

Данілов Сергій Юрійович

Аспірант кафедри менеджменту в будівництві,

<https://orcid.org/0000-0001-9111-9047>

Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ

**МОДЕЛІ РЕАКТИВНОЇ АДАПТАЦІЇ АГЕНТІВ
ДО КОНТЕКСТІВ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ТА ЗМІНИ ПАРАМЕТРІВ
НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА**

***Анотація.** Досліджено моделі реактивної адаптації агентів у динамічних середовищах, де невизначеність та мінливість параметрів вимагають миттєвого прийняття рішень за відсутності централізованого управління. Такі моделі є критично актуальними для цифрових систем, у яких швидкість реагування визначає ефективність управління, стабільність процесів та здатність системи до саморегуляції. Реактивні агенти сприймають зовнішні зміни через сенсорні підсистеми, аналізують відхилення поточних станів середовища та ініціюють адаптивні дії, спрямовані на локальну стабілізацію. Це дозволяє системі зберегти працездатність навіть за умов дефіциту даних або високої динаміки зовнішніх чинників. Реактивна модель передбачає кілька рівнів відповіді: від прямої автоматичної реакції до когнітивно-рефлексивної, що враховує попередній досвід. Для кількісної оцінки ефективності таких реакцій введено коефіцієнт Δ , який описує співвідношення між швидкістю реакції агента та інтенсивністю змін середовища. Це дає змогу оцінювати межі адаптивності системи та визначати зони її стабільного функціонування. Структурна типологія реактивних агентів класифікує їх за типами сенсорних зв'язків, архітектурою взаємодії, логікою вибору дії та рівнем самонавчання. Кожен агент функціонує у межах замкненого циклу «сприйняття – дія – навчання», забезпечуючи обмін інформацією між локальними вузлами системи. Додатково розглянуто особливості інтеграції реактивних агентів у багаторівневі організаційно-технологічні системи, зокрема у сферах управління будівництвом, логістики та цифрового девелопменту. Доведено, що застосування реактивних механізмів сприяє розвитку адаптивного управління, підвищує рівень автономності систем та забезпечує їхню стійкість до непередбачених змін. Реактивна адаптація розглядається як основа для формування інтелектуальних мультиагентних структур, здатних до гнучкої самоорганізації, децентралізованого прийняття рішень і побудови прогнозних сценаріїв. Такий підхід відкриває можливості для створення нових когнітивних архітектур управління, що поєднують реактивність, адаптивність та інтелектуальну стійкість у складних цифрових середовищах.*

Ключові слова: реактивна адаптація; агентна система; невизначеність; мультиагентна взаємодія; адаптивність; когнітивне управління; рефлексивна модель; цифрове середовище; стабільність

Постановка проблеми

У сучасних динамічних системах управління, особливо в галузях будівництва, цифрової логістики та міського девелопменту, ключовим викликом є здатність системи підтримувати стійкість у мінливому середовищі. Класичні централізовані моделі управління не забезпечують достатньої гнучкості й швидкості реакції при раптових змінах параметрів зовнішнього контексту. Це створює передумови для формування реактивних моделей адаптації, у яких агенти діють автономно, реагуючи на зміни без зовнішнього контролю. Проблема полягає у визначенні оптимальної архітектури реактивних агентів, здатних функціонувати в умовах

невизначеності, обмеженого часу та неповної інформації. Необхідно також з'ясувати, яким чином реактивна логіка може бути інтегрована у складні системи управління – від цифрових платформ до багаторівневих ERP-структур. Таким чином, дослідження зосереджується на побудові структурних моделей реактивної адаптації, визначенні типів реакцій, меж адаптивності й способів забезпечення стабільної поведінки агентів у швидкозмінному середовищі.

Мета статті

Метою статті є формування системної моделі реактивної адаптації агентів, здатних забезпечувати стабільність у контекстах невизначеності та частих

змін параметрів навколишнього середовища. Для досягнення цієї мети передбачено: узагальнити типологію реакцій агентів; визначити параметри, що впливають на ефективність реакції; описати архітектуру взаємодії між сенсорними, оцінними, поведінковими та рефлексивними модулями; а також розробити критерії оцінювання меж адаптивності через показник Λ . Практична мета полягає у створенні основ для застосування реактивних агентів у цифрових системах управління, де потрібна висока швидкість реагування, автономність і здатність до навчання на основі досвіду.

Аналіз основних досліджень і публікацій

Питання реактивної адаптації агентів активно досліджуються у міждисциплінарному полі – від кібернетики й штучного інтелекту до управління складними соціотехнічними системами. Основи поведінкових агентів сформувала Патріція Маес (MIT), яка розробила концепцію умовно-рефлекторної поведінки автономних систем, що реагують на сенсорні сигнали без стратегічного планування. Подальший розвиток цієї концепції здійснили Майкл Вулдрідж та Ніколас Дженнінгс (Imperial College London), які створили багаторівневі реактивні архітектури для інформаційно-динамічних середовищ. Їхні роботи заклали основу сучасного розуміння мультиагентної взаємодії, де кожен агент здатний до локальної обробки сигналів і децентралізованого прийняття рішень. Значний внесок зробили також Bonasso, Müller, Guessoum і Nezamoddini, які описали практичні реалізації адаптивних агентних систем у робототехніці, розумних містах та цифровому менеджменті. Попри значний прогрес, у літературі залишається недостатньо опрацьованим питання взаємозв'язку між швидкістю реакції, глибиною обробки інформації та стабільністю системи. Недостатньо вивченими є також межі адаптивності реактивних агентів при надмірній частоті змін контексту. Це створює потребу у побудові моделей, що не лише класифікують типи реакцій, але й визначають умови, за яких система зберігає стійкість. Таким чином, стаття спрямована на подальше узагальнення існуючих підходів і розроблення нової системної типології реактивної адаптації агентів у швидкодинамічному цифровому середовищі.

Виклад основного матеріалу

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 прогнозні 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 IT-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 [1].

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 [2]. 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 рис. 1.

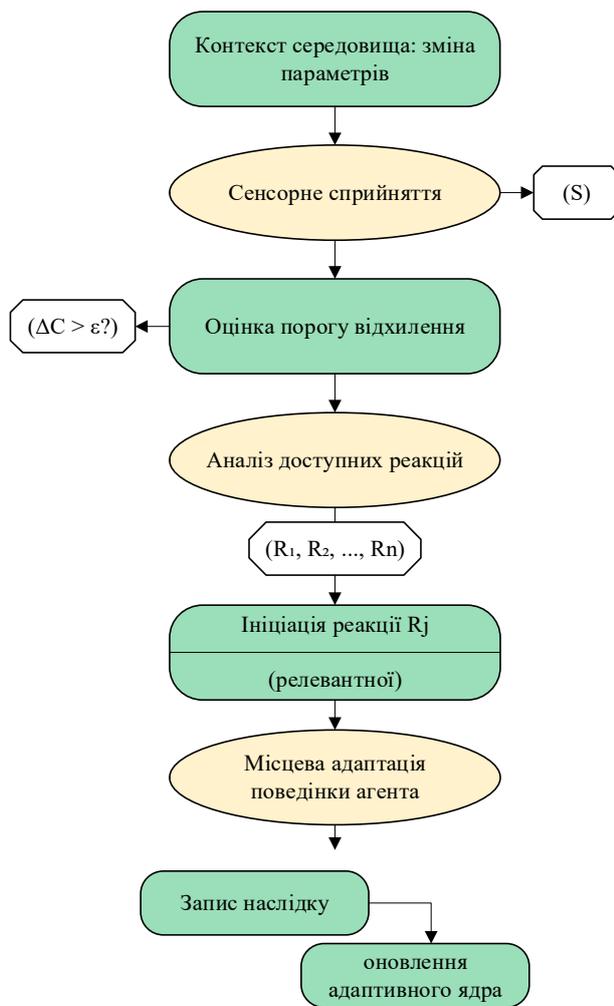


Рисунок 1 – Реактивна адаптація агента в умовах невизначеності навколишнього середовища
Розроблено автором на основі [2].

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. 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 [3].

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 Маєс, 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 Дженнінга, які заклали основи для формалізації мультиагентної взаємодії з реактивною логікою [4; 5]. 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:

$$R^*(t) = \arg \min_{R_i \in R} \Phi(R_i, S(t), E(t)), \quad (1)$$

де Φ – 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 [6].

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:

$$R^*(t) = \arg \min_{R_i} \sum_{k=1}^m w_k \times \delta_k(R_i, E_k(t)), \quad (2)$$

де w_k – ваговий коефіцієнт важливості параметра k ; δ_k – відхилення реакції R_i від цільового стану за параметром E_k ; 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:

$$A = \frac{\int_{t_0}^{t_1} \|\nabla E(t)\| dt}{\int_{t_0}^{t_1} \|\nabla R(t)\| dt}, \quad (3)$$

де A – коефіцієнт адаптивного навантаження; $\nabla E(t)$ – градієнт зміни параметрів середовища; $\nabla R(t)$ – швидкість оновлення реакційного простору агента.

Значення $A < 1$ вказує на те, що агент встигає реагувати, тоді як $A > 1$ 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 проектах, 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 високо-

навантажених середовищ, зокрема – будівельних ERP-систем, цифрових логістичних платформ, інфраструктурних мереж управління. Нижче представлено таблицю, 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 Λ [7].

Для кращого розуміння розподілу типів реакцій і рівнів адаптивності пропонується табл. 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 Λ) 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 багатопарових 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). 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 [8]. 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 рис. 2.

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:

$$A_{eff} = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} \left[1 - \frac{|\hat{R}(t) - R_{opt}(t)|}{R_{max}} \right] dt, \quad (4)$$

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.

Таблиця 1 – Структурна типологія реактивних моделей агентної поведінки в умовах динамічного середовища (розроблено автором на основі [7])

Тип збурення	Рівень обробки	Архітектура агента	Механізм вибору дії	Межа адаптивності, (Λ)
Сигнальне (S)	Пряма відповідь	Статичний одношаровий	Жорстко заштитий 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	Напіваавтономна 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)

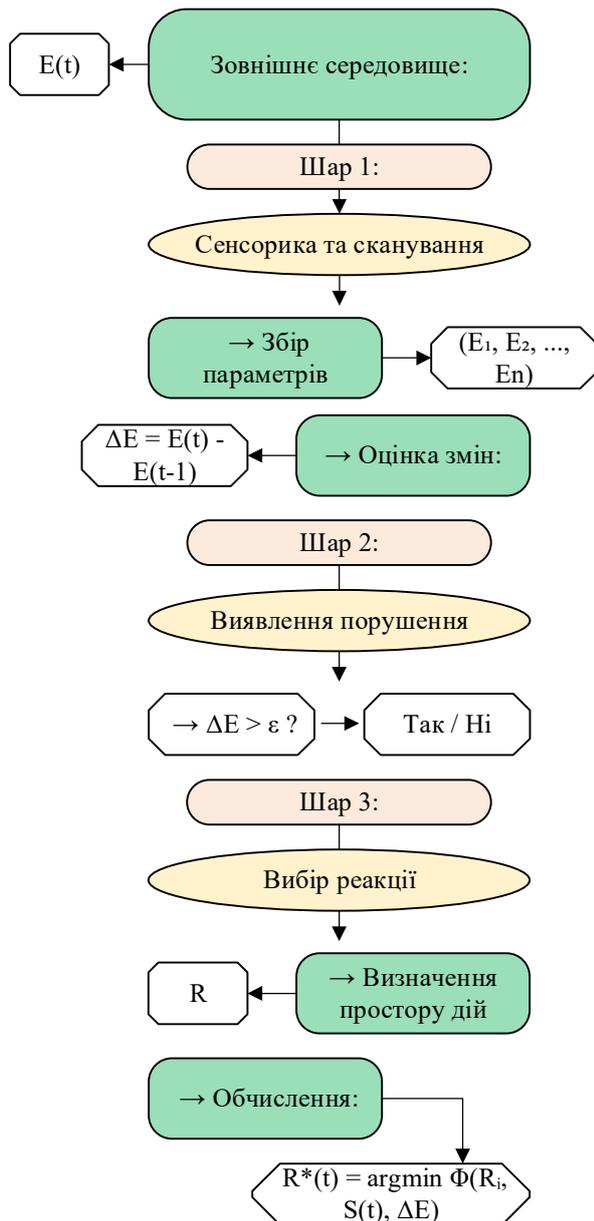


Рисунок 2 – Багаторівнева архітектура реактивної адаптації агента в складному динамічному середовищі
Розроблено автором на основі [8].

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 [9]. Таке порівняння дозволяє виявити не лише сильні й слабкі сторони конкретних моделей, а й обґрунтовано обрати відповідну архітектуру агента для певного типу проекту 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 [10].

Щоб сформувати структуроване бачення потенціалу реактивних агентів у різних сценаріях, пропонується табл. 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.

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 [11]. Натомість для гнучких систем стратегічного управління, з можливістю глибокого навчання та оптимізації, найкращими виявляються гібридні реактивно-когнітивні архітектури.

Висновки

Проведене дослідження дозволило сформувати системне уявлення про механізми реактивної адаптації агентів у складних, динамічних і невизначених середовищах.

У межах роботи встановлено, що ключовою перевагою реактивних моделей є їхня здатність забезпечувати безперервну стабільність системи за умов мінливості параметрів зовнішнього середовища, коли традиційні предиктивні або централізовані підходи стають недостатньо ефективними. Реактивна логіка дозволяє кожному агенту діяти автономно, аналізувати контекст та ініціювати дії на основі локальних сигналів без очікування централізованих команд, що значно підвищує швидкість реагування та загальну гнучкість системи.

Таблиця 2 – Характеристика типів реактивних агентів за ключовими адаптивними властивостями (розроблено автором на основі [10])

Клас агента	Рівень контекстної обробки	Енерго-споживання	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)	Коротко-строкова	Висока
Багато-модульний 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)

Наукова новизна роботи полягає у розробці структурної типології реактивних моделей агентної поведінки, яка систематизує їх за типами збурень, архітектурою взаємодії, логікою прийняття рішень і межами адаптивності. Введення коефіцієнта Λ (лямбда) дозволило кількісно описати баланс між швидкістю реакції агента та рівнем мінливості середовища, визначаючи межі його стійкого функціонування. Це дає змогу використовувати аналітичні методи для оцінки ефективності моделей та оптимізації їхньої поведінки у цифрових системах реального часу.

Практична значущість дослідження підтверджується можливістю впровадження реактивних моделей у різні сфери діяльності – від систем управління будівництвом і логістикою до цифрового девелопменту та ERP-платформ. Реактивні агенти демонструють високу результативність у забезпеченні адаптивного управління, оптимізації ресурсних потоків і

запобіганні кризовим відхиленням у складних інфраструктурних проєктах.

Запропонована багаторівнева архітектура реактивної адаптації поєднує сенсорну обробку, рефлексивне навчання та децентралізоване ухвалення рішень, що забезпечує системі здатність до самоорганізації. Це створює підґрунтя для побудови інтелектуальних мультиагентних систем нового покоління, які поєднують реактивність, когнітивну обробку інформації та аналітичну адаптивність.

У підсумку можна стверджувати, що моделі реактивної адаптації є важливим етапом еволюції управлінських систем у цифрову добу. Вони відкривають перспективи формування когнітивно-адаптивних архітектур, здатних не лише реагувати на зміни, а й прогнозувати їх, забезпечуючи стійкість, ефективність та інтелектуальну автономію складних соціотехнічних систем.

Список літератури

1. Мозаїка проєктів. Project Size and Categorisation – Guideline Updated. 2024. URL: <https://mosaicprojects.wordpress.com/2024/07/01/project-size-and-categorization-guideline-updated/>.
2. Вайдмен, Р. М. Total Project Management of Complex Projects: Improving Performance with Modern Techniques. – AEW Services, 2001. URL: https://www.researchgate.net/publication/228467516_Total_Project_Management_of_Complex_Projects_Improving_Performance_with_Modern_Techniques.

3. Пінто, М. Б. Determinants of Cross-Functional Cooperation in the Project Implementation Process. *Project Management Journal*, 1990. 21 (2). С. 13–20. URL: <https://www.wcu.edu/pmi/1996/J91JUN13.PDF>.
4. Маес, П. Modeling adaptive autonomous agents. *Artificial Life IV: Proceedings of the Fourth International Workshop on the Synthesis and Simulation of Living Systems*, 1994. С. 135–150. URL: <https://dl.acm.org/doi/10.1145/280765.280886>.
5. Вулдрідж, М., & Дженнінгс, Н. Intelligent agents: theory and practice. *The Knowledge Engineering Review*, 1995. 10 (2). С. 115–152. URL: <https://doi.org/10.1017/S0269888900008122>.
6. Jennings, N. R., & Wooldridge, M. Applications of intelligent agents. *Agent Technology: Foundations, Applications, and Markets*. Springer, 1995. С. 3–28. URL: <https://www.jasss.org/2/3/sichman.html>.
7. Müller, J. P., Pischel, M., & Thiel, M. Modeling reactive behaviour in vertically layered agent architectures. *Intelligent Agents: Theories, Architectures, and Languages*. Springer-Verlag, 1995. С. 261–276. DOI: <https://doi.org/10.1007/3-540-58855-8>.
8. Хоменко О. М., Петренко Г. С., Рижаківа Г. М., Петруха Н. М., Чуприна Ю. А., Малихіна О. М., Кушнір О. К. Сучасні інструменти та програмні продукти адміністрування будівельними організаціями в умовах трансформації операційних систем менеджменту. *Управління розвитком складних систем*. Київ, 2022. № 52. С. 113 – 125. [dx.doi.org/10.32347/2412-9933.2022.52.113-125](https://doi.org/10.32347/2412-9933.2022.52.113-125).
9. Войтович, В. А., Чуприна, Ю. А. Оптимізація та контроль програми робіт в підсистемі фінансового менеджменту будівельної організації. *Шляхи підвищення ефективності будівництва*, 2023. 1 (51). С. 129–142.
10. Nezamodini, N., & Gholami, A. A Survey of Adaptive Multi-Agent Networks and Their Applications in Smart Cities. *Smart Cities*, 2022. 5(1). С. 318–347. URL: <https://doi.org/10.3390/smartcities5010019>.
11. Guessoum, Z. Adaptive Agents and Multiagent Systems. *IEEE Distributed Systems Online*, 2004. 5 (7). DOI: <https://doi.org/10.1109/DSO.2004.1342261>.

Стаття надійшла до редколегії 05.12.2025

Danilov Serhii

Postgraduate student of the Department of Construction Management,
<https://orcid.org/0000-0001-9111-9047>
Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine

MODELS OF REACTIVE ADAPTATION OF AGENTS TO CONTEXTS OF UNCERTAINTY AND CHANGING ENVIRONMENTAL PARAMETERS

Abstract. The paper explores models of reactive adaptation of agents in dynamic environments, where uncertainty and fluctuations in parameters require immediate decision-making without centralized control. Such models are relevant for digital systems in which response speed determines management efficiency, process stability, and the system's capacity for self-regulation. Reactive agents perceive external changes through sensory subsystems, analyze deviations in the current state of the environment, and initiate adaptive actions aimed at local stabilization. This allows the system to maintain functionality even under conditions of incomplete data or high variability of external factors. The reactive model incorporates several levels of response – from direct automatic reactions to cognitive-reflexive ones that take prior experience into account. To quantify the effectiveness of these reactions, the coefficient Λ is introduced, which describes the relationship between the agent's reaction speed and the intensity of environmental changes. This makes it possible to evaluate the limits of the system's adaptability and define zones of stable functioning. The structural typology of reactive agents classifies them by types of sensory connections, interaction architecture, decision-making logic, and level of self-learning. Each agent operates within a closed “perception–action–learning” loop, ensuring continuous information exchange between local nodes of the system. The study also examines the integration of reactive agents into multi-level organizational and technological systems – particularly in the fields of construction management, logistics, and digital development. It is shown that the application of reactive mechanisms contributes to the development of adaptive management, increases the level of system autonomy, and ensures resilience to unforeseen changes. Reactive adaptation is considered the foundation for forming intelligent multi-agent structures capable of flexible self-organization, decentralized decision-making, and scenario forecasting based on accumulated experience. This approach opens new opportunities for the creation of cognitive management architectures that combine reactivity, adaptability, and intellectual resilience in complex digital environments.

Keywords: reactive adaptation; agent system; uncertainty; multi-agent interaction; adaptability; cognitive management; reflexive model; digital environment; stability

References

1. Mosaic Projects. (2024). *Project Size and Categorisation – Guideline Updated*. URL: <https://mosaicprojects.wordpress.com/2024/07/01/project-size-and-categorization-guideline-updated/>.
2. Wideman, R. M. (2001). *Total Project Management of Complex Projects: Improving Performance with Modern Techniques*. AEW Services. URL: https://www.researchgate.net/publication/228467516_Total_Project_Management_of_Complex_Projects_Improving_Performance_with_Modern_Techniques.

3. Pinto, M. B. (1990). Determinants of cross-functional cooperation in the project implementation process. *Project Management Journal*, 21(2), 13–20. URL: <https://www.wcu.edu/pmi/1996/J91JUN13.PDF>.
 4. Maes, P. (1994). Modeling adaptive autonomous agents. *Artificial Life IV: Proceedings of the Fourth International Workshop on the Synthesis and Simulation of Living Systems*, 135–150. URL: <https://dl.acm.org/doi/10.1145/280765.280886>.
 5. Wooldridge, M., & Jennings, N. (1995). Intelligent agents: theory and practice. *The Knowledge Engineering Review*, 10(2), 115–152. URL: <https://doi.org/10.1017/S0269888900008122>.
 6. Jennings, N. R., & Wooldridge, M. (1995). Applications of intelligent agents. *Agent Technology: Foundations, Applications, and Markets*, 3–28. URL: <https://www.jasss.org/2/3/sichman.html>.
 7. Müller, J. P., Pischel, M., & Thiel, M. (1995). Modeling reactive behaviour in vertically layered agent architectures. *Intelligent Agents: Theories, Architectures, and Languages*, 261–276. DOI: <https://doi.org/10.1007/3-540-58855-8>.
 8. Homenko, Oleksandr, Petrenko, Hanna, Ryzhakova, Galyna, Chupryna, Yuriy, Malykhina, Oksana, Petrukha, Nina & Kushnir, Olesii. (2022). Modern tools and software products for the administration of construction organizations in the conditions of transformation of operational management systems. *Management of Development of Complex Systems*, 52, 113–125. [dx.doi.org/10.32347/2412-9933.2022.52.113-125](https://doi.org/10.32347/2412-9933.2022.52.113-125).
 9. Voitovych, V. A., & Chupryna, Yu. A. (2023). Optimization and control of the work program in the subsystem of financial management of a construction organization. *Ways to Improve Building Efficiency*, 1 (51), 129–142.
 10. Nezamodini, N., & Gholami, A. (2022). A survey of adaptive multi-agent networks and their applications in smart cities. *Smart Cities*, 5 (1), 318–347. URL: <https://doi.org/10.3390/smartcities5010019>.
 11. Guessoum, Z. (2004). Adaptive agents and multiagent systems. *IEEE Distributed Systems Online*, 5 (7). DOI: <https://doi.org/10.1109/DSO.2004.1342261>.
-

Посилання на публікацію

- APA Danilov S. (2025). Models of reactive adaptation of agents to contexts of uncertainty and changing environmental parameters. *Management of Development of Complex Systems*, 64, 185–193. [dx.doi.org/10.32347/2412-9933.2025.64.185-193](https://doi.org/10.32347/2412-9933.2025.64.185-193).
- ДСТУ Данілов С. Ю. Моделі реактивної адаптації агентів до контекстів невизначеності та зміни параметрів навколишнього середовища. *Управління розвитком складних систем*. Київ, 2025. № 64. С. 185 – 193. [dx.doi.org/10.32347/2412-9933.2025.64.185-193](https://doi.org/10.32347/2412-9933.2025.64.185-193).