γ — коефіцієнт розвитку; δ — коефіцієнт зниження.

Так:

$$P(t) = 100 \times 1.5 \times 0.778 \approx 116.7.$$

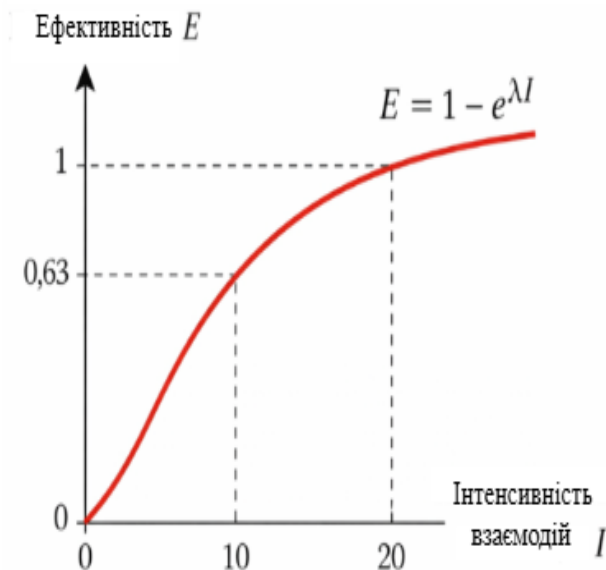


Рис. 3 – Графік залежності ефективності системи від інтенсивності взаємодій (розроблено автором на основі [7])

Зміну продуктивності системи у часі наведено на рисунку 4.

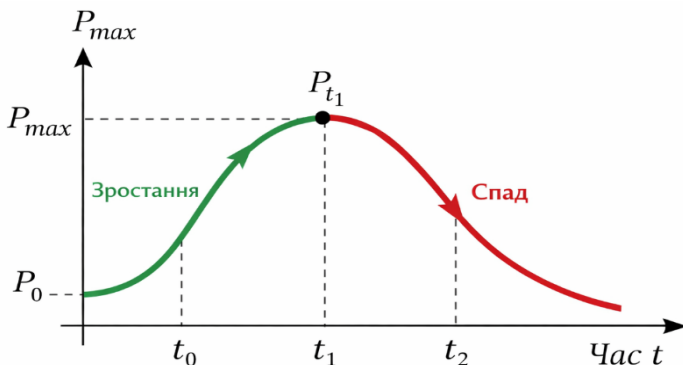


Рис. 4. Графік зміни продуктивності системи у часі
(розроблено автором на основі [8])

Отримані залежності дозволяють здійснювати імітаційне моделювання поведінки системи, прогнозувати результати управлінських рішень та оцінювати вплив різних факторів на ефективність реалізації будівельних проєктів. Застосування таких моделей сприяє підвищенню адаптивності системи, оптимізації використання ресурсів та зниженню ризиків у складних виробничих умовах.

У межах системного моделювання агентних взаємодій важливо враховувати повний життєвий цикл технічного об'єкта, який охоплює стадії проєктування, будівництва, експлуатації, технічного обслуговування та виведення з експлуатації. На кожній із цих стадій формується специфічна конфігурація агентів, що приймають рішення щодо технічного обстеження, вибору методів контролю, визначення категорії технічного об'єкта, а також оцінювання потенційних моускладнюючих факторів, які впливають на його безпечність і довговічність. У цьому контексті особливого значення набувають неруйнівні методи контролю, які забезпечують отримання достовірної інформації про конструктивний стан об'єкта без втручання у його структуру, дозволяючи оперативно моделювати рівень ризику та прогнозувати рівень впливу позапроєктних впливів на конструктивну надійність.

Застосування агентно-орієнтованих моделей дає змогу деталізувати поведінку учасників, відповідальних за технічний нагляд, експлуатацію та моніторинг стану будівельних конструкцій у реальному часі. Такі моделі забезпечують формування адаптивного організаційно-методичного інструментарію, який дозволяє оптимізувати процеси ухвалення рішень щодо проведення аварійно-відновлювальних робіт, вибору пріоритетних заходів із підвищення безпеки та раціонального розподілу ресурсів. Урахування даних технічного обстеження та результатів моніторингу

сприяє створенню цифрових профілів об'єктів, що дає змогу агентним системам завчасно ідентифікувати аномальні стани, оцінювати критичність дефектів та коригувати стратегії втручання залежно від зміни зовнішніх умов.

Практичне застосування агентного моделювання в управлінні будівельними проектами спрямоване на підвищення ефективності прийняття рішень, оптимізацію використання ресурсів та зниження рівня ризиків у складних виробничих умовах. Використання агентних моделей дозволяє формувати альтернативні сценарії розвитку проекту, оцінювати їх наслідки та обирати найбільш раціональні варіанти реалізації з урахуванням обмежень і динаміки середовища [9].

У межах прикладної реалізації особливе значення має моделювання сценаріїв взаємодії агентів, що передбачає варіативність поведінки учасників процесу залежно від змін зовнішніх і внутрішніх факторів. Такий підхід забезпечує можливість оцінювання впливу управлінських рішень на ключові показники ефективності, зокрема строки виконання робіт, витрати ресурсів та рівень продуктивності.

Оптимізація ресурсного забезпечення здійснюється шляхом балансування навантаження між агентами та визначення найбільш ефективних схем розподілу ресурсів. Це дозволяє підвищити узгодженість дій учасників проекту та забезпечити більш раціональне використання матеріальних і трудових ресурсів.

Аналіз ризиків у межах агентного підходу передбачає оцінку ймовірності відхилень від запланованих параметрів та їх впливу на результати проекту. Такий підхід дозволяє своєчасно виявляти потенційні загрози, оцінювати їх наслідки та приймати обґрунтовані управлінські рішення щодо їх мінімізації [10].

Для узагальнення результатів моделювання доцільно представити порівняльний аналіз сценаріїв.

Порівняння ефективності різних сценаріїв реалізації будівельного проекту наведено в таблиці 2.

Для візуалізації процесу прийняття управлінських рішень доцільно використати структурну модель.

Модель прийняття управлінських рішень на основі агентного моделювання наведено на рисунку 5.

Таблиця 2. Порівняльна оцінка сценаріїв управління будівельним проектом (розроблено автором на основі [10])

Сценарій	Витрати	Продуктивність	Ризик	Ефективність
Базовий	100	120	25	0.75
Оптимізований	90	135	18	0.88
Ризиковий	80	110	35	0.65

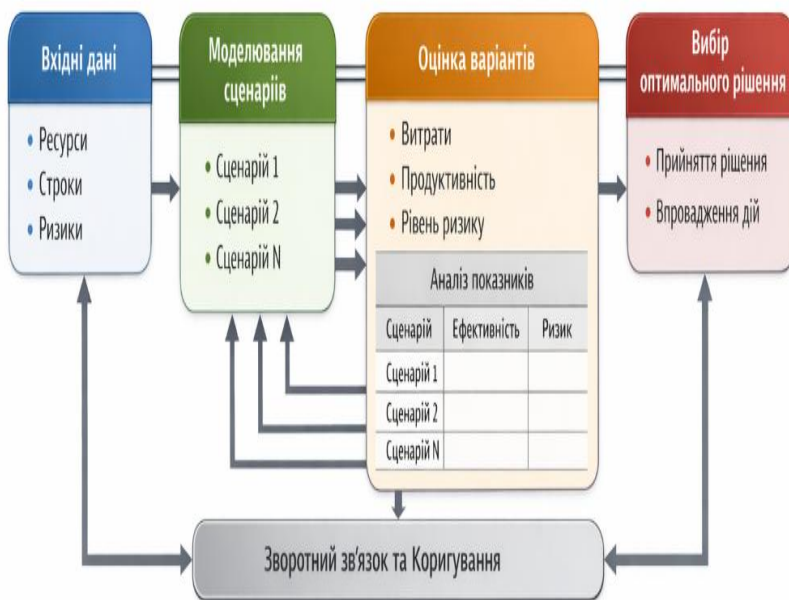


Рис. 5. Модель прийняття управлінських рішень у системі агентної взаємодії (розроблено автором на основі [10])

Запропонована модель відображає послідовність етапів: формування вхідних даних, моделювання сценаріїв, оцінювання результатів та вибір оптимального рішення. Вона дозволяє врахувати множинність факторів впливу та забезпечити адаптивність управління будівельними процесами.

Таким чином, застосування агентного моделювання у практиці управління будівельними проектами забезпечує підвищення обґрунтованості управлінських рішень, дозволяє ефективно розподіляти ресурси та мінімізувати ризики. Використання імітаційних моделей створює передумови для переходу до цифрових систем управління, що відповідають сучасним вимогам розвитку будівельної галузі.

Висновки і перспективи подальших досліджень. У результаті виконаного дослідження обґрунтовано доцільність застосування системного підходу до моделювання агентних взаємодій у багатокомпонентних трудових середовищах будівельної галузі. Доведено, що агентно-орієнтоване моделювання дозволяє адекватно відобразити поведінку окремих учасників будівельного процесу, врахувати їх індивідуальні цілі, ресурси та механізми взаємодії.

Розроблений підхід до математичного опису агентних взаємодій створює основу для проведення імітаційних експериментів, які дозволяють

аналізувати різні сценарії розвитку будівельних проєктів, прогнозувати наслідки управлінських рішень та обґрунтовувати вибір оптимальних стратегій. Особливу практичну цінність має можливість оптимізації розподілу ресурсів і зниження рівня ризиків. Практична реалізація агентного моделювання сприяє підвищенню ефективності управління будівельними проєктами, забезпечує узгодженість дій учасників та адаптивність системи до змін зовнішнього середовища. Отримані результати можуть бути використані при розробці цифрових систем підтримки прийняття рішень та вдосконаленні організаційно-технологічних процесів у будівництві.

Література

1. Eastman C., Teicholz P., Sacks R., Liston K. BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers, and Contractors. Hoboken : John Wiley & Sons, 2011. 648 p.
2. Eastman C. et al. Building information modeling and its impact on construction processes. Automation in Construction. 2011. 20. P. 1–9.
3. Wooldridge M. An Introduction to MultiAgent Systems. 2nd ed. Chichester : John Wiley & Sons, 2009. 484 p.
4. Honcharenko, T., Chupryna, Y., Ivakhnenko, I., Zinchenco, M., Tsyfra, T.: Reengineering of the construction companies based on BIM-technology. Int. J. Emerg. Trends Eng. Res. **8**(8), 4166–4172 (2020) <https://doi.org/10.30534/ijeter/2020/22882020.2.33>
5. I. Chupryna, R. Tormosov, A. Aryn, M. Horbach, D. Prykhodko and M. Polzikov, "The Updated Tool for Selecting Projects for the Target Programs of Sustainable Energy Development," 2023 IEEE International Conference on Smart Information Systems and Technologies (SIST), Astana, Kazakhstan, 2023, pp. 457-467, doi: [10.1109/SIST58284.2023.10223492](https://doi.org/10.1109/SIST58284.2023.10223492)
6. Karmann C., Bauman F., Raftery P., Schiavon S., Koupriyanov M. Effect of acoustical clouds coverage and air movement on radiant chilled ceiling cooling capacity. Energy and Buildings. 2018. Vol. 158. P. 939–949. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.10.046>
7. Perera P., Nik V. M., Scartezzini J.-L., Hong T. Quantifying the impacts of climate change and extreme climate events on energy systems. Applied Energy. 2020. Vol. 261. <https://doi.org/10.1038/s41560-020-0558-0>
8. Ma Z., Cooper P., Daly D., Ledo L. Existing building retrofits: Methodology and state-of-the-art. Energy and Buildings. 2012. Vol. 55, Part 2. P. 889–902. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.08.018>
9. ISO 52000-1:2017. Energy performance of buildings — Overarching EPB assessment — Part 1: General framework and procedures. International Organization for Standardization, 2017.
10. Azhar S. Building Information Modeling (BIM): Trends, benefits, risks, and challenges for the AEC industry. Leadership and Management in

Engineering. 2011. Vol. 11(3). P. 241–252. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)LM.1943-5630.0000127](https://doi.org/10.1061/(ASCE)LM.1943-5630.0000127)

11. Hardin B., McCool D. BIM and Construction Management: Proven Tools, Methods, and Workflows. Indianapolis: Wiley Publishing, 2015. 400 p.

12. Borrmann A., König M., Koch C., Beetz J. Building Information Modeling: Technology Foundations and Industry Practice. Cham : Springer, 2018. 584 p.

13. Cheng S., Qi Y., Wu R., Guan Y. A Multimodal Agent Framework for Construction Scenarios: Accurate Perception, Dynamic Retrieval, and Explainable Hazard Reasoning. Buildings. 2025. Vol. 15, Issue 24. Article 4439. <https://doi.org/10.3390/buildings15244439>

14. Malykhin, M. (2025). Methodological approach to construction of a system for detection and prevention of destruction of the activities of construction participants. *Baltic Journal of Economic Studies*, 11(3), 230-238. <https://doi.org/10.30525/2256-0742/2025-11-3-230-238>

15. Liu W., Meng Q., Zhi H., Li Z., Hu X. A review of agent-based modeling in construction management: an analytical framework based on multiple objectives. *Journal of Civil Engineering and Management*. 2024. Vol. 30, No. 3. P. 200–219. <https://doi.org/10.3846/jcem.2024.20949>

16. Alanazi A. M. Non-destructive testing of steel-lined concrete structure using multiple agents with deep prior. *Scientific Reports*. 2025. Vol. 15. Article 31275. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-16978-3>

17. Abdollahi-Mamoudan F., Ibarra-Castanedo C., Maldague X. P. V. Non-Destructive Testing and Evaluation of Hybrid and Advanced Structures: A Comprehensive Review of Methods, Applications, and Emerging Trends. *Sensors*. 2025. Vol. 25, Issue 12. Article 3635 <https://doi.org/10.3390/s25123635>

18. Zheng Y., Wang S., Zhang P., Xu T., Zhuo J. Application of Nondestructive Testing Technology in Quality Evaluation of Plain Concrete and RC Structures in Bridge Engineering: A Review. *Buildings*. 2022. Vol. 12, Issue 6. Article 843. <https://doi.org/10.3390/buildings12060843>

A.I. Menelylyuk

System modeling of agent interactions in multi-component labor environments of the construction industry

Complex labor environments in the construction industry are characterized by a multi-level structure, a significant number of interrelated participants, and the dynamic nature of processes occurring within project implementation. The efficiency of such environments largely depends on the quality of interaction organization among individual system elements, including executors, managerial staff, contractors, and other stakeholders. At the same time, each participant operates according to their own objectives, resource constraints, and behavioral strategies, which complicates coordination and decision-making processes.

The application of a systems approach combined with agent-based modeling makes it possible to reflect the internal logic of such environments, taking into account the individual characteristics of actors and their interdependencies. An agent, as a model element, is interpreted as an autonomous unit capable of decision-making, adaptation to changes, and interaction with other agents within defined rules. Model development is based on describing the structure of the environment, defining agent types, their properties, and behavioral scenarios.

Of particular importance is the ability to reproduce processes of work coordination, resource allocation, and responses to external and internal disturbances. Simulation experiments enable the evaluation of the consequences of various managerial decisions and allow the identification of the most effective configurations of interactions. This creates the preconditions for reducing risks associated with uncertainty and improving the coherence of actions among participants in the construction process.

An additional important aspect is the integration of agent-based modeling with digital construction management technologies, particularly Building Information Modeling (BIM), monitoring systems, and data analytics tools. This integration enhances model accuracy, ensures real-time updating, and forms a foundation for supporting managerial decision-making throughout all stages of the facility life cycle. In the context of the industry's digital transformation, agent-based models serve as an effective tool for predicting the behavior of complex systems, evaluating development scenarios, and optimizing interactions among participants.

The use of a systemic agent-based approach facilitates the formalization not only of technical and economic aspects but also of organizational and behavioral dimensions of activity, including communication processes, conflicts of interest, and levels of cooperation. This provides a deeper understanding of the functioning of multicomponent labor environments and creates a methodological basis for developing adaptive management mechanisms aimed at improving the efficiency of construction project implementation.

Keywords: agent modeling, systems analysis, construction projects, work environment, interaction management, multi-component systems, simulation modeling, inspection, technical object categories, restoration work, life cycle, technical inspection, non-destructive methods, monitoring, organizational and methodological tools, extra-project influences, technical supervision, complicating factors, level of influence, constructive reliability, construction organization, organizational and technological processes.