DOI: https://doi.org/10.32347/2707-501x.2025.55(3).214-233

УДК 004.8:005.21:519.86

Василь ДОНЕНКО
д.т.н., професор кафедри будівництва, урбаністики та просторового планування
ORCID: 0000-0002-5728-5081
Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля

ІНСТРУМЕНТАРІЙ САМОНАВЧАННЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ АГЕНТІВ І ПРИЙНЯТТЯ СТРАТЕГІЧНИХ РІШЕНЬ В УМОВАХ ІНФОРМАЦІЙНОЇ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ

Сучасні складні системи функціонують в умовах постійної зміни середовища, зростання обсягів даних і водночас обмеженого доступу до повної та достовірної інформації. Це формує принципово нові вимоги до процесів прийняття стратегічних рішень, які мають враховувати невизначеність, ризики та динамічність взаємодій між учасниками. У таких умовах особливого значення набувають інтелектуальні агенти, здатні до автономного функціонування та самонавчання, що дозволяє їм адаптувати поведінку відповідно до змін зовнішнього середовища.

Самонавчання розглядається як ключовий механізм забезпечення ефективності діяльності агентів, який базується на накопиченні досвіду, аналізі попередніх рішень та коригуванні стратегій взаємодії. Здатність агентів працювати з неповною, суперечливою або ймовірнісною інформацією визначає їх конкурентоспроможність у складних багатосуб'єктних системах. Важливим аспектом є поєднання процесів навчання та прийняття рішень, що дозволяє формувати узгоджені стратегії поведінки та забезпечувати ефективну координацію дій.

Формування інструментарію самонавчання передбачає використання комплексу взаємопов'язаних підходів, що включають методи машинного навчання, елементи теорії ігор та ймовірнісного аналізу. Така інтеграція створює передумови для адаптивного вибору стратегій взаємодії, оцінювання альтернативних рішень та прогнозування результатів у середовищі з високим рівнем невизначеності.

Особлива увага приділяється забезпеченню здатності агентів до узагальнення отриманого досвіду, швидкої реакції на зміни та мінімізації негативного впливу інформаційних обмежень. Це дозволяє підвищити якість прийнятих рішень і забезпечити стійкість функціонування систем у довгостроковій перспективі.

Запропонований підхід спрямований на подолання фрагментарності існуючих рішень та формування цілісної системи, у межах якої процеси самонавчання і стратегічного вибору розглядаються як взаємопов'язані елементи. Практичне значення полягає у можливості застосування

такого інструментарію в управлінні складними організаційними структурами, цифровими платформами та економічними системами, де ефективність діяльності значною мірою залежить від здатності працювати в умовах невизначеності.

Ключові слова: інтелектуальні агенти, самонавчання, стратегічні рішення, інформаційна невизначеність, адаптивні системи, організація процесу проєктування, цифровізація, автоматизація будівництва, управління якістю, якість проектних рішень, якість будівництва, стадії проєктування, машинне навчання, теорія ігор, інженерія заснована на знаннях, організація будівництва, організаційно-технологічна модель, невизначеність, прийняття рішень.

Вступ. Сучасний етап розвитку інформаційного суспільства характеризується стрімким зростанням обсягів даних, ускладненням взаємозв'язків між елементами систем та підвищенням рівня невизначеності зовнішнього середовища. Це зумовлює необхідність застосування нових підходів до управління та прийняття рішень, які здатні враховувати динамічність процесів і обмеженість доступної інформації. У цьому контексті особливого значення набувають інтелектуальні агенти, що здатні автономно функціонувати, адаптуватися до змін і формувати ефективні стратегії поведінки.

Самонавчання є ключовою характеристикою інтелектуальних агентів, оскільки забезпечує їх здатність до накопичення досвіду та вдосконалення прийнятих рішень без зовнішнього втручання. Водночас ефективність самонавчання значною мірою залежить від якості інформації, яка використовується для формування моделей поведінки. В умовах інформаційної невизначеності агенти змушені працювати з неповними або суперечливими даними, що підвищує складність процесу навчання та прийняття рішень.

З огляду на це, актуальним є завдання розробки інструментарію, який дозволяє поєднати процеси самонавчання та стратегічного вибору в єдину систему. Такий інструментарій має забезпечувати адаптивність агентів, їх здатність до прогнозування та узгодження дій у багатосуб'єктному середовищі.

Особливого значення набуває інтеграція різних методологічних підходів, зокрема машинного навчання, теорії ігор та аналізу невизначеності, що дозволяє сформувати комплексне бачення процесів взаємодії агентів. Розвиток таких підходів сприяє підвищенню ефективності функціонування складних систем і створює нові можливості для їх оптимізації.

Актуальність дослідження зумовлена зростанням складності сучасних систем управління та необхідністю прийняття ефективних стратегічних рішень в умовах обмеженої та невизначеної інформації. У реальних умовах функціонування економічних, соціальних і технологічних систем

інформація часто є неповною, асиметричною або швидко змінюється, що створює додаткові ризики та ускладнює процес прийняття обґрунтованих рішень.

Традиційні методи аналізу та управління, орієнтовані на повноту і достовірність даних, не забезпечують необхідної гнучкості та адаптивності в умовах невизначеності. Це зумовлює потребу у впровадженні інтелектуальних агентів, здатних до самонавчання та автономного прийняття рішень.

Водночас існуючі підходи до побудови таких систем мають низку обмежень, пов'язаних із недостатньою інтеграцією процесів навчання та стратегічного вибору, а також обмеженими можливостями адаптації до динамічного середовища.

У зв'язку з цим розробка інструментарію самонавчання інтелектуальних агентів і формування стратегій взаємодії набуває особливого значення. Це дозволяє підвищити ефективність функціонування складних систем, знизити вплив невизначеності та забезпечити більш обґрунтоване прийняття рішень у різних сферах діяльності.

Постановка проблеми. Сучасні соціально-економічні та технологічні системи характеризуються високим рівнем динамічності, складності та інформаційної невизначеності, що ускладнює процеси прийняття стратегічних рішень. У таких умовах традиційні підходи до управління, які ґрунтуються на повноті та достовірності даних, виявляються недостатньо ефективними. Особливої актуальності набуває проблема розробки інтелектуальних агентів, здатних до самонавчання та адаптації в середовищах із неповною, фрагментарною або суперечливою інформацією.

Водночас існуючі підходи до побудови систем самонавчання часто орієнтовані на ідеалізовані умови доступу до даних, що обмежує їх прикладне використання у реальних управлінських та економічних процесах. Наявні методи не завжди забезпечують належний рівень узгодженості стратегій взаємодії між агентами, особливо в умовах багатосуб'єктного середовища. Виникає необхідність у формуванні комплексного інструментарію, який поєднує механізми самонавчання, адаптивного аналізу інформації та вибору стратегій взаємодії. Це дозволить підвищити обґрунтованість рішень і забезпечити ефективне функціонування інтелектуальних систем у складних та невизначених умовах.

Аналіз останніх досліджень і публікацій, виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Питання самонавчання інтелектуальних агентів та прийняття рішень в умовах невизначеності активно досліджуються у межах теорії штучного інтелекту, теорії ігор, кібернетики та управління складними системами. Значна увага приділяється розвитку моделей машинного навчання, зокрема підкріплювального навчання, які дозволяють агентам адаптувати

поведінку на основі досвіду. Також поширеними є підходи, що базуються на ймовірнісних моделях та баєсівських методах оцінювання невизначеності.

Разом із тим, більшість досліджень зосереджується на окремих аспектах проблеми — або на процесах навчання, або на механізмах прийняття рішень, що призводить до фрагментарності наукових результатів. Недостатньо уваги приділяється інтеграції цих компонентів у єдину систему, здатну функціонувати в умовах обмеженого доступу до інформації. Крім того, існує потреба у розробці універсального інструментарію, який би враховував специфіку взаємодії між агентами, їх адаптивність та здатність до координації дій. Невирішеними залишаються питання формалізації процесів стратегічного вибору та оцінювання ефективності прийнятих рішень у динамічному середовищі.

Метою цієї статті є розробка та обґрунтування інструментарію самонавчання інтелектуальних агентів і прийняття стратегічних рішень в умовах інформаційної невизначеності. Досягнення поставленої мети передбачає формалізацію процесів навчання агентів на основі обмежених даних, визначення принципів адаптивного вибору стратегій взаємодії, а також інтеграцію відповідних методів у єдину концептуальну модель.

Особлива увага приділяється забезпеченню узгодженості дій агентів у багатосуб'єктному середовищі, підвищенню якості прийняття рішень та зниженню впливу невизначеності на результати функціонування системи. Результати дослідження спрямовані на розширення теоретико-методичних підходів і створення практичних засобів для застосування в складних інформаційних середовищах.

Виклад основної інформації. Інтегрований інструментарій самонавчання інтелектуальних агентів виступає ключовим чинником підвищення ефективності стратегічного управління у багатосуб'єктному середовищі з неповною інформацією, оскільки забезпечує поєднання адаптивного навчання, прогнозування та обґрунтованого вибору рішень. У сучасних умовах функціонування складних організаційних систем кожен суб'єкт взаємодії володіє лише частковою інформацією про загальний стан середовища, що зумовлює асиметрію знань і ускладнює координацію дій. У таких умовах використання інтелектуальних агентів, здатних до самонавчання, дозволяє трансформувати обмеженість інформації у керований параметр шляхом постійного оновлення моделей поведінки на основі досвіду та взаємодії із середовищем [1].

Формування інструментарію самонавчання базується на інтеграції методів підкріплювального навчання, ймовірнісного аналізу та елементів теорії ігор, що дозволяє агентам оцінювати альтернативні стратегії та обирати оптимальні рішення навіть за умов невизначеності [2]. Ключовою особливістю такого підходу є перехід від реактивної моделі поведінки до проактивної, коли агент не лише реагує на зміни, а й прогнозує їх та формує відповідні стратегії заздалегідь. Це забезпечує підвищення стійкості

системи до зовнішніх шоків і зменшення впливу ризиків на результати діяльності.

Концептуальна модель інструментарію самонавчання інтелектуальних агентів передбачає наявність взаємопов'язаних компонентів, серед яких центральне місце займають модулі навчання, блоки прийняття рішень та підсистема аналітичної візуалізації. Взаємодія цих компонентів формує замкнений цикл управління, у межах якого результати попередніх рішень використовуються для коригування майбутніх стратегій, що відповідає принципам адаптивного управління складними системами. На рисунку 1 представлено концептуальну модель інструментарію самонавчання інтелектуальних агентів, яка відображає взаємозв'язки його основних структурних компонентів.

Рис. 1. Концептуальна модель інструментарію самонавчання інтелектуальних агентів *(розроблено автором на основі [1])*

У межах цієї моделі процес прийняття стратегічних рішень агентом розглядається як ітеративний цикл, що включає сприйняття стану середовища, формування множини можливих дій, оцінювання їх

ефективності та вибір оптимальної стратегії. Важливим елементом є механізм зворотного зв'язку, який забезпечує навчання агента через отримання винагороди або штрафу залежно від результатів дій. Такий підхід дозволяє поступово формувати ефективну поведінкову модель навіть за умов неповної інформації [3]. На рисунку 2 наведено схему процесу прийняття стратегічних рішень інтелектуальним агентом у динамічному середовищі.

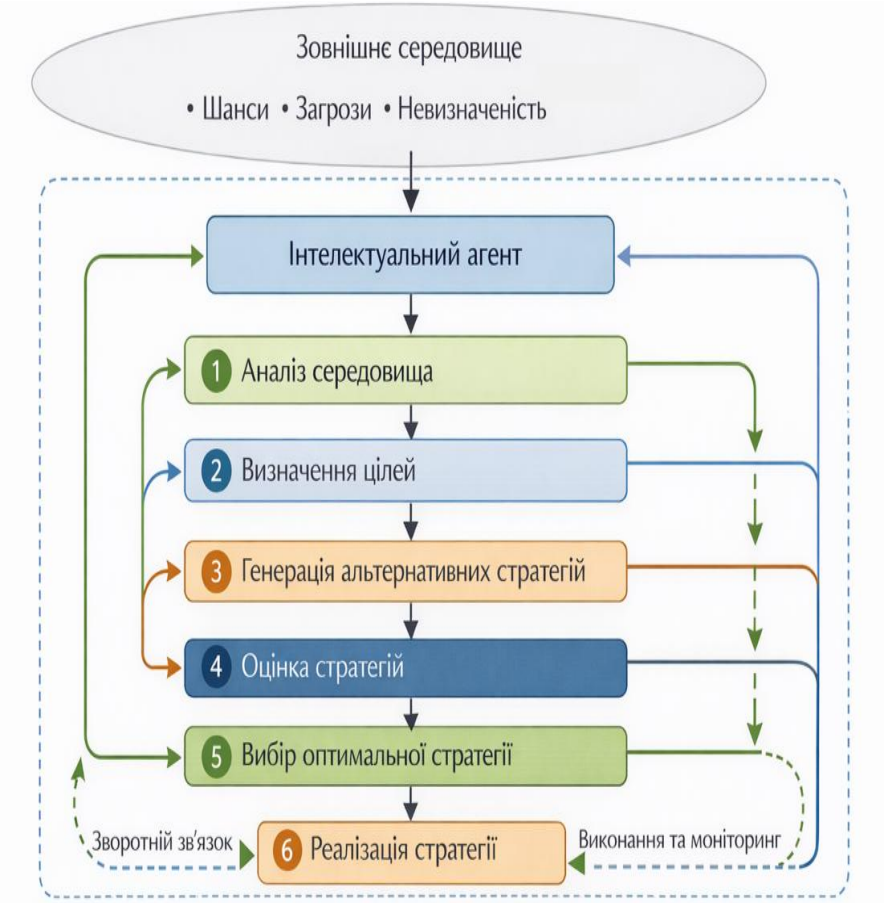

Рис. 2. Схема процесу прийняття стратегічних рішень інтелектуальним агентом *(розроблено автором на основі [3])*

Ефективність функціонування інструментарію значною мірою залежить від здатності агентів оцінювати вплив інформаційної невизначеності на результати прийнятих рішень. У цьому контексті доцільним є використання інтегрованих показників ефективності, які враховують множинність сценаріїв розвитку подій, їх ймовірності та вагові коефіцієнти параметрів. Такий підхід дозволяє здійснювати комплексну оцінку стратегій та обирати ті, що забезпечують максимальний очікуваний результат [4].

Практичне застосування інструментарію передбачає аналіз альтернативних стратегій агентів у різних сценаріях функціонування середовища. Порівняння таких стратегій дозволяє визначити найбільш ефективні підходи до управління ресурсами, мінімізації ризиків та підвищення продуктивності системи в цілому. У таблиці 1 наведено порівняння ефективності різних стратегій інтелектуальних агентів залежно від умов функціонування.

Таблиця 1

Порівняння ефективності стратегій інтелектуальних агентів у різних сценаріях *(розроблено автором на основі [4])*

Стратегія	Ефективність у стабільному середовищі	Ефективність за умов невизначеності	Рівень адаптивності	Інтегрований показник
Реактивна	0,62	0,41	0,35	0,46
Збалансована	0,71	0,58	0,60	0,63
Проактивна (самонавчання)	0,83	0,76	0,88	0,82

Як свідчать наведені дані, найбільш ефективною є проактивна стратегія, що базується на самонавчанні агентів, оскільки вона забезпечує високий рівень адаптивності та здатність до роботи в умовах невизначеності. Це підтверджує доцільність впровадження інструментарію самонавчання як основи стратегічного управління.

Важливим аспектом є також аналіз впливу рівня інформаційної невизначеності на ефективність прийняття рішень. Зі зростанням невизначеності ефективність традиційних підходів знижується, тоді як системи, що базуються на самонавчанні, демонструють відносну стабільність завдяки здатності адаптуватися до нових умов [2, 8]. На рисунку 3 відображено залежність ефективності стратегій агентів від рівня інформаційної невизначеності.

Рис. 3. Залежність ефективності стратегій від рівня інформаційної невизначеності *(розроблено автором на основі [2])*

Інтеграція інструментарію самонавчання у систему управління також сприяє підвищенню ключових показників ефективності, зокрема продуктивності, узгодженості дій та рівня використання ресурсів. Це досягається завдяки синхронізації поведінки агентів та оптимізації їх взаємодії у межах єдиного інформаційного середовища [5, 9]. У таблиці 2 представлено оцінку впливу інструментарію самонавчання на ключові показники ефективності системи.

Таблиця 2

Вплив інструментарію самонавчання на ключові показники ефективності системи *(розроблено автором на основі [5])*

Показник	До впровадження	Після впровадження	Зміна
Продуктивність	0,58	0,81	+0,23
Використання ресурсів	0,63	0,85	+0,22
Рівень ризиків	0,72	0,49	–0,23
Узгодженість дій	0,55	0,83	+0,28

Отримані результати свідчать про суттєве підвищення ефективності функціонування системи внаслідок впровадження інструментарію самонавчання. Зокрема, спостерігається зростання продуктивності та

узгодженості дій, а також зниження рівня ризиків, що є критично важливим для функціонування складних організаційних систем.

Завершальним етапом функціонування інструментарію є візуалізація результатів через аналітичні панелі, які забезпечують доступ до ключових показників ефективності у режимі реального часу. На рисунку 4 представлено архітектуру аналітичної системи підтримки стратегічних рішень, що інтегрує результати самонавчання агентів.

Формування адаптивних стратегій взаємодії інтелектуальних агентів у середовищах із високим рівнем інформаційної невизначеності потребує застосування комплексу взаємодоповнюючих моделей і методів, які забезпечують здатність системи до навчання, прогнозування та узгодження рішень. У таких умовах ключову роль відіграють моделі підкріплювального навчання, що дозволяють агентам формувати поведінкові стратегії на основі накопиченого досвіду та оцінки наслідків власних дій. На відміну від класичних підходів, де рішення приймаються на основі статичних правил, підкріплювальне навчання забезпечує динамічну адаптацію до змін середовища, враховуючи як поточний стан системи, так і очікувані майбутні результати [4, 11-13].

Рис. 4. Архітектура аналітичної системи підтримки стратегічних рішень *(розроблено автором на основі [8])*

У багатосуб'єктному середовищі ефективність індивідуального навчання агентів значною мірою залежить від їх здатності до координації дій, що зумовлює необхідність використання моделей мультиагентного підкріплювального навчання. Такі моделі враховують взаємозалежність рішень різних агентів і дозволяють формувати узгоджені стратегії, орієнтовані на досягнення як індивідуальних, так і колективних цілей [6; 7]. Важливим аспектом є врахування того, що середовище для кожного агента є частково спостережуваним, тому процес навчання повинен базуватися на ймовірнісних оцінках і прогнозах, а не на повній інформації.

З метою формалізації процесів прийняття рішень доцільно використовувати моделі марковських процесів прийняття рішень, які дозволяють описати динаміку переходів між станами системи та оцінити довгострокову ефективність стратегій. У випадку неповної інформації більш релевантними є розширені моделі, що враховують часткову спостережуваність середовища, де агенти формують уявлення про стан системи на основі доступних даних та їх інтерпретації [5]. Це забезпечує можливість прийняття рішень навіть за умов обмеженої інформованості та високої невизначеності.

Важливим доповненням до моделей навчання є застосування елементів теорії ігор, які дозволяють врахувати стратегічну взаємодію між агентами. У межах таких підходів кожен агент розглядається як раціональний суб'єкт, що обирає стратегію з урахуванням можливих дій інших учасників системи. Це дозволяє формувати рівноважні стратегії, які забезпечують стабільність функціонування системи навіть у конкурентному або кооперативному середовищі [6, 14]. Поєднання теорії ігор із методами самонавчання створює передумови для побудови гнучких моделей поведінки, здатних адаптуватися до змін у структурі взаємодії агентів.

На рисунку 5 представлено узагальнену модель формування адаптивних стратегій взаємодії агентів, яка поєднує елементи підкріплювального навчання, ймовірнісного аналізу та стратегічної взаємодії.

У межах запропонованої моделі процес формування стратегії розглядається як багаторівнева система, що включає оцінювання стану середовища, прогнозування можливих сценаріїв, вибір дії та корекцію поведінки на основі отриманого результату. Такий підхід дозволяє забезпечити безперервне вдосконалення стратегій і підвищення їх ефективності в умовах динамічних змін.

Для кількісної оцінки ефективності стратегій доцільно застосовувати інтегровані показники, що враховують множинність факторів, зокрема ризики, ресурси та часові обмеження. У таблиці 3 наведено приклад оцінки ефективності різних моделей формування стратегій у середовищі з різним рівнем невизначеності.

Рис. 5. Модель формування адаптивних стратегій взаємодії агентів *(розроблено автором на основі [6])*

Таблиця 3

Порівняння моделей формування стратегій агентів *(розроблено автором на основі [7])*

Модель	Рівень адаптивності	Стійкість до невизначеності	Узгодженість дій	Інтегрована ефективність
Статична модель	0,32	0,28	0,35	0,31
Ймовірнісна модель	0,55	0,61	0,57	0,58
Підкріплювальне навчання	0,78	0,74	0,71	0,74
Мультиагентне навчання	0,85	0,81	0,88	0,85

Отримані результати свідчать, що найбільш ефективними є моделі, які поєднують механізми самонавчання та координації дій між агентами, що підтверджує доцільність використання мультиагентних підходів [7, 15-18].

З метою врахування динаміки змін середовища важливим є застосування методів прогнозування, що базуються на аналізі трендів і сценарному моделюванні. Такі методи дозволяють агентам не лише реагувати на поточні зміни, але й передбачати можливі варіанти розвитку подій, формуючи відповідні стратегії заздалегідь .

Інтеграція розглянутих моделей і методів у єдину систему дозволяє створити інструментарій, здатний забезпечити ефективне функціонування агентів у складному середовищі. Така система поєднує процеси навчання, аналізу та прийняття рішень, що забезпечує узгодженість дій та підвищення загальної ефективності.

У таблиці 4 представлено узагальнену характеристику методів формування стратегій взаємодії агентів з точки зору їх практичного застосування.

Таблиця 4

Характеристика методів формування адаптивних стратегій

(розроблено автором на основі [7])

Метод	Основна функція	Переваги	Обмеження
Підкріплювальне навчання	Адаптація поведінки	Висока гнучкість	Потребує часу для навчання
Марковські моделі	Формалізація рішень	Чітка структура	Обмеження при неповній інформації
Теорія ігор	Координація стратегій	Врахування взаємодії	Складність реалізації
Ймовірнісні методи	Оцінка невизначеності	Гнучкість прогнозування	Залежність від якості даних

На рисунку 6 представлено узагальнену архітектуру інтегрованої системи формування стратегій, яка об’єднує різні методи в єдину платформу.

Так, ефективне формування адаптивних стратегій взаємодії агентів в умовах інформаційної невизначеності досягається шляхом інтеграції моделей підкріплювального навчання, мультиагентних підходів, ймовірнісного аналізу та теорії ігор. Поєднання цих методів забезпечує здатність системи до самонавчання, прогнозування та координації дій, що є необхідною умовою підвищення ефективності стратегічного управління у складних динамічних середовищах.

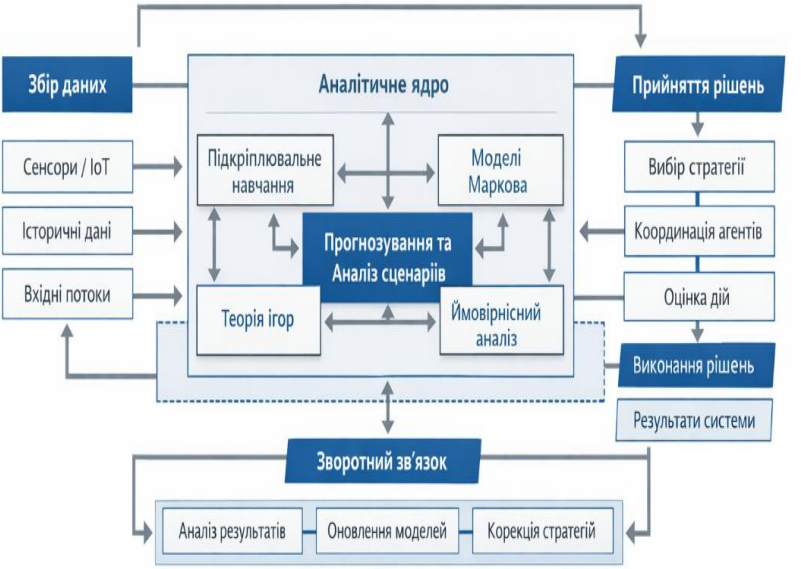

Рис. 6. Архітектура інтегрованої системи формування стратегій взаємодії агентів *(розроблено автором на основі [7])*

Впровадження систем самонавчання у складних організаційних структурах істотно змінює характер управління проєктною діяльністю, оскільки забезпечує перехід від реактивного до адаптивного прийняття рішень. У багатосуб'єктному середовищі, де учасники володіють лише частковою інформацією, саме здатність системи до навчання на основі досвіду дозволяє зменшити невизначеність, підвищити обґрунтованість рішень і забезпечити узгодженість дій між різними елементами організаційної структури [8; 9]. Такий підхід сприяє одночасному покращенню ключових показників ефективності, зниженню ризиків і підвищенню координації дій.

Оцінювання впливу систем самонавчання доцільно здійснювати на основі інтегрованих показників, що відображають сукупний ефект від їх впровадження. Узагальнений інтегрований показник ефективності може бути визначений як:

$$IE = \sum_{i=1}^{n} p_i \times E_i, \quad (1)$$

де IE — інтегрована ефективність; p_i — імовірність сценарію; E_i — ефективність у межах відповідного сценарію.

Для оцінки ключових показників ефективності доцільно використовувати інтегрований KPI-індикатор:

$$KPI_{int} = w_1 K_{prod} + w_2 K_{res} + w_3 K_{time}, \quad (2)$$

де K_{prod} — продуктивність, K_{res} — ефективність використання ресурсів, K_{time} — дотримання графіка, w_i — вагові коефіцієнти.

Рівень ризиків у системі визначається через сумарну оцінку ймовірностей і впливу негативних подій:

$$R = \sum_{j=1}^{m} q_j \times I_j, \quad (3)$$

де q_j — імовірність ризику, I_j — його вплив.

Оцінка узгодженості дій учасників проєкту може бути формалізована через коефіцієнт:

$$C = \frac{N_{agr}}{N_{tot}}, \quad (4)$$

де N_{agr}— кількість узгоджених дій, N_{tot} — загальна кількість взаємодій.

Практичний ефект впровадження систем самонавчання доцільно продемонструвати на прикладі розрахунку. Припустимо, що система функціонує в умовах трьох сценаріїв: затримка постачання (p_1=0,3), перевитрати бюджету (p_2=0,2) та впровадження інновацій (p_3=0,5). Відповідні значення ефективності становлять E_1=0,514 Е, E_2=0,804, E_3=0,550. Тоді:

$$IE = 0{,}3 \times 0{,}514 + 0{,}2 \times 0{,}804 + 0{,}5 \times 0{,}550 = 0{,}590.$$

Для проінноваційної стратегії:

$$IE = 0{,}3 \times 0{,}642 + 0{,}2 \times 0{,}852 + 0{,}5 \times 0{,}875 = 0{,}801.$$

Це свідчить про зростання ефективності при використанні самонавчання.

Розрахунок інтегрованого KPI до впровадження:

$$KPI_{int} = 0{,}4 \times 0{,}58 + 0{,}35 \times 0{,}63 + 0{,}25 \times 0{,}55 = 0{,}590,$$

після впровадження:

$$KPIint = 0{,}4 \times 0{,}81 + 0{,}35 \times 0{,}85 + 0{,}25 \times 0{,}83 = 0{,}829.$$

Рівень ризику до впровадження:

$$R = 0{,}4 \times 0{,}8 + 0{,}3 \times 0{,}7 + 0{,}5 \times 0{,}6 = 0{,}83,$$

після впровадження:

$$R = 0{,}25 \times 0{,}8 + 0{,}2 \times 0{,}7 + 0{,}3 \times 0{,}6 = 0{,}52.$$

Коефіцієнт узгодженості дій зріс:

$$C = 56100 = 0{,}56 \rightarrow C = 84100 = 0{,}84.$$

Отримані результати свідчать про суттєвий позитивний ефект впровадження систем самонавчання, що проявляється у підвищенні продуктивності, оптимізації використання ресурсів, скороченні ризиків і покращенні координації дій між учасниками проєкту [10].

У таблиці 5 узагальнено результати розрахунків, що дозволяє комплексно оцінити вплив систем самонавчання на функціонування організаційної системи.

Таблиця 5

Вплив систем самонавчання на ключові показники ефективності

(розроблено автором на основі [10])

Показник	До впровадження	Після впровадження	Зміна
Інтегрована ефективність (IE)	0,590	0,801	+0,211
Інтегрований KPI	0,590	0,829	+0,239
Інтегрований ризик (R)	0,830	0,520	–0,310
Коефіцієнт узгодженості (C)	0,560	0,840	+0,280

У сучасних умовах цифровізації та стрімкого розвитку автоматизації будівництва зростає роль інтелектуальних агентів як ключових елементів адаптивних систем, здатних до самонавчання й формування оптимальних стратегічних рішень в умовах глибокої інформаційної невизначеності. Використання методів машинного навчання, інженерії, заснованої на знаннях, а також моделей теорії ігор забезпечує можливість не лише прогнозувати поведінку складних техніко-організаційних систем, але й адаптувати стратегії прийняття рішень відповідно до динаміки зовнішніх і внутрішніх чинників. У контексті організації процесу проєктування такі підходи сприяють значному підвищенню якості проектних рішень, оскільки інтелектуальні агенти здатні аналізувати накопичений досвід, оптимізувати взаємодію між учасниками проєкту та своєчасно виявляти ризики на різних стадіях проєктування. У сфері управління якістю та

забезпечення належної якості будівництва системи з агентною логікою дозволяють створювати замкнені цикли збирання, інтерпретації й використання даних для автоматизованого контролю відповідності технологічних операцій проєктним вимогам. Це, у свою чергу, формує передумови для переходу до високорівневих цифрових екосистем, у яких стратегічні рішення ухвалюються на основі об'єктивних даних, інтегрованих інтелектуальних алгоритмів та адаптивних моделей поведінки, що максимально знижує вплив людського чинника та підвищує загальну надійність результатів.

Впровадження систем самонавчання забезпечує комплексне підвищення ефективності функціонування організаційних структур, що проявляється у зростанні ключових показників результативності, зниженні ризиків і посиленні узгодженості дій. Це підтверджує доцільність використання таких систем як базового інструменту стратегічного управління в умовах інформаційної невизначеності [10].

Висновки та перспективи подальших досліджень. У результаті проведеного дослідження було встановлено, що інтелектуальні агенти, наділені властивостями самонавчання та адаптації, формують нову парадигму прийняття стратегічних рішень у будівельній галузі, яка характеризується високим рівнем інформаційної невизначеності та складністю взаємодії між технічними, організаційними й управлінськими компонентами. Застосування інструментів машинного навчання, інженерії, заснованої на знаннях, і моделей теорії ігор дало змогу розкрити потенціал агентних систем щодо оптимізації поведінки учасників проєктно-будівельних процесів, а також щодо формування стійких стратегій реагування на динамічні зовнішні впливи.

Доведено, що впровадження цифрових технологій і агентної логіки в організацію процесу проєктування сприяє переходу від традиційних лінійних моделей взаємодії до адаптивних архітектур, здатних оперативно оцінювати ризики, прогнозувати наслідки стратегічних альтернатив та забезпечувати підвищення якості проектних рішень на всіх стадіях їх формування. Інтелектуальні агенти дозволяють створити цілісні екосистеми автоматизованого аналізу та підтримки рішень, де кожен елемент системи виконує функцію автономного суб'єкта, здатного до накопичення досвіду, узагальнення даних і переорієнтування стратегій відповідно до змін середовища.

Особливого значення набуває встановлення зв'язку між агентними моделями, управлінням якістю та автоматизацією будівництва. Отримані результати підтверджують, що інтеграція самонавчальних алгоритмів у механізми контролю якості дозволяє мінімізувати вплив людського чинника, підвищити точність оцінок, оптимізувати процедури перевірки відповідності й забезпечити проактивне реагування на потенційні відхилення. Це є важливим кроком до створення «розумних» виробничих

середовищ, у яких інтелектуальні агенти формують основу цифрового управління життєвим циклом об'єктів.

Проведений аналіз також демонструє, що агентні системи здатні забезпечити підвищений рівень стійкості й ефективності проєктно-будівельних процесів у ситуаціях, коли інформація є неповною, суперечливою або недоступною. За рахунок механізмів самонавчання агенти здобувають можливість формувати стратегічні рішення, які враховують не лише поточний стан системи, але й досвід попередніх сценаріїв та імовірні поведінкові траєкторії інших учасників. Такий підхід забезпечує більш глибоке розуміння системних залежностей і дає змогу моделювати складні багатокомпонентні процеси з високою точністю.

Отже, результати дослідження підтверджують, що інструментарій інтелектуальних агентів є перспективною основою для створення адаптивних, цифрово орієнтованих систем підтримки стратегічних рішень у будівельній галузі. Його застосування дозволяє суттєво підвищити якість проєктування, ефективність управління, рівень узгодженості між учасниками та загальну надійність технічних і організаційних рішень. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на поглиблену інтеграцію агентних моделей з цифровими платформами (BIM, CDE), розвиток гібридних систем на основі штучного інтелекту та створення повномасштабних симуляційних середовищ для управління складними техніко-економічними системами.

Література

1. Метеленко Н. Г., Коваленко О. В., Голомб В. В., Голомб В. В. Підприємництво в економічному розвитку суспільства : навчальний посібник для здобувачів ступеня вищої освіти магістра спеціальності «Підприємництво та торгівля» освітньо-професійної програми «Економіка підприємства та управління бізнесом». Запоріжжя: Запорізький національний університет, 2025. 81 с.

2. Sutton R. S., Barto A. G. Reinforcement learning: an introduction. 2nd ed. Cambridge, MA : MIT Press, 2018. 552 p.

3. Silver D., Singh S., Precup D., Sutton R. S. Reward is enough. Artificial Intelligence. 2021. Vol. 299. Article 103535. https://doi.org/10.1016/j.artint.2021.103535

4. Gronauer S., Diepold K. Multi-agent deep reinforcement learning: a survey. Artificial Intelligence Review. 2022. Vol. 55. P. 895–943. doi.org/10.1007/s10462-021-09996-w

5. Самоменеджмент : метод. вказ. до вивчення дисц. для здобувачів першого (бакалавр.) рівня вищ. освіти спец. 073 (D3) "Менеджмент" та 071 (D1) "Облік і оподаткування" ден. та заоч. форм навч. / Київ. нац. ун-т буд-ва і архіт. ; Г. М. Рижакова, І. М. Якимчук, Д. О. Приходько та ін. — Київ : КНУБА, 2025. — 59 с. - Бібліогр. : с. 57 - 58.

6. Wooldridge M. An introduction to multiagent systems. 2nd ed. Chichester : John Wiley & Sons, 2020. 484 p.

7. Моделювання інноваційних інтелектуальних систем прийняття рішень в економіці [Електронний ресурс]. Київ : Київський національний економічний університет, 2017. Режим доступу: https://surl.li/sksvmb

8. Shoham Y., Leyton-Brown K. Multiagent systems: algorithmic, game-theoretic, and logical foundations. Cambridge : Cambridge University Press, 2009. 504 p.

9. Чуприна Ю., Алексєєнко В., Матвеїв В., та Ползіков М. Основи функціонування підприємства як єдиної інтегрованої та високоефективної бізнес-системи. Шляхи підвищення ефективності будівництва, 2024, вип. 3(53), С. 57–74. https://doi.org/10.32347/2707-501x.2024.53(3).57-74

10. Russell S., Norvig P. Artificial intelligence: a modern approach. 4th ed. Harlow : Pearson, 2021. 1152 p.

11. Hernández-Leal P., Kartal B., Taylor M. E. A survey and critique of multiagent deep reinforcement learning. Autonomous Agents and Multi-Agent Systems. 2019. Vol. 33, No. 6. P. 750–797. https://doi.org/10.48550/arXiv.1810.05587

12. Alrasheed, K. A. Enhancing construction management with machine learning-integrated building information modeling: a transformative approach. *Discover Civil Engineering*, 2025, 2(155). DOI: https://doi.org/10.1007/s44290-025-00316-7

13. Tugai O. A. Organizational and technological, economic quality control aspects in the construction industry: collective monograph. Lviv-Toruń: Liha-Pres, 2019. 136 p. https://doi.org/10.36059/978-966-397-166-7/77-92

14. Adebayo, Y., Udoh, P., Kamudyariwa, X. B., & Osobajo, O. A. Artificial Intelligence in Construction Project Management: A Structured Literature Review of Its Evolution in Application and Future Trends. *Digital*, 2025, 5(3), 26. https://doi.org/10.3390/digital5030026

15. Datta, S. D., Islam, M., Sobuz, M. H. R., Ahmed, S., & Kar, M. Artificial intelligence and machine learning applications in the project lifecycle of the construction industry: A comprehensive review. *Heliyon*, 2024, 10(5), e26888. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e26888

16. Lu, W., Lou, J., Ababio, B. K., Zhong, R. Y., Bao, Z., Li, X., & Xue, F. Digital technologies for construction sustainability: Status quo, challenges, and future prospects. *npj Materials Sustainability*, 2024, 2(10). https://doi.org/10.1038/s44296-024-00010-2

17. Begić, H., Galić, M., & Dolaček-Alduk, Z. Digitalization and automation in construction project's life-cycle: a review. *Journal of Information Technology in Construction*, 2022, 27, 441–460.https://doi.org/10.36680/j.itcon.2022.021

18. Advancements in digitalization and automation in the construction industry. *IEEE Xplore*, 2024. https://doi.org/10.1109/10912140

V.I. Donenko

Self-learning toolkit for intelligent agents and strategic decision-making under conditions of information uncertainty

Modern complex systems operate in environments characterized by continuous change, increasing volumes of data, and, at the same time, limited access to complete and reliable information. This creates fundamentally new requirements for strategic decision-making processes, which must account for uncertainty, risks, and the dynamic nature of interactions among participants. Under such conditions, intelligent agents capable of autonomous functioning and self-learning become particularly significant, as they can adapt their behavior in response to changes in the external environment.

Self-learning is considered a key mechanism for ensuring the effectiveness of agent activities, based on the accumulation of experience, analysis of previous decisions, and adjustment of interaction strategies. The ability of agents to operate with incomplete, inconsistent, or probabilistic information determines their competitiveness within complex multi-agent systems. An important aspect is the integration of learning and decision-making processes, which enables the formation of coordinated behavioral strategies and ensures effective coordination of actions.

The development of a self-learning toolkit involves the application of a set of interconnected approaches, including machine learning methods, elements of game theory, and probabilistic analysis. Such integration creates the basis for adaptive selection of interaction strategies, evaluation of alternative decisions, and prediction of outcomes in environments with a high level of uncertainty.

Particular attention is paid to ensuring the agents' ability to generalize acquired experience, respond rapidly to changes, and minimize the negative impact of information constraints. This contributes to improving the quality of decision-making and ensuring the long-term stability of system functioning.

The proposed approach is aimed at overcoming the fragmentation of existing solutions and forming a coherent system in which self-learning and strategic choice are considered as interrelated elements. Its practical significance lies in the possibility of applying such a toolkit in the management of complex organizational structures, digital platforms, and economic systems, where performance largely depends on the ability to operate effectively under conditions of uncertainty.

Keywords: intelligent agents, self-learning, strategic decisions, information uncertainty, adaptive systems, organization of the design process, digitalization, construction automation, quality management, quality of design solutions, construction quality, design stages, machine learning, game theory, knowledge-based engineering, construction organization, organizational and technological model, uncertainty, decision-making.

DOI: https://doi.org/10.32347/2707-501x.2025.55(3).233-250

УДК: 69.05:658.7

Максим КЛИС[1]
канд. техн. наук, доцент
ORCID: 0000-0001-6790-8281
Владіслав БУТЕНКО[1]
аспірант каф. Організації та управління будівництвом
ORCID: 0000-0001-7385-3029
Київський національний університет будівництва та архітектури

УДОСКОНАЛЕННЯ ОРГАНІЗАЦІЙНО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ ТА ЛОГІСТИЧНИХ РІШЕНЬ У ЗБІРНОМУ БУДІВНИЦТВІ НА ОСНОВІ УЗГОДЖЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНИХ ПРОЦЕСІВ

У статті розглянуто науково-прикладну проблему удосконалення організаційно-технологічних і логістичних рішень у збірному будівництві на основі узгодження інформаційних процесів між учасниками будівельного виробництва. Актуальність дослідження зумовлена зростанням складності сучасних будівельних проєктів, широким застосуванням збірних залізобетонних конструкцій, розвитком потокових методів організації робіт та необхідністю забезпечення високої ритмічності матеріальних і трудових потоків. Практика реалізації промислових і малоповерхових будівель свідчить, що значна частина втрат ефективності виникає внаслідок неузгодженості проєктних, виробничих та монтажних рішень, що призводить до порушення графіків поставок, простоїв техніки, переробок і збільшення тривалості будівництва.

Метою дослідження є обґрунтування підходу до підвищення ефективності комплектації збірних конструкцій, організації логістичних процесів у потоковому будівництві та технології зведення малоповерхових будівель шляхом формування узгодженого інформаційного середовища. У роботі будівельне виробництво розглядається як складна організаційно-технологічна система, в якій інформаційні потоки є визначальним фактором синхронізації матеріальних, ресурсних і технологічних процесів.

У процесі дослідження застосовано системний підхід, методи структурно-функціонального аналізу, порівняльного оцінювання та узагальнення практичного досвіду організації збірного будівництва. Доведено, що узгодженість інформації між проєктувальниками, виробниками збірних елементів, логістичними службами та монтажними організаціями забезпечує формування раціональних організаційно-технологічних рішень з комплектації конструкцій, сприяє ритмічності потоків та зменшенню логістичних витрат.