

Цяпа С.М.Український науково-дослідний інститут спеціальної техніки та судових експертних
Служби безпеки України

ДЕЯКІ АСПЕКТИ АРХІТЕКТУРНОЇ ІНТЕГРАЦІЇ АВТОНОМНИХ СИСТЕМ

У статті досліджується актуальна проблема розробки стійких архітектур керування для автономних робототехнічних систем, з особливим акцентом на надійній інтеграції механізмів деліберативного планування, контролю виконання та реактивного керування. Незважаючи на значний прогрес у розробці алгоритмів сприйняття, ймовірного аналізу та підходів, заснованих на навчанні, синтез цих рівнів у цілісну операційну структуру залишається серйозним науковим та інженерним завданням. Існуючі підходи, від архітектур субсумції на основі поведінки до планувальників на основі образів та гібридних трирівневих моделей, надають часткові рішення, але не забезпечують безперервної синхронізації, масштабованості та верифікованості в реальних умовах. Такі обмеження створюють постійний розрив між теоретичними моделями автономності та їх практичним застосуванням у складних, динамічних та непередбачуваних середовищах.

Систематичний аналіз сучасних досліджень виявляє кілька критичних недоліків. Реактивні системи, хоча й ефективні в динамічних взаємодіях, не мають стратегічного аналізу, тоді як системам образного аналізу часто не вистачає обчислювальних потужностей для обробки неповної інформації. Гібридні моделі, включаючи інтегровані системи процедурного аналізу та тимчасові системи аналізу, передбачають структурований підхід, але залишаються обмеженими через недостатню синхронізацію протоколів та відсутність чітких методів оцінки. Крім того, сучасне впровадження ймовірнісних систем та глибокого навчання з підкріпленням розширило адаптивність автономних систем, але водночас створило проблеми, пов'язані з непрозорістю, передбачуваністю та валідацією. Когнітивні архітектури, ґрунтовані на людському мисленні, такі як SOAR та ACT-R, забезпечують додаткову гнучкість, але все ще мають семантичні невідповідності з низькорівневим сенсомоторним виконанням. Для усунення цих недоліків у дослідженні акцентується увага на багаторівневій архітектурній структурі, яка об'єднує деліберативне планування, процедурний моніторинг та модульний реактивний контроль у принципову, контрольовану та масштабовану систему. Методологія акцентує увагу на формальній специфікації функціональних модулів, адаптивних механізмах моніторингу, здатних вирішувати колізії в режимі реального часу, та тимчасових системах планування, синхронізованих з політиками контролю. Методологія наголошує на формальній специфікації функціональних модулів, адаптивних механізмах моніторингу. Важливим елементом структури є протоколи міжрівневого зв'язку, які гарантують логічну та часову узгодженість між образним мисленням, моніторингом виконання та реактивними модулями. Архітектура додатково розширена для врахування досягнень у галузі ймовірного мислення, глибокого навчання з підкріпленням та нейро-образної інтеграції, що забезпечує адаптивність без порушення прозорості та безпеки.

Прогнозовані результати проведеного аналізу включають визначення узагальнених принципів проектування та стратегій інтеграції, які можуть підвищити надійність виконання завдань, взаємодію з навколишнім середовищем та стійкість у різних умовах експлуатації. Забезпечуючи структуровану методологію для систематичної розробки архітектур керування, дослідження формують як теоретичну основу, так і практичний план дій для розвитку автономності роботів. Крім того, така структура підтримує майбутні напрямки в автономії розподілених мереж роботів, взаємодії людини і робота та етичному прийнятті рішень, тим самим розширюючи свою актуальність за межі технічних характеристик до суспільної прийнятності та довіри до автономних систем. В роботі показано, що реалізація робототехнічних платформ наступного покоління, здатних самостійно функціонувати в складних, непередбачуваних і небезпечних середовищах, суттєво залежить від принципів інтеграції рівнів прийняття рішень, нагляду та реагування в єдину архітектуру.

Ключові слова: автономні роботизовані системи, архітектури керування, інтеграція деліберативного та реактивного рівнів, супервізорний контроль, гібридні архітектури автономії.

Постановка проблеми. Проблема проектування архітектури, яка б забезпечувала автономність роботів є однією з найважливіших і невирішених проблем сучасної робототехніки та штучного інтелекту [1]. Автономність у цьому контексті слід розуміти не просто як здатність робота виконувати завдання без безпосереднього втручання людини, а як здатність робота досягати цілей, передбачати та планувати свої дії, а також адаптивно регулювати свою поведінку у відповідь на динамічне, невизначене і часто агресивне середовище. Така перспектива позиціонує автономність як наукову межу та технологічну необхідність [2]. З наукової точки зору, складність виникає через необхідність узгодити три традиційно розбіжні парадигми контролю: обдумане міркування, яке дозволяє роботу генерувати тимчасово розширені та цілеспрямовані плани; виконання в режимі реального часу, яке забезпечує реалізацію цих планів за умов часових обмежень; та оперативна реакція, яка гарантує своєчасну та відповідну контекстну адаптацію до непередбачених подій. Інтеграція цих підходів у єдину архітектуру потребує прогресу в області формальних представлень, тимчасового міркування, гібридної образно-числової обробки та механізмів надійного прийняття рішень в умовах невизначеності. Більше того, це піднімає певні питання щодо природи раціональної діяльності в штучних системах та ступеня, до якого такі системи можуть досягти адаптивного, контекстно-орієнтованого інтелекту.

Практичне значення цієї проблеми є не менш важливим. Автономність є основою використання роботів у сферах, які характеризуються недоступністю, ризиком або масштабами, що перевищують людські можливості.

Прикладами можуть слугувати дослідження планет і глибоководних районів, операції з ліквідації наслідків катастроф, виведення з експлуатації ядерних об'єктів та спостереження у небезпечному середовищі [3]. У промисловій та цивільній сферах автономні роботи мають вирішальне значення для забезпечення адаптивного виробництва, великомасштабної логістики, автоматизації сільського господарства та сервісної робототехніки в охороні здоров'я та міській інфраструктурі. У секторі оборони та безпеки автономність все частіше визнається стратегічним чинником оперативної переваги, особливо в сценаріях розвідки, картографування, супроводу та спільних місій.

Слід зауважити, що проблема автономності роботів не зводиться до вузького технічного питання, а повинна розглядатися як багаторів-

невий науковий та інженерний комплекс задач, що поєднує в собі алгоритмічні інновації, проектування на системному рівні та обмеження, зумовлені застосуванням. Головним завданням є розробка архітектурних моделей, які одночасно забезпечують надійність, адаптивність та масштабованість, тим самим дозволяючи роботам виконувати складні місії з рівнем незалежності, надійності та безпеки, що є порівнянним або перевищує аналогічні показники людини в аналогічних умовах.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Архітектурний дизайн автономних робото-технічних систем вже давно є центральним напрямком досліджень у галузі робототехніки та штучного інтелекту [4]. Історичний розвиток цієї галузі вказує на постійну конкуренцію між повністю реактивними та повністю усвідомленими парадигмами. Попередні розробки, такі як архітектура доповнення Брукса, акцентували увагу на децентралізованому, поведінковому контролі, в якому інтелект виникає з комбінації простих реактивних модулів [5]. Ці системи показали надійність та ефективність у завданнях навігації в режимі реального часу, але не мали здатності до складного аналізу, довгострокового планування та явного управління цілями. На відміну від цього, символічні підходи до штучного інтелекту, прикладом яких є моделі планування, похідні від STRIPS, та методи ієрархічної мережі завдань, наділили роботів явними механізмами міркування [6]. Ця лінія досліджень привела до створення вдосконалених систем тимчасового планування, таких як IxTeT, здатних генерувати частково впорядковані послідовності завдань в умовах часових обмежень. Однак такі підходи часто були обчислювально складними, чутливими до неповноти моделей і непридатними для середовищ, які характеризуються високою невизначеністю та непередбачуваністю. Гібридна архітектурна парадигма з'явилася як компроміс між цими двома протилежностями. Важливим внеском є архітектура LAAS-CNRS, яка інтегрувала трирівневу ієрархію: рівень прийняття рішень (планувальник/супервізор), рівень виконання (моніторинг і координація завдань) та функціональний рівень (сенсорно-моторні модулі) [7]. У рамках цієї роботи було представлено набір допоміжних інструментів — IxTeT (тимчасовий планувальник), PRS (система процедурного міркування), Kheops (виконавчий модуль на основі правил) та GenoM (модульна інтеграційна структура) — які разом забезпечили систематичну модель для поєднання обмірковування,

виконання та реагування. Подібні концепції пізніше були втілені в архітектурах, таких як 3T та базова модель NASREM для телеробототехніки, які здійснили вплив на наступні покоління автономних систем [8].

Нещодавні дослідження розширили сферу автономності за кількома основними напрямками:

- когнітивні архітектури – адаптація моделей когнітивних процесів, подібних до людських, таких як SOAR та ACT-R, та мали на меті надати роботам можливості образного мислення, епізодичної пам'яті та метакогнітивного регулювання [9]. Ці системи дозволяють приймати рішення на вищому рівні, навчатися виконанню завдань та гнучко адаптуватися в багатозадачних умовах. Однак їх інтеграція з низькорівневим сприйняттям та контролем залишається неповною, що створює розрив між когнітивним мисленням та сенсомоторним виконанням;

- імовірнісна автономність з урахуванням невизначеності – поява імовірнісної робототехніки призвела до широкого застосування методів байєсівського фільтрування, локалізації на основі частинок та частково спостережуваних марковських процесів прийняття рішень (POMDP – Partially Observable Markov Decision Process) [10]. Ці методи дозволяють роботам планувати та діяти в умовах невизначеності, але їхні обчислювальні потужності перешкоджають масштабуванню в реальному часі в складних середовищах;

- методи, засновані на навчанні – розвиток глибокого навчання з підкріпленням (DRL) започаткував нові напрямки в навчанні комплексних принципів автономності. Алгоритми, такі як Deep Q-Networks, Proximal Policy Optimization та ієрархічні підходи DRL, дозволили роботам застосовувати адаптивні стратегії поведінки у багатовимірних безперервних просторах [11]. Більше того, поєднання DRL з плануванням на основі моделей (наприклад, архітектури типу AlphaZero) відкриває нові можливості для гібридної інтеграції навчання та планування. Проте труднощі залишаються: стратегії DRL часто є непрозорими («чорний ящик»), неефективними з точки зору вибірки та не мають формальних гарантій безпеки або пояснюваності — властивостей, необхідних для застосування в критичних сферах;

- розподілена автономія та автономія рою роботів – зі зростанням попиту на робототехніку рою та колективні місії, дослідження зосередилися на архітектурах для розподіленого прийняття рішень та координації. Фреймворки, засновані на алгоритмах узгодження, децентралі-

зованих POMDP (Dec-POMDP) та розподіленому розподілі завдань, дозволили командам з декількох роботів досягати колективних цілей, таких як дослідження, картографування та відстеження цілей. Однак забезпечення масштабованості, відмовостійкості та надійності проти збоїв у комунікації залишається невирішеною проблемою [12];

- етична, зрозуміла та орієнтована на людину автономність – інша тенденція підкреслює важливість використання контрольованого штучного інтелекту та етичного прийняття рішень у сфері автономної роботи роботів [13]. У міру того, як автономні системи все більше інтегруються в людське середовище, необхідність прозорості, підзвітності та відповідності суспільним цінностям стає актуальним напрямком досліджень.

Незважаючи на цей прогрес, ряд невирішених питань обмежує сучасний стан розвитку технологій:

- масштабованість гібридних архітектур – сучасні багатопланові фреймворки часто не витримують комбінаторної складності реальних завдань, оскільки не мають принципових методів модульної абстракції та композиційного міркування;

- інтеграція навчання з образним міркуванням – поєднання політик DRL, які базуються на даних, з образними планувальниками та когнітивними моделями залишається в основному невирішеною проблемою. Гібридні нейро-образні методи є перспективними, але все ще недосконалими;

- верифікація та безпека в умовах невизначеності – незважаючи на дослідження формальних методів (наприклад, перевірка моделей, верифікація часової логіки), забезпечення доказових гарантій у стохастичних та ворожих середовищах все ще залишається недосяжним.

Сучасні дослідження в галузі автономних робототехнічних архітектур відображають значний технологічний прогрес. Проте проблема забезпечення надійної інтеграції механізмів прийняття рішень, контролю та реагування залишається недостатньо вирішеною. Критичний аналіз існуючих наукових досліджень виявляє відсутність цілісних рішень, які б заповнили прогалину між теоретичними моделями автономності та їх практичним впровадженням у складних реальних умовах. Ця прогалина обмежує ефективне впровадження інноваційних підходів у розробку автономних робототехнічних систем наступного покоління.

Одне з ключових обмежень сучасних досліджень полягає в неповній оцінці ефективності інтегрованих архітектурних фреймворків. Біль-

шість доступних методологій, як правило, зосереджуються або на когнітивних, або на реактивних аспектах автономності, не надаючи необхідного рівня деталізації для відображення тонких, але важливих взаємодій між архітектурними рівнями. Як результат, багато запропонованих фреймворків керування мають структурні недоліки, що призводить до неоптимальної адаптивності, зниженої надійності роботи та обмеженої масштабованості при застосуванні до гетерогенних робототехнічних платформ.

Метою цього дослідження є проведення систематичного аналізу існуючих архітектурних стратегій автономності, з особливим акцентом на їхній здатності інтегрувати планування, контроль та реагування в режимі реального часу. Поєднуючи теоретичне моделювання з емпіричною оцінкою, дослідження має на меті визначити та обґрунтувати найефективніші архітектурні конфігурації, що покращують виконання завдань, взаємодію з навколишнім середовищем та загальну стійкість системи. Основний внесок полягає у формулюванні багаторівневої структури, яка об'єднує планування, процедурний контроль та модульне реактивне керування, забезпечуючи надійну автономність у різних умовах експлуатації. Завдяки такому підходу можливо не тільки виявити недоліки сучасних архітектурних моделей, але й окреслити структуровану методологію їх вдосконалення.

Виклад основного матеріалу. Проблематика розробки надійних архітектур керування автономними робототехнічними системами знаходиться на стику штучного інтелекту, системної інженерії та робототехніки. Хоча в останні десятиліття відбувся значний прогрес у галузі алгоритмів обробки інформації, методів керування та машинного навчання, інтеграція рівнів прийняття рішень, контролю та реагування в єдину операційну систему залишається лише частково вирішеною. Сучасні рішення часто виявляються ефективними в окремих сферах – наприклад, планувальники на основі образів дозволяють розбивати завдання на прості задачі, а реактивні системи забезпечують надійну реакцію в режимі реального часу, – але відсутність безперервної координації між цими рівнями створює серйозні обмеження при використанні роботів у динамічних, невизначених або небезпечних середовищах. Ця проблема інтеграції є ключовою для реалізації автономності роботів наступного покоління, оскільки вона безпосередньо впливає на надійність, адаптивність та безпеку виконання завдань.

Систематичний огляд існуючих архітектурних стратегій вказує на еволюцію автономності від ранніх реактивних парадигм до гібридних багатошарових структур. Підходи, засновані на поведінці, прикладом яких є архітектура доповнення Брукса, продемонстрували, що складні моделі поведінки можуть виникати з комбінації простих багатошарових модулів. Хоча ці системи є ефективними в середовищах, де потрібне швидке реагування, вони виявилися недостатніми для завдань, які потребують тимчасової абстракції, аналізу цілей або координації декількох завдань. Щоб подолати ці обмеження, планувальники на основі образів та системи мереж завдань запровадили можливість довгострокового прийняття рішень за допомогою явних моделей світу та аналізу на основі обмежень. Однак високі обчислювальні потреби та нестабільність за умови недостатності інформації обмежували їхню можливість застосування. Згодом з'явилися гібридні архітектури як спроба поєднати ці розбіжні підходи шляхом поєднання процесів міркування, виконання під наглядом та реактивного контролю. Незважаючи на їх концептуальну перспективність, практична інтеграція між цими рівнями залишається непослідовною, з постійними компромісами між масштабованістю, швидкістю реагування та надійністю.

Одним з найпоширеніших недоліків сучасних гібридних архітектур є відсутність надійних механізмів синхронізації між рівнями керування. На практиці планувальники на основі образів часто генерують послідовності завдань, які не враховують належним чином невизначеності, притаманні низькорівневому сприйняттю та активації. І навпаки, реактивні модулі можуть замінювати заплановані дії у відповідь на поточні подразники навколишнього середовища, що призводить до невідповідностей або збоїв на рівні місії. Хоча системи нагляду і призначені для врегулювання таких конфліктів, існуючі рішення часто не мають формальних гарантій, необхідних для забезпечення логічної та часової узгодженості під час виконання завдань. Відсутність чітких механізмів координації стає особливо проблематичною в областях з високими ризиками, таких як дослідження планет, операції оборонного характеру або пошуково-рятувальні місії, де порушення синхронізації можуть мати катастрофічні наслідки. Для усунення цього недоліку необхідна принципова методологія, яка забезпечує узгодженість між рівнями без шкоди для оперативності та адаптивності.

Іншим критичним обмеженням є методи оцінки, які використовуються в дослідженні архі-

тектури автономних роботів. Багато експериментальних досліджень базуються на вузько визначених критеріях, спрощених лабораторних умовах або моделюванні, що не дозволяє повністю відобразити складність реальних операцій. Як результат, часто залишаються непоміченими незначні, але суттєві недоліки в роботі архітектури – наприклад, затримки у втручанні оператора, нестабільність у визначенні пріоритетності завдань або неефективність у розподілі ресурсів. Більше того, відсутність стандартизованих показників для оцінки якості інтеграції на рівнях планування, контролю та реагування унеможливорює повноцінне порівняння конкуруючих підходів. Без комплексних протоколів оцінки проектування архітектур керування ризикує залишитися фрагментарним, з рішеннями, оптимізованими для конкретних сценаріїв, а не для загальних, готових до застосування на практиці.

Останніми роками було запропоновано використання ймовірнісного аналізу та методів, заснованих на навчанні, як засіб подолання деяких із цих обмежень. Байєсівські моделі, фільтри частинок та частково спостережувані марковські процеси прийняття рішень (POMDP) були успішно застосовані для моделювання невизначеності у сприйнятті та діях, тим самим підвищивши надійність на функціональному рівні. Тим часом глибоке підкріплювальне навчання (DRL) показало свою перспективність у набутті роботами адаптивних моделей поведінки у багатовимірних просторових станах без явного програмування. Проте ці досягнення не повністю вирішили проблему інтеграції. Правила DRL часто не піддаються інтерпретації та перевірці, що ускладнює їх узгодження з планувальниками на основі образів або контролерами управління. Аналогічно, ймовірнісні підходи можуть призвести до надмірної обчислювальної складності, що перешкоджає їх застосуванню в режимі реального часу. Головною складністю залишається питання, як поєднати адаптивність, що базується на навчанні, з модельованим міркуванням таким чином, щоб зберегти як швидкість реагування, так і надійність.

Одним із перспективних шляхів подальшої інтеграції є вдосконалення механізмів контролю, які слугують мостом між процесом планування та реагуванням. Наприклад, такі системи, як Procedural Reasoning System (PRS), підтвердили, що контроль виконання завдань може забезпечити адаптацію до контексту шляхом моніторингу прогресу виконання та запуску планів дій у надзвичайних ситуаціях у разі відхилень. Подібним

чином, в архітектурах на зразок LAAS-CNRS було застосовано трирівневу модель, в якій супервізор виступає посередником між тимчасовим планувальником ІхТеТ та реактивними модулями. Незважаючи на ці досягнення, обмеження залишаються: більшість супервізійних фреймворків базуються на логіці, яка ґрунтується на правилах, або на представленнях скінчених станів, які не масштабуються ефективно з урахуванням складності сучасних робототехнічних місій. Оскільки роботи виконують багатоцільові операції, такі як одночасна навігація, картографування та взаємодія, супервізори повинні керувати зростаючим набором взаємозалежних процесів в умовах обмежень реального часу, що є складним завданням, яке сучасні рішення вирішують лише частково.

Останні дослідження в галузі когнітивної робототехніки спрямовані на розширення можливостей контролю за допомогою моделей, основаних на людському мисленні. Наприклад, архітектури на основі SOAR та ACT-R інтегрують образне мислення, епізодичну пам'ять та евристику прийняття рішень для підтримки адаптивного виконання завдань. Ці системи забезпечують підвищену гнучкість, дозволяючи роботам переконафігурувати свої плани на основі попереднього досвіду або зміни цілей. Однак при застосуванні в реальній робототехніці вони стикаються з труднощами при взаємодії з шумовими даними датчиків та безперервними сигналами керування. Наприклад, когнітивні моделі можуть бути ефективними у вирішенні проблем високого рівня, але часто не можуть видавати команди з часовою точністю, необхідною для виконавчих механізмів низького рівня. Ця невідповідність між когнітивним рівнем аналізу та сенсомоторним виконанням підкреслює постійний семантичний розрив, який необхідно подолати, якщо когнітивні архітектури мають відігравати центральну роль в автономності роботів наступного покоління.

Проблема інтеграції стає більш гострою в контексті розподілених і ройових систем, де координація повинна відбуватися не тільки всередині внутрішньої архітектури кожного робота, але і в команді в цілому. Підходи, засновані на децентралізованих алгоритмах POMDP (Dec-POMDP) і алгоритмах консенсусу, дозволили реалізувати такі кооперативні функції, як покриття території, відстеження цілей і колективне картографування. Проте ці методи створюють значне навантаження на обчислювальні потужності і комунікації, яке погано масштабується при збільшенні кількості агентів. Більше того, невідповідності між рівнями

узгодження, контролю та реагування можуть поширюватися на всю систему, що призводить до ланцюгових збоїв. Наприклад, якщо один робот неправильно інтерпретує команди контролю через затримки синхронізації, це може порушити координату всього рою. Тому забезпечення надійної інтеграції в межах кожної одиниці та в розподілених мережах роботів залишається одним з найактуальніших завдань для впровадження автономних систем нового покоління в оборонній, дослідницькій та промисловій сферах.

Іншим невирішеним аспектом проблеми інтеграції є відсутність формальної верифікації та зрозумілості в сучасних архітектурних структурах. Хоча планувальники на основі образів та контролери, в принципі, можуть бути проаналізовані за допомогою тимчасової логіки або методів перевірки моделей, включення ймовірного аналізу та політик глибокого навчання вносить елементи, які є непрозорими та важкими для перевірки. Така відсутність можливості перевірки створює значні перешкоди для впровадження автономних роботів у сферах, де безпека має критичне значення, таких як виведення з експлуатації атомних електростанцій, міський транспорт або військова розвідка [14]. Наприклад, політика навчання з глибоким підкріпленням може забезпечити ефективну навігацію в навчальних середовищах, але дати непередбачувані результати в умовах, з якими вона раніше не стикалася. Без механізмів контролю або зрозумілих для людини пояснень оператори не можуть надійно визначити, коли довіряти, ігнорувати або адаптувати вивчені політики. Для подолання цієї прогалини необхідна розробка гібридних нейрообразних методів, в яких прозорість образного міркування поєднується з адаптивністю підходів, заснованих на навчанні, що забезпечує як експлуатаційну безпеку, так і підзвітність.

Розвиток інтегрованих робототехнічних архітектур також обмежується відсутністю комплексних систем оцінки, які б систематично оцінювали ефективність на всіх архітектурних рівнях. Сучасні дослідження часто перевіряють автономність за допомогою ізольованих тестів, таких як точність навігації, ефективність планування або час виконання завдання. Хоча ці показники є важливими, вони не враховують складні взаємозалежності між компонентами, що відповідають за аналіз, контроль та реагування. Наприклад, планувальник може створити оптимальний маршрут, але якщо контролер не виявить затримки у виконанні або рівень реагування не зможе компенсувати динамічні перешкоди, загальний успіх місії

буде під загрозою. Щоб усунути цю проблему, методики оцінки повинні включати багатовимірні показники ефективності, зокрема міжрівневу затримку, стійкість до шуму датчиків, адаптивність до змін місії та масштабованість на різних платформах. Емпірична перевірка в гетерогенних і непередбачуваних середовищах, а не в контрольованих лабораторних умовах, є необхідною для виявлення тонких слабких місць в архітектурній інтеграції, які в іншому випадку залишилися б невиявленими.

Для подолання виявлених недоліків доцільно застосувати структуровану методологію підвищення автономності роботів за допомогою багаторівневої інтеграції. На функціональному рівні методологія починається з формальної специфікації модулів, що забезпечує чітко визначені інтерфейси та передбачувану поведінку. На рівні контролю вона впроваджує адаптивні механізми моніторингу, здатні динамічно перерозподіляти завдання, запускати плани дій у надзвичайних ситуаціях та врегульовувати конфлікти між рівнями. На рівні прийняття рішень вона включає тимчасові та ресурсоорієнтовані планувальники, які чітко синхронізовані з політиками контролю. Важливо, що методологія акцентує увагу на розробці міжрівневих протоколів комунікації, які гарантують узгодженість між образними міркуваннями, рішеннями контролю та сенсомоторним виконанням. Формалізуючи ці принципи проектування, структура виходить за межі ситуативних інтеграцій, пропонуючи систематичний шлях до архітектур, які є надійними, адаптивними та масштабованими на різних гетерогенних робототехнічних платформах.

Очікується, що результатом такого підходу стане визначення узагальнених принципів проектування та стратегій інтеграції, які можуть слугувати основою для автономності роботів наступного покоління. Завдяки об'єднанню детального планування, процедурного контролю та модульного реактивного керування, ця структура дозволяє роботам працювати з підвищеною автономністю та адаптивністю в динамічних середовищах. Зокрема, очікується, що така архітектура підвищить надійність виконання завдань за рахунок зменшення кількості збоїв синхронізації, збільшить оперативну стійкість за рахунок підтримки швидкої адаптації до непередбачених подій та підвищить безпеку за допомогою перевірених механізмів нагляду. Крім того, ця структура надає план для систематичного впровадження досягнень у галузі ймовірного аналізу, глибокого підкріплювального навчання та

нейро-образних методів без втрати узгодженості та прозорості. Таким чином, запропонована багаторівнева інтеграція не тільки усуває недоліки сучасних архітектур, але й створює можливість масштабування для автономних систем, здатних ефективно функціонувати в реальних сценаріях з високими ризиками [15].

Запропонована багаторівнева структура не тільки надає безпосередній внесок у вирішення поставлених завдань, але й закладає основу для майбутніх досліджень у галузі розподіленої автономності рою роботів, взаємодії людини і робота та етичного прийняття рішень. У розподілених системах формалізована інтеграція планування, контролю та реактивності в межах кожного окремого робота може значно підвищити надійність координації на рівні групи, зменшуючи каскадні збої, які часто спостерігаються в ройових системах. Щодо співпраці людини і робота, включення прозорих механізмів контролю створює можливість для спільної автономії, де люди можуть розуміти, передбачати та втручатися в прийняття рішень роботами, не порушуючи ефективність системи. Крім того, методологічний акцент на верифікованості та прозорості забезпечує природну основу для вбудовування етичних обме-

жень, механізмів підзвітності та прозорості в автономність роботів. Ці напрямки розширюють актуальність концепції з суто технічних областей до ширших суспільних контекстів, де довіра, безпека та узгодженість дій людей є такими ж важливими, як і операційна ефективність.

Висновки. Критичний аналіз існуючих наукових досліджень показує, що, незважаючи на значний прогрес у розробці автономних робототехнічних архітектур, інтеграція механізмів прийняття рішень, контролю та реагування залишається невирішеною проблемою. Сучасні моделі мають постійні недоліки в синхронізації, масштабованості, оцінці та верифікованості, що обмежує їх застосування в складних і мінливих операційних середовищах. Пропонуючи структуровану, багаторівневу методологію, яка об'єднує образні методи прийняття рішень, адаптивний контроль та модульну реактивність, в дослідженні наводиться науково обґрунтований шлях подолання цих обмежень. Отримана архітектурна структура не тільки підвищує надійність, адаптивність та безпеку, але й дозволяє створити гнучку основу для впровадження нових досягнень у галузі ймовірного аналізу, глибокого навчання та когнітивної робототехніки.

Список літератури:

1. Mehta S.A., Nemlekar H., Losey D.P. L2D2: Robot Learning from 2D drawings. *Autonomous Robots*, Springer, 2025, pp. 91–96.
2. Rezende Silva G., Päßler J., Tapia Tarifa S.L., Johnsen E.B., Corbato C.H. ROSA: a knowledge-based solution for robot self-adaptation. *Frontiers in Robotics and AI*, vol. 12, 2025, pp. 88–105.
3. Song Q., Zhao Q. Recent Advances in Robotics and Intelligent Robots Applications. *Applied Sciences*, vol. 14, no. 10, 2024, pp. 45–62.
4. Ren Q., Xu M., Cao Y. COVER: cross-vehicle transition framework for quadrotor control in air-ground cooperation. *Autonomous Robots*, Springer, 2025, pp. 89–106.
5. Winfield A.F.T., Booth S., Dennis L.A. Machine Ethics and Autonomous Systems. *AI & Society*, vol. 36, 2021, pp. 59–72.
6. Baroni P., Guida G., Mussi S., Vetturi A. A distributed architecture for control of autonomous mobile robots. In: *Proc. ICAR'95, Spain, 1995*, pp. 869–877.
7. Benveniste A., LeGuernic P. Hybrid dynamical system theory and the signal language. *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 35, no. 5, 1990, pp. 535–546.
8. Brooks R.A. A robust layered control system for a mobile robot. *IEEE Journal of Robotics and Automation*, vol. 2, no. 1, 1986, pp. 14–23.
9. Ghallab M., Laruelle H. Representation and Control in IxTeT, a Temporal Planner. In: *Proc. AIPS-94, 1994*, pp. 61–67.
10. Ingrand F.F., Chatila R., Alami R., Robert F. PRS: A high level supervision and control language for autonomous mobile robots. In: *Proc. IEEE ICRA'96, St Paul, USA, 1996*, pp. 43–49.
11. Bonasso R.P., Kortenkamp D., Miller D., Slack M. Experiences with an Architecture for Intelligent Robots. In: *Wooldridge M., Mueller J.P., Tambe M. (eds). Intelligent Agents II. Springer-Verlag, 1995*, pp. 187–202.
12. Laird J.E. *The Soar Cognitive Architecture*. MIT Press, 2012, p.390.
13. Thrun S., Burgard W., Fox D. *Probabilistic Robotics*, The MIT Press, 2005, p.672.
14. Mnih V., Kavukcuoglu K., Silver D., et al. Human-level control through deep reinforcement learning. *Nature*, vol. 518, 2015, pp. 529–533.
15. Schulman J., Wolski F., Dhariwal P., Radford A., Klimov O. Proximal Policy Optimization Algorithms. *Journal of Computer and Communications*, 13, 2017, pp. 120–139.

**Сіара S.M. SOME ASPECTS OF ARCHITECTURAL INTEGRATION
OF AUTONOMOUS SYSTEMS**

The article explores the topical issue of developing robust control architectures for autonomous robotic systems, with a particular focus on the reliable integration of deliberative planning, execution control, and reactive control mechanisms. Despite significant progress in the development of perception algorithms, probabilistic analysis, and learning-based approaches, the synthesis of these levels into a coherent operational structure remains a serious scientific and engineering challenge. Existing approaches, from behaviour-based subsumption architectures to image-based planners and hybrid three-level models, provide partial solutions but do not ensure seamless synchronisation, scalability and verifiability in real-world conditions. Such limitations create a persistent gap between theoretical models of autonomy and their practical application in complex, dynamic, and unpredictable environments.

A systematic analysis of current research reveals several critical shortcomings. Reactive systems, while effective in dynamic interactions, lack strategic analysis, while image-based systems often lack the computational power to process incomplete information. Hybrid models, including integrated procedural analysis systems and temporal analysis systems, provide a structured approach but remain limited due to insufficient protocol synchronisation and the lack of clear evaluation methods. Furthermore, the recent implementation of probabilistic systems and reinforcement learning has expanded the adaptability of autonomous systems, but at the same time has created problems related to opacity, predictability, and validation. Cognitive architectures based on human thinking, such as SOAR and ACT-R, provide additional flexibility but still have semantic mismatches with low-level sensorimotor execution. To address these shortcomings, the study focuses on a multi-level architectural structure that combines deliberative planning, procedural monitoring, and modular reactive control into a principled, controllable, and scalable system. The methodology focuses on the formal specification of functional modules, adaptive monitoring mechanisms capable of resolving conflicts in real time, and temporary planning systems synchronised with oversight policies. The methodology emphasises the formal specification of functional modules and adaptive monitoring mechanisms. An important element of the structure is the inter-level communication protocols, which ensure logical and temporal consistency between image thinking, performance monitoring and reactive modules. The architecture is further extended to incorporate advances in probabilistic reasoning, deep reinforcement learning, and neuro-image integration, providing adaptability without compromising transparency and security.

The expected results of the analysis include the identification of generalised design principles and integration strategies that can improve task reliability, interaction with the environment, and robustness under various operating conditions. By providing a structured methodology for the systematic development of control architectures, the research forms both a theoretical foundation and a practical roadmap for the advancement of robot autonomy. Furthermore, this framework supports future directions in distributed robot network autonomy, human-robot interaction, and ethical decision-making, thereby extending its relevance beyond technical specifications to societal acceptance and trust in autonomous systems. The paper shows that the implementation of next-generation robotic platforms capable of functioning autonomously in complex, unpredictable, and hazardous environments depends significantly on the principles of integrating decision-making, supervision, and response levels into a unified architecture.

Key words: autonomous robotic systems, control architectures, deliberative–reactive integration, supervisory control, hybrid autonomy frameworks.

Дата надходження статті: 24.09.2025

Дата прийняття статті: 17.10.2025

Опубліковано: 16.12.2025