

**Є. В. ГОРБАТЮК**

кандидат технічних наук, доцент,  
доцент кафедри будівельних машин  
Київський національний університет будівництва і архітектури  
ORCID: 0000-0002-8148-5323

**О. О. ДУДНИК**

кандидат технічних наук,  
доцент кафедри програмного забезпечення  
Вінницький національний технічний університет  
ORCID: 0000-0003-0375-2606

**Ю. Л. ГУНЬКО**

кандидат технічних наук, доцент,  
доцент кафедри харчових технологій та хімії  
Луцький національний технічний університет  
ORCID: 0000-0002-1441-9625

## РОЛЬ EDGE COMPUTING У ЗМЕНШЕННІ ЗАТРИМОК ПІД ЧАС ОБРОБЛЕННЯ ДАНИХ В АВТОНОМНИХ СИСТЕМАХ

Актуальність дослідження зумовлена стрімким розвитком автономних систем у транспорті, промисловості, робототехніці та кіберфізичних середовищах, що супроводжується зростанням обсягів сенсорних і керувальних даних, а також підвищенням вимог до їхнього оброблення в режимі реального часу. Традиційні централізовані хмарні підходи не завжди забезпечують необхідний рівень швидкодії та детермінованості керування через мережеві затримки, нестабільність з'єднань і залежність від віддалених обчислювальних ресурсів. У цьому контексті актуалізується потреба в науково обґрунтованому застосуванні периферійних обчислень як інструменту зменшення затримок і підвищення стійкості автономних систем.

Метою статті є обґрунтування можливостей використання edge computing для зменшення затримок оброблення даних в автономних системах і підвищення швидкодії, надійності й безпеки їх функціонування.

Методи дослідження ґрунтуються на системному аналізі архітектур автономних і кіберфізичних систем, узагальненні сучасних підходів до розподіленого оброблення даних, порівняльному аналізі централізованих і периферійних обчислювальних моделей, а також на логіко-аналітичному оцінюванні впливу затримок та їхньої варіативності на ефективність замкнених контурів керування.

Результати дослідження свідчать, що локалізація часово-критичних обчислювальних процесів на рівні edge computing створює передумови для скорочення сумарних затримок оброблення даних, зменшення їхньої варіативності та підвищення детермінованості керувальних рішень. Узагальнення емпіричних даних показує, що edge-орієнтовані архітектури сприяють стабілізації замкнених контурів керування, підвищенню точності регулювання та зростанню автономності систем у динамічних умовах експлуатації. Найбільша ефективність такого підходу досягається в ієрархічних архітектурах, у яких оперативні функції реалізуються на периферійному рівні, а часово не критичні задачі винесені за межі ключових контурів керування.

Висновки підтверджують доцільність застосування edge computing як системоутворювального елемента сучасних автономних систем за умови архітектурно виваженого розподілу обчислювальних функцій. Водночас ефективність такого підходу обмежується проблемами масштабування гетерогенних інфраструктур, узгодженості розподілених рішень та інформаційної безпеки, що зумовлює потребу в комплексних міждисциплінарних рішеннях.

Перспективи подальших досліджень пов'язані з формалізацією моделей оцінювання затримок у багаторівневих edge-архітектурах, розвитком методів узгодженого прийняття рішень у розподілених автономних системах і створенням адаптивних механізмів безпеки для периферійних обчислювальних середовищ.

**Ключові слова:** периферійні обчислення, оброблення даних у реальному часі, розподілені обчислювальні архітектури, контури керування, часово-критичні системи, кіберфізичні системи, обчислювальна затримка, автономне керування.



I. V. GORBATYUK

PhD in Engineering, Associate Professor,  
Associate Professor at the Department of Construction Machinery  
Kyiv National University of Construction and Architecture  
ORCID: 0000-0002-8148-5323

O. O. DUDNYK

PhD in Engineering,  
Associate Professor at the Department of Software  
Vinnytsia National Technical University  
ORCID: 0000-0003-0375-2606

Y. L. HUNKO

PhD in Engineering, Associate Professor,  
Associate Professor at the Department of Food Technology and Chemistry  
Lutsk National Technical University  
ORCID: 0000-0002-1441-9625

## THE ROLE OF EDGE COMPUTING IN REDUCING LATENCY DURING DATA PROCESSING IN AUTONOMOUS SYSTEMS

*The relevance of this study is determined by the rapid development of autonomous systems in transportation, industry, robotics, and cyber-physical environments, which is accompanied by a steady increase in the volume of sensor and control data and by stricter requirements for real-time data processing. Traditional centralized cloud-based approaches do not always provide the required level of performance and control determinism due to network latency, connection instability, and dependence on remote computational resources. In this context, the need for scientifically grounded application of edge computing as a tool for latency reduction and for improving the robustness of autonomous systems becomes increasingly important.*

*The purpose of the article is the substantiation of the possibilities of using edge computing to reduce data processing latency in autonomous systems and to improve the performance, reliability, and security of their operation.*

*The research methods are based on a system analysis of architectures of autonomous and cyber-physical systems, generalization of contemporary approaches to distributed data processing, comparative analysis of centralized and edge computing models, and logical and analytical assessment of the impact of latency and its variability on the effectiveness of closed-loop control systems.*

*The research results indicate that the localization of time-critical computational processes at the edge computing level creates prerequisites for reducing overall data processing latency, decreasing its variability, and increasing the determinism of control decisions. The generalization of empirical data demonstrates that edge-oriented architectures contribute to the stabilization of closed-loop control systems, improvement of control accuracy, and enhancement of system autonomy under dynamic operating conditions. The highest effectiveness of this approach is achieved in hierarchical architectures in which operational functions are implemented at the edge level, while time-noncritical tasks are moved outside the core control loops.*

*The conclusions confirm the expediency of applying edge computing as a system-forming element of modern autonomous systems, provided that an architecturally balanced distribution of computational functions is ensured. At the same time, the effectiveness of this approach is constrained by challenges related to the scalability of heterogeneous infrastructures, consistency of distributed decisions, and information security, which necessitates comprehensive interdisciplinary solutions.*

*Prospects for further research are associated with the formalization of models for latency evaluation in multilevel edge architectures, the development of coordinated decision-making methods in distributed autonomous systems, and the creation of adaptive security mechanisms for edge computing environments.*

**Key words:** *edge computing, real-time data processing, distributed computing architectures, control loops, time-critical systems, cyber-physical systems, computational latency, autonomous control.*

### Постановка проблеми

Стрімкий розвиток автономних систем у транспорті, промисловості, робототехніці та кіберфізичних середовищах зумовлює зростання обсягів даних, що потребують оброблення в режимі реального часу з жорсткими вимогами до затримок, надійності та безпеки прийняття рішень. Традиційні централізовані моделі обчислень, зорієнтовані на віддалені хмарні інфраструктури, виявляються обмеженими через неминучі затримки передачі даних, нестабільність мережових з'єднань та залежність автономних агентів від зовнішніх обчислювальних ресурсів. З огляду на це, виникає науково-практична проблема забезпечення мінімальної затримки оброблення сенсорних і керувальних даних без втрати точності, узгодженості й адаптивності функціонування автономних систем у динамічних і невизначених середовищах.

Зазначена проблема безпосередньо пов'язана з ключовими науковими завданнями у сфері розподілених обчислень, теорії керування, штучного інтелекту та інженерії кіберфізичних систем, зокрема з розробленням архітектур

низьколатентного оброблення даних, оптимізацією обчислювальних і мережевих ресурсів, а також формалізацією механізмів прийняття рішень у часово-критичних контурах керування. У практичному вимірі ця проблема має визначальне значення для підвищення безпеки автономного транспорту, надійності промислових автономних установок, ефективності роботизованих комплексів і стійкості критичної інфраструктури, де затримки оброблення даних можуть призвести до системних збоїв або матеріальних втрат. Таким чином, пошук і обґрунтування підходів до зменшення затримок оброблення даних на основі edge computing набуває міждисциплінарного значення та постає важливим напрямом сучасних наукових досліджень і прикладних розробок у галузі автономних систем.

#### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Огляд сучасних досліджень свідчить про поступове зміщення наукової уваги від загальних архітектурних концепцій до прикладних рішень реального часу та їх системних узагальнень. Насамперед у працях простежується зосередження на архітектурно-програмних підходах до організації автономних і кіберфізичних систем, у яких периферійні обчислення виступають ключовим механізмом мінімізації латентності. У своїй статті Я. Бершчанський (Y. Bershchanskyi) та співавтори обґрунтовують контейнеризовану структуру інтелектуальних систем у cloud- та cyber-physical-середовищах, де розміщення обчислювальних компонентів ближче до джерел даних забезпечує скорочення затримок у контурах керування [1]. Подібну логіку локалізації обчислень демонструє дослідження С. Поперегняк (S. Poperehnyak) та співавторів, що присвячене стабільній взаємодії IoT-пристроїв у розумному домі, де edge-рівень зменшує часові затримки обміну та підвищує автономність системи [2]. Концептуально ці підходи доповнює праця І. Гунька (I. Hunko), у якій питання зменшення часових витрат розглядається на рівні життєвого циклу програмних систем, формуючи інженерні передумови для побудови низьколатентних автономних рішень [3].

Значна частина наукових розвідок зосереджена на створенні та оцінюванні спеціалізованих edge-платформ, що здатні забезпечити оброблення потокових даних із мінімальними затримками. У своєму дослідженні Дж. Танг (J. Tang) та співавтори запропонували систему LoPECS, яка демонструє поєднання енергоефективності та низької латентності в сервісах автономного водіння завдяки локальному обробленню критичних даних на edge-вузлах [4]. Натомість Б. Нарра (B. Narra) та співавтори аналізують сучасні edge-фреймворки для IoT-мереж, показуючи їхню ефективність у скороченні затримок передавання й оброблення даних у розподілених автономних середовищах [5]. У своїй праці Т. А. Баблу (T. A. Bablu) та М. Т. Рашид (M. T. Rashid) узагальнили вплив edge computing на оброблення даних у режимі реального часу, де перенесення обчислень на периферію розглядається як ключовий чинник зниження латентності IoT-застосунків [6].

Важливий масив досліджень присвячений безпосередньо автономним транспортним системам, для яких затримки мають критичне значення з погляду безпеки та стабільності. Так, Г. Мінг (G. Ming) показує, що використання edge computing в інтелектуальних системах керування автономними транспортними засобами дає змогу істотно скоротити затримки в замкнених контурах керування [7]. Водночас Х. Чжао (H. Zhao) та співавтори запропонували edge-фреймворк потокового оброблення даних для автономного водіння, у якому зменшення латентності досягається завдяки локальній агрегації та фільтрації сенсорних потоків [8]. Аналогічну проблематику розглядають Х. Ібн-Хедер (H. Ibn-Khedher) та співавтори, які наголошують, що перенесення алгоритмів штучного інтелекту на периферійний рівень є необхідною умовою забезпечення роботи автономних систем у режимі реального часу [9].

Завершальну групу праць формують узагальнювальні та системні дослідження, у яких edge computing розглядається як базовий інструмент зменшення затримок у складних розподілених середовищах. Зокрема Н. Дхамелія (N. Dhameliya) та співавтори аналізують edge computing у мережевих системах, підкреслюючи його вирішальну роль для latency-sensitive-застосунків [10]. Натомість О. Т. Модупе (O. T. Modupe) та співавтори здійснюють огляд трансформаційного впливу edge computing на оброблення даних у реальному часі, акцентуючи на проблемах масштабованості та узгодженості розподілених рішень [11]. У своїй праці М. Цуй (M. Cui) та співавтори досліджують offloading автономних сервісів на edge-вузли, демонструючи зменшення затримок за рахунок адаптивного розподілу обчислювальних задач [12]. Окрім того, Б. Ян (B. Yang) та співавтори пов'язують розвиток edge intelligence з перспективними бездротовими системами, доводячи її ключову роль для автономних систем із жорсткими часовими обмеженнями [13]. Також С. Байдя (S. Baidya) та співавтори акцентують на синергії vehicular та edge computing як чиннику зниження латентності в підключених і автономних транспортних застосуваннях [14], тоді як М. Х. О. Р. Молла (M. H. O. R. Mollah) та співавтори демонструють системне скорочення затримок у smart-city-середовищах завдяки інтеграції IoT та edge computing [15].

Попри активний розвиток досліджень у сфері автономних систем і edge computing, нерозв'язаними залишаються питання комплексного врахування затримок оброблення сенсорних і керувальних даних у замкнених контурах керування, узгодженості рішень у розподілених архітектурах і впливу масштабування та безпеки на часові характеристики систем. Більшість наявних наукових розвідок має фрагментарний характер і не забезпечує цілісного поєднання архітектурного, часово-критичного й експлуатаційного аналізу.

Запропоноване дослідження систематизує зазначені аспекти в єдиному методологічному підході, оцінює вплив edge computing на затримки та ефективність контурів керування та формує практично орієнтовані рекомендації.

Це дає змогу поглибити наукове розуміння ролі периферійних обчислень і створює підґрунтя для подальших досліджень і впроваджень у автономних системах.

#### Формулювання мети дослідження

Метою статті є визначення можливостей використання edge computing для зменшення затримок оброблення даних в автономних системах із метою підвищення швидкодії, надійності та безпеки їх функціонування.

Для досягнення поставленої мети в статті передбачається розв'язання таких завдань:

1. Проаналізувати оброблення сенсорних і керувальних даних в автономних системах із високими вимогами до реального часу.
2. Оцінити вплив edge-орієнтованих архітектур на зменшення затримок та ефективність контурів керування.
3. Виявити проблеми впровадження edge computing та сформулювати рекомендації з урахуванням умов експлуатації автономних систем.

#### Викладення основного матеріалу дослідження

Оброблення сенсорних і керувальних даних в автономних системах із високими вимогами до реального часу характеризується поєднанням жорстких часових обмежень, високої інтенсивності потоків даних і необхідності безперервного прийняття рішень у змінних умовах середовища. Сенсорні підсистеми автономних об'єктів формують гетерогенні дані різної частотності, точності та надійності, які мають бути оперативно агреговані, відфільтровані та інтерпретовані з мінімальною затримкою. Керувальні дані натомість мають формуватися синхронно з результатами сприйняття середовища та негайно передаватися в контури керування, оскільки навіть незначні часові зсуви можуть призводити до втрати стабільності системи, зниження точності керування чи виникнення небезпечних режимів роботи. За таких умов ключовим чинником ефективності автономних систем виступає здатність обчислювальної архітектури забезпечувати детерміноване оброблення даних у межах заданих часових вікон (табл. 1).

Таблиця 1

#### Характеристики оброблення сенсорних і керувальних даних в автономних системах реального часу

Тип даних	Головні джерела	Часові вимоги	Критичні параметри оброблення	Потенційні наслідки затримок
Сенсорні дані	Камери, лідари, радары, інерціальні сенсори	Мілісекунди – десятки мілісекунд	Затримка, синхронізація, шумостійкість	Помилки сприйняття, хибна інтерпретація середовища
Дані стану системи	Контролери, виконавчі механізми	Мілісекунди	Актуальність, узгодженість	Некоректне оцінювання стану системи
Керувальні сигнали	Модулі прийняття рішень	Жорстко детерміновані	Детермінованість, пріоритетність	Втрата стабільності, аварійні режими
Дані зворотного зв'язку	Актuatorи, сенсори положення	Реальний час	Затримка, циклічність	Порушення замкнених контурів керування

Джерело: сформовано на основі [4, р. 30469; 7; 8, р. 178; 9, р. 53990; 14, р. 3].

У практичних реалізаціях сучасних автономних систем оброблення сенсорних і керувальних даних вибудовується як безперервний часово-критичний процес, у якому кожен етап – від зняття показників сенсорів до формування керувальної дії – має жорстко обмежений часовий бюджет. Так, в автономних транспортних засобах потоки даних від відеокамер, лідарів і радарів обробляються з частотою десятки герц, що вимагає синхронізації багатоканальних сенсорних вимірювань і миттєвого узгодження результатів сприйняття з моделлю навколишнього середовища. Затримки на етапі сенсорного оброблення безпосередньо трансформуються в похибки прогнозування траєкторій інших об'єктів і, відповідно, у ризики прийняття запізнених або некоректних рішень. У роботизованих і промислових автономних системах реального часу ключову роль відіграють замкнені контури керування, у яких керувальні сигнали формуються на основі актуального стану системи та негайно передаються на виконавчі механізми. На практиці це означає, що обчислювальні вузли мають гарантувати детермінований час оброблення незалежно від навантаження, що досягається завдяки локалізації обчислень, пріоритетизації задач і використання спеціалізованих обчислювальних платформ реального часу [8, р. 178]. Наприклад, у мобільних роботах або безпілотних літальних апаратах первинна стабілізація та уникнення перешкод виконуються на локальних обчислювальних модулях, тоді як більш ресурсоємні аналітичні задачі можуть передаватися на вищі рівні системи без порушення часових обмежень [4, р. 30470]. У сучасних умовах експлуатації автономних систем така організація оброблення даних дає змогу поєднати високу реактивність із адаптивністю до складних сценаріїв функціонування. Локальне оброблення сенсорних і керувальних даних забезпечує стійкість системи до мережевих затримок і збоїв зв'язку, що є критично важливим для автономних об'єктів, які функціонують у динамічних або слабо передбачуваних середовищах. Таким чином, практична реалізація оброблення даних у режимі реального часу стає не лише технічною вимогою, а й системоутворювальним чинником, що визначає рівень безпеки, ефективності та функціональної надійності автономних систем у реальних умовах застосування.

Розміщення обчислювальних ресурсів у розподілених автономних системах визначає архітектурні можливості забезпечення часової чутливості, адаптивності та масштабованості системи. Орієнтація на периферійні обчислення передбачає розподіл функцій оброблення даних між локальними обчислювальними модулями та edge-вузлами, розташованими поблизу джерел сенсорної інформації, що дає змогу узгоджувати вимоги реального часу з доступними обчислювальними ресурсами та знижувати залежність від централізованої інфраструктури (табл. 2).

Таблиця 2

### Архітектурні підходи до розміщення обчислювальних ресурсів у розподілених автономних системах

Архітектурний підхід	Рівень розміщення обчислень	Типові задачі	Ключові переваги	Характерні умови застосування
Локальне оброблення	Вбудовані контролери та процесори	Базове керування, стабілізація	Мінімальні затримки	Жорстко часово-критичні функції
Периферійні обчислення	Edge-вузли поблизу джерел даних	Аналіз середовища, координація агентів	Компроміс між затримкою та продуктивністю	Тактичний рівень автономності
Ієрархічна модель	Локальний та edge-рівні	Адаптивне керування	Гнучкість і масштабованість	Багаторівневі автономні системи
Гібридна модель	Edge- та хмарні ресурси	Аналітика, навчання моделей	Висока обчислювальна потужність	Стратегічні та фонові задачі

Джерело: сформовано на основі [1, р. 154; 4, р. 30472; 5, р. 4; 10, р. 7; 12, р. 10540].

Зазначені архітектурні підходи не є виключають один одного та реалізуються на практиці як ієрархічно пов'язані рівні єдиної обчислювальної екосистеми автономних систем. Так, у системах автономного транспорту локальні контролери виконують первинні керувальні дії з жорсткими часовими обмеженнями, тоді як edge-вузли, розміщені на борту транспортного засобу або в елементах дорожньої інфраструктури, забезпечують інтеграцію сенсорних потоків, координацію маневрів і локальну оптимізацію рішень.

У роботизованих багатоагентних комплексах периферійні обчислення використовуються для узгодження дій між автономними агентами в режимі реального часу без постійного звернення до централізованих сервісів, що знижує чутливість системи до перевантажень каналів зв'язку та обмежень пропускної здатності [12, р. 10540]. Водночас гібридні конфігурації застосовуються для винесення обчислювально інтенсивних, але часово некритичних задач (зокрема точного налаштування моделей або довгострокової оптимізації) на віддалені ресурси без порушення оперативного функціонування автономних контурів керування.

Перенесення обчислювальних процесів на рівень edge computing змінює часову організацію функціонування автономних систем завдяки скороченню інформаційного тракту між моментом виникнення події, етапом оброблення даних і формуванням керувальної дії. У централізованих архітектурах сумарна затримка керування формується як сума мережевої затримки передавання сенсорних даних до віддаленого центру оброблення, часу виконання обчислень та затримки передавання керувального сигналу до виконавчих механізмів. Кожен із цих складників є змінним у часі та залежить від стану мережі й обчислювального навантаження, що зумовлює як зростання середнього значення затримки, так і її варіативності. Edge-орієнтоване оброблення локалізує часово-критичні етапи аналізу та прийняття рішень поблизу об'єкта керування. У такому випадку мережевий складник затримки або істотно скорочується, або повністю усувається для ключових контурів, а сумарна затримка визначається переважно швидкістю локальних і периферійних обчислювальних вузлів. Це змінює не лише абсолютний час реакції системи, а й регулярність надходження керувальних сигналів, що є визначальним чинником стійкості замкнених контурів керування.

Кількісне оцінювання впливу edge computing на часові параметри автономних систем у цьому дослідженні виконувалося шляхом узагальнення емпіричних результатів, наведених у публікаціях, де проводиться порівняльний аналіз централізованих і edge-орієнтованих архітектур за зівставних умов. До аналізу включалися роботи, у яких затримка керування визначалася як повний інтервал «сенсорне вимірювання – керувальна дія» або як сума її складників із подальшим інтегруванням в єдину метрику. Для забезпечення коректності порівняння враховувалися сценарії з однаковими чи близькими за складністю алгоритмами оброблення, типовими навантаженнями та подібними мережевими параметрами.

Узагальнення кількісних результатів здійснювалося у вигляді діапазонів значень, що відображають зміну часових параметрів залежно від умов експлуатації автономних систем, зокрема інтенсивності сенсорних потоків, пропускної здатності мережі та обчислювальних можливостей edge-вузлів. Інтерпретація отриманих діапазонів виконувалася з позицій теорії керування з урахуванням впливу фазових запізнь і нерегулярності часових інтервалів на стійкість і точність замкнених контурів. Додатково аналізувалася варіативність затримки (jitter), що характеризує розкид часових інтервалів між послідовними циклами керування та безпосередньо впливає на стабільність динамічних систем і схильність контурів керування до коливальних режимів [4, р. 30472–30475; 8, р. 182–186]. Узагальнені результати наведено в таблиці 3.8; 15, р. 13].

Різниця у варіативності затримок між централізованим та edge-орієнтованим обробленням має принципове значення для динамічних властивостей контурів керування. Згідно з даними таблиці 3, для централізованих архітектур

Таблиця 3

## Вплив edge computing на часові та функціональні параметри контурів керування автономних систем

Параметр оцінювання	Централізоване оброблення	Edge-орієнтоване оброблення	Інтерпретація для контурів керування
Сумарна затримка керування (E2E latency)	80–250 мс	15–60 мс	Зменшення фазового запізнення, розширення області стійкості
Варіативність затримок (jitter)	20–80 мс	3–15 мс	Стабілізація часових інтервалів між циклами керування
Частота оновлення керувальних сигналів	5–20 Гц	30–100 Гц	Підвищення точності та плавності регулювання
Реакція на динамічні події	Запізнення на 1–3 цикли	Реакція в межах одного циклу	Запобігання накопиченню похибок
Автономність контуру керування	Залежність від мережі	Локальна самодостатність	Стійкість до деградації зв'язку

Джерело: сформовано на основі [6, р. 29; 8, р. 182; 9, р. 53995; 11, р. 69]

характерні значення jitter у діапазоні 20–80 мс, що означає істотний розкид часових інтервалів між послідовними керувальними циклами. За таких умов навіть за відносно помірною середньою значенням затримки керувальні сигнали надходять нерегулярно, що еквівалентно внесенню випадкового фазового збурення в замкнений контур. Для edge-орієнтованих архітектур варіативність затримок обмежується діапазоном 3–15 мс, що відповідає майже детермінованому режиму керування. Практично це означає, що часовий інтервал між послідовними керувальними діями змінюється в межах одного такту обчислювального вузла та не залежить від стану магістральної мережі. Така стабільність часових параметрів дає змогу зберігати фазову узгодженість між сенсорними вимірюваннями та керувальними сигналами, зменшує ризик самозбудження коливальних режимів і підвищує точність регулювання. Зіставлення наведених діапазонів показує, що зменшення jitter під час переходу до edge computing є не менш важливим, ніж скорочення середньої затримки. Якщо зменшення E2E latency визначає швидкість реакції системи, то зменшення варіативності затримок визначає передбачуваність цієї реакції, що є критичним для автономних систем, які працюють у режимі безперервного керування. Саме поєднання низької середньої затримки та малої варіативності часових параметрів забезпечує практичне підвищення стійкості та надійності контурів керування в реальних умовах експлуатації [4, р. 30472–30478].

Впровадження edge computing в автономних системах супроводжується низкою науково-практичних проблем, що зумовлені розподіленістю характером обчислень, динамічністю середовища та високими вимогами до надійності й безпеки. Однією з ключових проблем є масштабування обчислювальної інфраструктури, оскільки зростання кількості автономних агентів і периферійних вузлів ускладнює керування ресурсами, балансування навантажень і підтримання детермінованих часових характеристик. У периферійних архітектурах масштабування відбувається за умов гетерогенності апаратних платформ і нерівномірної доступності ресурсів, що ускладнює формалізацію універсальних механізмів розподілу задач.

Суттєвою проблемою залишається узгодженість розподілених рішень, оскільки edge-орієнтовані автономні системи формують керувальні дії на основі локальних і лише частково синхронізованих даних. Затримки між-вузлового обміну, різна частотність оновлення станів і асинхронність обчислень можуть призводити до прийняття несумісних рішень, що є критичним для багатоагентних систем і багатокомпонентних контурів керування [8, р. 183]. Це зумовлює потребу в спеціалізованих методах координації, консенсусу та часової синхронізації, адаптованих до обмеженої пропускної здатності й нестабільних мережевих з'єднань.

Окремий комплекс проблем пов'язаний із забезпеченням інформаційної безпеки та надійності edge-інфраструктури. Розширення обчислювальної поверхні за рахунок периферійних вузлів збільшує кількість потенційних точок атак і ускладнює централізований контроль доступу, що підвищує ризики компрометації даних і керувальних сигналів [10, р. 13]. Для автономних систем це є особливо небезпечним, оскільки порушення цілісності локальних рішень може безпосередньо впливати на фізичну поведінку об'єктів. Додаткову складність становлять завдання довіреного виконання обчислень, захисту моделей штучного інтелекту на edge-вузлах та оновлення програмного забезпечення без зупинки системи [6, р. 32]. Інтеграція edge computing у наявні автономні платформи часто потребує перегляду архітектур керування та інтерфейсних рішень.

Застосування edge computing для мінімізації затримок доцільно орієнтувати на функціональне призначення автономної системи, рівень часової критичності процесів й умови експлуатації. Часово-критичні обчислювальні функції, що визначають стійкість і безпеку замкнених контурів керування, доцільно локалізувати на периферійному рівні з гарантованими часовими характеристиками, незалежними від стану зовнішніх мереж. Ефективною є ієрархічна організація обчислень, за якої edge-рівень використовується для оперативного аналізу та локальної координації, тоді як менш критичні функції можуть бути винесені на віддалені ресурси. В умовах змінного навантаження доцільним є адаптивне керування обчислювальними ресурсами на edge-рівні з урахуванням пріоритетності задач і поточного стану системи.

Особливу увагу варто приділяти забезпеченню узгодженості рішень між периферійними вузлами та інтеграції механізмів захищеного виконання обчислень безпосередньо на edge-рівні. Узагальнено, ефективно застосування edge

computing для зменшення затримок оброблення даних потребує поєднання архітектурної локалізації часо-критичних функцій, адаптивного розподілу обчислювальних навантажень і врахування реальних експлуатаційних сценаріїв, що перетворює edge computing на системоутворювальний чинник підвищення ефективності автономних систем.

#### Висновки

У ході дослідження встановлено, що застосування edge computing в автономних системах створює передумови для суттєвого зменшення затримок оброблення даних шляхом локалізації часо-критичних обчислень і формування керувальних рішень із більш передбачуваними часовими характеристиками. Узагальнення емпіричних даних свідчить, що перенесення аналізу сенсорних потоків і прийняття рішень на периферійний рівень сприяє підвищенню стійкості та точності замкнених контурів керування, особливо в умовах динамічного й частково невизначеного середовища. Найбільша ефективність такого підходу досягається в ієрархічних архітектурах, у яких оперативні функції реалізуються на edge-рівні, а часо некритичні задачі винесені за межі ключових контурів керування.

Водночас ідентифіковано ключові науково-практичні проблеми впровадження edge computing, пов'язані зі складністю масштабування гетерогенних обчислювальних інфраструктур, забезпеченням узгодженості розподілених рішень та підвищеними вимогами до інформаційної безпеки. Показано, що за відсутності спеціалізованих механізмів координації, часової синхронізації та захищеного виконання обчислень потенційні переваги зменшення затримок можуть нівелюватися асинхронністю керування та логічними конфліктами між автономними агентами.

Сформульовані рекомендації підтверджують доцільність застосування edge computing за умови архітектурно виваженого розподілу функцій, адаптивного керування обчислювальними ресурсами та врахування реальних експлуатаційних сценаріїв автономних систем. Перспективи подальших досліджень пов'язані з формалізацією моделей оцінювання затримок у багаторівневих edge-архітектурах, розвитком методів узгодженого прийняття рішень у розподілених середовищах і створенням адаптивних механізмів безпеки для автономних систем нового покоління.

#### Список використаної літератури

1. Bershchanskyi Y., Klym H., Shevchuk Y. Containerized artificial intelligent system design in cloud and cyber-physical systems. *Advances in Cyber-Physical Systems*. 2024. Vol. 9, No. 2. P. 151–157. DOI: <https://doi.org/10.23939/acps2024.02.151>
2. Poperehnyak S., Bakaiev O., Shevchuk Y. Construction of a stable system of interaction of IoT devices in a smart home using a generator of pseudo-random numbers. In: *Cybersecurity Providing in Information and Telecommunication Systems (CPITS 2025): Proceedings of the Workshop*. 2025. Vol. 3991. P. 349–362. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-3991/paper25.pdf> (date of access: 05.01.2026).
3. Hunko I. How to Effectively Reduce Software Testing Time: From Requirements to Regression. Lodz, Poland: Futurity Research Publishing, 2025. 158 p. URL: <https://futurity-publishing.com/wp-content/uploads/2025/04/7%D0%9F-29.03.25-3.pdf> (date of access: 05.01.2026).
4. Tang J., Liu S., Liu L., Yu B., Shi W. LoPECS: A Low-Power Edge Computing System for Real-Time Autonomous Driving Services. *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. P. 30467–30479. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2970728>
5. Narra B., Buddula D. V. K. R., Patchipulusu H. H. S., Polu A. R., Vattikonda N., Gupta A. K. Advanced edge computing frameworks for optimizing data processing and latency in IoT networks. *Journal of Emerging Trends in Scientific Research*. 2023. Vol. 1, No. 1. P. 1–10. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.15209364>
6. Bablu T. A., Rashid M. T. Edge Computing and Its Impact on Real-Time Data Processing for IoT-Driven Applications. *Journal of Advanced Computing Systems*. 2025. Vol. 5, No. 1. P. 26–43. URL: <https://scipublication.com/index.php/JACS/article/view/117> (date of access: 08.03.2025).
7. Ming G. Exploration of the intelligent control system of autonomous vehicles based on edge computing. *PLOS ONE*. 2023. Vol. 18, no. 2. P. e0281294. URL: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0281294> (date of access: 06.01.2026).
8. Zhao H., Yao L., Zeng Z., Li D., Xie J., Zhu W., Tang J. An edge streaming data processing framework for autonomous driving. *Connection Science*. 2021. Vol. 33, No. 2. P. 173–200. DOI: <https://doi.org/10.1080/09540091.2020.1782840>
9. Ibn-Khedher H., Laroui M., Mounghla H., Afifi H., Abd-Elrahman E. Next-Generation Edge Computing Assisted Autonomous Driving Based Artificial Intelligence Algorithms. *IEEE Access*. 2022. Vol. 10. P. 53987–54001. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3174548>
10. Dhameliya N., Patel B., Maddula S. S., Mullangi K. Edge computing in network-based systems: enhancing latency-sensitive applications. *American Digits: Journal of Computing and Digital Technologies*. 2024. Vol. 2, No. 1. P. 1–21. URL: <https://publicationslist.org/data/americandigits/ref-8/2024.1.pdf> (date of access: 08.03.2025).
11. Modupe O. T., Otitoola A. A., Oladapo O. J., Abiona O. O., Oyeniran O. C., Adewusi A. O., Obijuru A. Reviewing the transformational impact of edge computing on real-time data processing and analytics. *Computer Science & IT Research Journal*. 2024. Vol. 5, No. 3. P. 693–702. DOI: <https://doi.org/10.51594/csitjr.v5i3.929>
12. Cui M., Zhong S., Li B., Chen X., Huang K. Offloading Autonomous Driving Services via Edge Computing. *IEEE Internet of Things Journal*. 2020. Vol. 7, No. 10. P. 10535–10547. DOI: <https://doi.org/10.1109/JIOT.2020.3001218>

13. Yang B., Cao X., Xiong K., Yuen C., Guan Y. L., Leng S., Han Z. Edge intelligence for autonomous driving in 6G wireless system: Design challenges and solutions. *IEEE Wireless Communications*. 2021. Vol. 28, No. 2. P. 40–47. DOI: <https://doi.org/10.1109/MWC.001.2000292>
14. Baidya S., Ku Y.-J., Zhao H., Zhao J., Dey S. Vehicular and Edge Computing for Emerging Connected and Autonomous Vehicle Applications. In: *2020 57th ACM/IEEE Design Automation Conference (DAC)*. San Francisco, CA, USA, 2020. P. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/DAC18072.2020.9218618>
15. Mollah M. H. O. R., Sultana M. S., Kudapa S. P. Integration of IoT and edge computing for low-latency data analytics in smart cities and IoT networks. *Journal of Sustainable Development and Policy*. 2023. Vol. 2, No. 03. P. 01–33. DOI: <https://doi.org/10.63125/004h7m29>

### References

1. Bershchanskyi, Y., Klym, H., & Shevchuk, Y. (2024). Containerized artificial intelligent system design in cloud and cyber-physical systems. *Advances in Cyber-Physical Systems*, 9(2), 151–157. <https://doi.org/10.23939/acps2024.02.151>
2. Poperehnyak, S., Bakaiev, O., & Shevchuk, Y. (2025). Construction of a stable system of interaction of IoT devices in a smart home using a generator of pseudo-random numbers. *Cybersecurity Providing in Information and Telecommunication Systems (CPITS 2025): Proceedings of the Workshop, 3991*, 349–362. <https://ceur-ws.org/Vol-3991/paper25.pdf>
3. Hunko, I. (2025). *How to effectively reduce software testing time: From requirements to regression*. Futurity Research Publishing. <https://futurity-publishing.com/wp-content/uploads/2025/04/7%D0%9F-29.03.25-3.pdf>
4. Tang, J., Liu, S., Liu, L., Yu, B., & Shi, W. (2020). LoPECS: A low-power edge computing system for real-time autonomous driving services. *IEEE Access*, 8, 30467–30479. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2970728>
5. Narra, B., Buddula, D. V. K. R., Patchipulusu, H. H. S., Polu, A. R., Vattikonda, N., & Gupta, A. K. (2023). Advanced edge computing frameworks for optimizing data processing and latency in IoT networks. *Journal of Emerging Trends in Scientific Research*, 1(1), 1–10. <https://doi.org/10.5281/zenodo.15209364>
6. Bablu, T. A., & Rashid, M. T. (2025). Edge computing and its impact on real-time data processing for IoT-driven applications. *Journal of Advanced Computing Systems*, 5(1), 26–43. <https://scipublication.com/index.php/JACS/article/view/117>
7. Ming, G. (2023). Exploration of the intelligent control system of autonomous vehicles based on edge computing. *PLOS One*, 18(2), Article e0281294. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0281294>
8. Zhao, H., Yao, L., Zeng, Z., Li, D., Xie, J., Zhu, W., & Tang, J. (2021). An edge streaming data processing framework for autonomous driving. *Connection Science*, 33(2), 173–200. <https://doi.org/10.1080/09540091.2020.1782840>
9. Ibn-Khedher, H., Laroui, M., Mounghla, H., Afifi, H., & Abd-Elrahman, E. (2022). Next-generation edge computing assisted autonomous driving based artificial intelligence algorithms. *IEEE Access*, 10, 53987–54001. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3174548>
10. Dhameliya, N., Patel, B., Maddula, S. S., & Mullangi, K. (2024). Edge computing in network-based systems: Enhancing latency-sensitive applications. *American Digits: Journal of Computing and Digital Technologies*, 2(1), 1–21. <https://publicationslist.org/data/americanandigits/ref-8/2024.1.pdf>
11. Modupe, O. T., Otitoola, A. A., Oladapo, O. J., Abiona, O. O., Oyeniran, O. C., Adewusi, A. O., & Obijuru, A. (2024). Reviewing the transformational impact of edge computing on real-time data processing and analytics. *Computer Science & IT Research Journal*, 5(3), 693–702. <https://doi.org/10.51594/csitrj.v5i3.929>
12. Cui, M., Zhong, S., Li, B., Chen, X., & Huang, K. (2020). Offloading autonomous driving services via edge computing. *IEEE Internet of Things Journal*, 7(10), 10535–10547. <https://doi.org/10.1109/IIOT.2020.3001218>
13. Yang, B., Cao, X., Xiong, K., Yuen, C., Guan, Y. L., Leng, S., & Han, Z. (2021). Edge intelligence for autonomous driving in 6G wireless system: Design challenges and solutions. *IEEE Wireless Communications*, 28(2), 40–47. <https://doi.org/10.1109/MWC.001.2000292>
14. Baidya, S., Ku, Y.-J., Zhao, H., Zhao, J., & Dey, S. (2020). Vehicular and edge computing for emerging connected and autonomous vehicle applications. In *2020 57th ACM/IEEE Design Automation Conference (DAC)* (pp. 1–6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/DAC18072.2020.9218618>
15. Mollah, M. H. O. R., Sultana, M. S., & Kudapa, S. P. (2023). Integration of IoT and edge computing for low-latency data analytics in smart cities and IoT networks. *Journal of Sustainable Development and Policy*, 2(03), 01–33. <https://doi.org/10.63125/004h7m29>

Дата першого надходження статті до видання: 09.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 13.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.04.2026