

<https://doi.org/10.15407/intechsys.2026.03.062>
УДК 004.274

В.О. БОРОВИК, провідний інженер-програміст,
відділ інтелектуального управління,
Інститут інформаційних технологій та систем НАН України,
просп. Акад. Глушкова, 40, Київ, 03187, Україна
<https://orcid.org/0000-0001-8860-616X>
vadymborovyk@gmail.com

Р.В. СЕМЕНОГ, старш. наук. співроб., заст. зав. лаб.,
Інститут інформаційних технологій та систем НАН України,
просп. Акад. Глушкова, 40, Київ, 03187, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-6714-6444>
ruslansemenoh8@gmail.com

ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ДЛЯ СТВОРЕННЯ СИСТЕМ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ В РОЗПОДІЛЕНИХ КОМП'ЮТЕРНО- КОМУНІКАЦІЙНИХ СЕРЕДОВИЩАХ

Проведено комплексний аналіз сучасних інформаційних технологій, що використовуються для побудови систем інтелектуального керування в розподілених комп'ютерно-комунікаційних середовищах. Розглянуто сучасні концепції штучного інтелекту, методи забезпечення автономності інтелектуальних систем, підходи до прийняття рішень у складних динамічних середовищах, а також технології багатоагентної взаємодії. Особливу увагу приділено технологіям машинного навчання, глибокого навчання, підкріплювального навчання, експертним системам, інтелектуальним агентам та багатоагентним системам. Проаналізовано проблеми функціонування інтелектуальних систем у розподілених мережах, пов'язані із затримками передачі даних, невизначеністю, інформаційною безпекою та масштабованістю. Визначено перспективні напрями розвитку систем інтелектуального керування на основі технологій штучного інтелекту, цифрових двійників, периферійних обчислень та семантичних комунікацій.

Ключові слова: штучний інтелект, інтелектуальне керування, розподілені системи, багатоагентні системи, машинне навчання, прийняття рішень, автономні системи, комп'ютерно-комунікаційні середовища.

Цитування: Боровик В.О., Семеног Р.В. Інформаційні технології для створення систем інтелектуального керування в розподілених комп'ютерно-комунікаційних середовищах. *Information Technologies and Systems*, Київ, 2026, Том 3 (9), 62–72. <https://doi.org/10.15407/intechsys.2026.03.062>

© Publisher PH “Akademperiodyka” of the NAS of Ukraine, 2025. This is an Open Access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

Вступ

Стрімкий розвиток інформаційно-комунікаційних технологій, хмарних обчислень, інтернету речей та кіберфізичних систем призвів до появи нових вимог до процесів керування складними технічними об'єктами. Сучасні комп'ютерно-комунікаційні середовища характеризуються високою динамічністю, великими обсягами даних, неоднорідністю інформаційних ресурсів та необхідністю функціонування в реальному часі.

У таких умовах традиційні методи автоматичного керування демонструють обмежену ефективність через неможливість повного врахування невизначеностей, змін параметрів середовища та складних взаємозв'язків між елементами системи. Це обумовлює активне впровадження технологій штучного інтелекту, здатних забезпечувати адаптацію, самонавчання та автономне прийняття рішень.

Метою статті є аналіз сучасних інформаційних технологій, що використовуються для створення систем інтелектуального керування в розподілених комп'ютерно-комунікаційних середовищах, а також визначення перспективних напрямів їх подальшого розвитку.

Сучасні концепції інтелектуального керування

Інтелектуальне керування є міждисциплінарною галуззю, яка поєднує методи теорії керування, штучного інтелекту, аналізу даних та теорії прийняття рішень.

Основною особливістю інтелектуальних систем є здатність до:

- накопичення та аналізу знань;
- адаптації до змін зовнішнього середовища;
- прогнозування розвитку ситуації;
- самонавчання;
- автономного прийняття рішень.

Сучасні підходи до побудови інтелектуальних систем базуються на концепції замкненого циклу «сприйняття — аналіз — планування — дія». Саме така архітектура використовується в автономних робототехнічних комплексах, безпілотних транспортних системах, системах кіберзахисту та інтелектуальних мережах.

Одним із ключових напрямів розвитку є створення розподіленого інтелекту, в якому окремі вузли системи здатні самостійно приймати рішення та координувати свої дії з іншими учасниками мережі.

Методи забезпечення автономності інтелектуальних систем

Автономність є базовою характеристикою сучасних інтелектуальних систем.

Для забезпечення автономного функціонування система повинна реалізовувати такі функції:

- сприйняття навколишнього середовища;
- інтерпретацію отриманої інформації;
- формування моделей ситуації;
- планування поведінки;
- прийняття рішень;
- контроль виконання дій.

Особливе значення автономність має для робототехнічних систем, безпілотних літальних апаратів та розподілених мережевих комплексів.

У сучасних дослідженнях автономність розглядається як здатність системи функціонувати за умов неповної інформації, обмежених ресурсів та невизначеності зовнішнього середовища. Одним із перспективних напрямів є використання регульованої автономності, коли рівень самостійності системи може змінюватися залежно від умов функціонування [3].

Технології штучного інтелекту в системах інтелектуального керування

Машинне навчання є однією з базових технологій сучасних інтелектуальних систем. Основними напрямками його застосування є:

- класифікація ситуацій;
- прогнозування станів;
- виявлення аномалій;
- оптимізація процесів керування;
- підтримка прийняття рішень.

Особливого поширення набули методи:

- дерева рішень;
- випадкові ліси;
- метод опорних векторів;
- ансамблеві методи;
- баєсівські моделі.

Глибокі нейронні мережі забезпечують можливість аналізу великих обсягів неструктурованих даних.

До найбільш поширених архітектур належать:

- згорткові нейронні мережі (CNN);
- рекурентні мережі (RNN);
- LSTM-мережі;
- трансформери.

Вони широко використовуються для аналізу потоків даних, комп'ютерного зору, обробки природної мови та прогнозування складних процесів.

Навчання з підкріпленням дає змогу агентам формувати оптимальні стратегії поведінки шляхом взаємодії із середовищем.

Особливо перспективним є багатоагентне навчання з підкріпленням, яке дає змогу реалізовувати колективне прийняття рішень у розподілених системах. Основними проблемами такого підходу за-

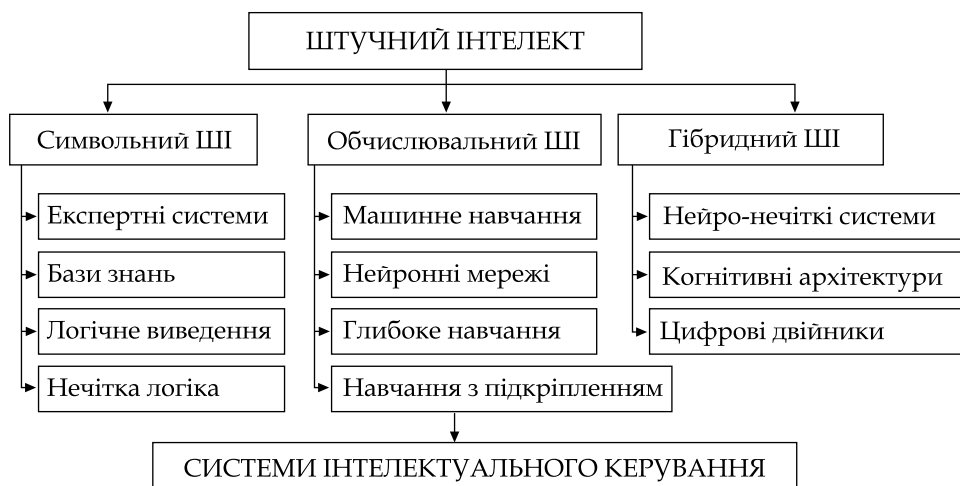


Рис. 1. Класифікація сучасних технологій штучного інтелекту, що використовуються при побудові систем інтелектуального керування

Таблиця 1. Порівняльна характеристика основних технологій штучного інтелекту для систем інтелектуального керування

Технологія	Переваги	Недоліки	Основні сфери застосування
Експертні системи	Пояснюваність рішень, використання знань експертів	Складність оновлення баз знань	Системи підтримки прийняття рішень
Нечітка логіка	Робота з невизначеністю	Потребує експертного налаштування	Автоматичне керування, діагностика
Штучні нейронні мережі	Висока точність прогнозування	Значні обчислювальні витрати	Розпізнавання образів, прогнозування
Машинне навчання	Адаптивність та самонавчання	Необхідність великих наборів даних	Аналітика даних, підтримка рішень
Глибоке навчання	Робота з неструктурованими даними	Складність інтерпретації результатів	Комп'ютерний зір, обробка мови
Інтелектуальні агенти	Автономність, гнучкість	Складність координації	Розподілені інформаційні системи
Багатоагентні системи	Масштабованість, відмовостійкість	Проблеми узгодження дій агентів	Мережецентричне керування
Навчання з підкріпленням	Оптимізація поведінки в реальному часі	Висока складність навчання	Робототехніка, автономний транспорт

лишаються координація агентів, масштабованість та нестабільність середовища.

Багатоагентні системи як основа розподіленого інтелекту

Однією з найбільш перспективних технологій інтелектуального керування є багатоагентні системи [7, 8].



Рис. 2. Узагальнена архітектура багатоагентної системи інтелектуального керування в розподіленому комп'ютерно-комунікаційному середовищі

Багатоагентна система являє собою сукупність автономних агентів, які взаємодіють між собою для досягнення спільної мети. Кожен агент має власні механізми сприйняття, аналізу інформації та прийняття рішень.

Основними перевагами багатоагентного підходу є:

- масштабованість;
- відмовостійкість;
- розподіленість обчислень;
- адаптивність;
- можливість самоорганізації [9].

Сучасні багатоагентні системи застосовують у:

- логістичних мережах;
- системах керування транспортом;
- промисловій автоматизації;
- енергетичних системах;
- робототехніці;
- військових системах керування [10].

Останні дослідження демонструють інтеграцію багатоагентних систем із технологіями інтернету речей та штучного інтелекту, що дає змогу створювати адаптивні мережеві екосистеми нового покоління.

Особливості функціонування інтелектуальних систем у розподілених комп'ютерно-комунікаційних середовищах

На відміну від централізованих систем керування, розподілені середовища характеризуються:

- затримками передачі інформації;
- втратами пакетів даних;

- неоднорідністю мережевої інфраструктури;
- високою динамічністю топології;
- інформаційною невизначеністю.

За таких умов ефективність функціонування системи залежить не лише від якості алгоритмів прийняття рішень, а й від здатності адаптуватися до змін параметрів мережі.

Особливого значення набувають технології периферійних обчислень (*Edge Computing*) та *Fog Computing*, які дають змогу переносити обчислювальні ресурси ближче до джерел даних і зменшувати затримки [11].

Одним із найбільш перспективних напрямів застосування технологій штучного інтелекту є побудова систем підтримки прийняття рішень. Такі системи призначені для аналізу великих масивів різномірної інформації, формування рекомендацій та вибору найбільш ефективних альтернатив дій в умовах невизначеності.

На відміну від традиційних інформаційних систем, інтелектуальні системи підтримки прийняття рішень здатні не лише зберігати та обробляти дані, а й здійснювати їх інтерпретацію, прогнозування розвитку ситуації та формування обґрунтованих рекомендацій. Це особливо важливо для складних розподілених середовищ, де кількість можливих альтернатив може значно перевищувати можливості людини щодо їх оперативного аналізу.

Сучасні дослідження демонструють ефективність використання штучного інтелекту для ситуаційного аналізу, прогнозування розвитку подій, оцінювання ризиків та автоматизованого планування. Завдяки цьому забезпечується підвищення швидкості прийняття рішень, зменшення впливу людського фактора та покращення якості управління складними технічними системами.

Особливу роль у таких системах відіграють методи машинного навчання та інтелектуального аналізу даних, які дають змогу автоматично виявляти приховані закономірності у великих обсягах інформації та формувати моделі підтримки прийняття рішень у реальному часі.

Незважаючи на активний розвиток автономних технологій, людина залишається важливим елементом більшості сучасних систем керування. Тому одним із ключових напрямів розвитку інтелектуальних технологій є вдосконалення людино-машинної взаємодії.

Сучасний підхід передбачає формування концепції спільного інтелекту, відповідно до якої людина та система штучного інтелекту взаємодіють як єдина когнітивна система. При цьому інтелектуальна система забезпечує аналіз великих обсягів інформації, виконує прогнозування та генерує можливі варіанти рішень, тоді як людина здійснює стратегічну оцінку ситуації та приймає остаточне рішення.

Ефективність такої взаємодії значною мірою визначається рівнем довіри між користувачем та інтелектуальною системою. Саме тому останніми роками активно розвиваються концепції *Explainable Artificial Intelligence (XAI)* [12], спрямовані на підвищення прозорості

алгоритмів прийняття рішень та забезпечення можливості пояснення отриманих результатів.

Інтеграція людино-машинної взаємодії з технологіями штучного інтелекту дає змогу поєднати високу обчислювальну потужність сучасних інформаційних систем із когнітивними можливостями людини, що є особливо важливим для управління складними розподіленими системами.

Ефективність функціонування систем інтелектуального керування значною мірою залежить від якості оброблення вхідної інформації. У сучасних розподілених середовищах обсяги даних постійно зростають, що потребує використання спеціалізованих методів скорочення розмірності та структуризації інформації.

Одним із найбільш ефективних підходів є використання методів кластеризації даних. Кластеризація дозволяє автоматично групувати подібні об'єкти, параметри або атрибути, що суттєво зменшує складність подальших обчислень.

Особливу актуальність такі методи мають під час аналізу багатовимірних наборів даних, характерних для сучасних комп'ютерно-комунікаційних систем. У таких випадках традиційні методи скорочення розмірності часто виявляються недостатньо ефективними або потребують значних обчислювальних ресурсів.

Застосування кластеризації атрибутів дозволяє виявляти взаємозалежні параметри, об'єднувати подібні характеристики у групи та зменшувати кількість ознак, необхідних для прийняття рішень. У результаті досягається скорочення часу оброблення інформації, підвищення продуктивності інтелектуальних алгоритмів та покращення якості отриманих результатів.

Перспективним напрямом є поєднання методів кластеризації з алгоритмами машинного навчання та багатоагентними технологіями, що дозволяє створювати масштабовані системи підтримки прийняття рішень для складних розподілених комп'ютерно-комунікаційних середовищ.

Одним із сучасних напрямів розвитку інтелектуальних інформаційних технологій є перехід від концепції обчислювального мислення до концепції мислення на основі штучного інтелекту. Такий підхід передбачає використання не лише традиційних алгоритмів оброблення даних, а й механізмів роботи зі знаннями, контекстом та семантичними зв'язками між об'єктами предметної області.

На відміну від класичного обчислювального мислення, що орієнтується переважно на формалізацію задач та алгоритмізацію процесів їх вирішення, мислення на основі штучного інтелекту базується на використанні баз знань, типових сценаріїв, механізмів логічного виведення та аналізу неструктурованої інформації. Важливою складовою такого підходу є здатність враховувати контекст прийняття рішень та використовувати накопичений досвід попереднього функціонування системи.

Подальший розвиток цієї концепції пов'язаний із використанням когнітивних обчислень, які поєднують можливості машинного навчання, глибоких нейронних мереж, оброблення природної мови та інтелектуального аналізу даних. Когнітивні системи забезпечують не лише автоматизоване виконання окремих операцій, але й підтримку процесів формування знань, прогнозування розвитку ситуацій та вироблення рекомендацій щодо подальших дій.

Застосування когнітивних обчислень у розподілених комп'ютерно-комунікаційних середовищах дає змогу суттєво підвищити ефективність функціонування систем інтелектуального керування, особливо за умов невизначеності, неповноти інформації та високої динаміки зовнішнього середовища. Важливою тенденцією розвитку сучасних систем керування є перехід до мережецентричних архітектур, у яких функції збору інформації, оброблення даних, прийняття рішень та формування керуючих впливів розподіляються між численними вузлами комп'ютерно-комунікаційної мережі.

На відміну від централізованих систем, мережецентричне керування дозволяє забезпечити більш високий рівень живучості, масштабованості та адаптивності. Водночас ефективність таких систем значною мірою залежить від характеристик інформаційно-комунікаційного середовища.

Основою інформаційного обміну в сучасних комп'ютерних мережах є пакетна передача даних. Під час функціонування розподілених систем можливі втрати інформаційних пакетів, зміна порядку їх доставки, варіації затримок передачі та перевантаження окремих каналів зв'язку. Такі фактори можуть істотно погіршувати якість інтелектуального керування, особливо коли система функціонує в режимі реального часу.

Для підвищення стійкості функціонування інтелектуальних систем у розподілених середовищах доцільним є використання адаптивних алгоритмів керування, здатних враховувати поточний стан мережі та компенсувати вплив зовнішніх збурень. Важливу роль при цьому відіграють технології прогнозування мережевих затримок, механізми відновлення втрачених даних та алгоритми синхронізації розподілених інформаційних потоків.

Практична реалізація мережецентричного інтелектуального керування потребує використання розгорнутих баз знань щодо характеристик об'єктів керування, особливостей функціонування мережі та можливих сценаріїв розвитку ситуації. Класифікаційний аналіз поточних даних уможливорює структурну та параметричну адаптацію алгоритмів керування, забезпечуючи досягнення поставлених цілей навіть за умов значної невизначеності.

Перспективним напрямом подальших досліджень є інтеграція технологій штучного інтелекту, багатоагентних систем та програмно-конфігурованих мереж для створення високоефективних систем розподіленого інтелектуального керування нового покоління.

Проблеми інформаційної безпеки та довіри до інтелектуальних систем

Інтеграція штучного інтелекту в розподілені середовища породжує нові виклики у сфері кібербезпеки.

До основних загроз належать:

- підміна навчальних даних;
- атаки на моделі машинного навчання;
- витік конфіденційної інформації;
- компрометація агентів;
- маніпулювання результатами прийняття рішень [15].

У зв'язку з цим активно розвиваються напрями *Trusted AI*, *Explainable AI* та *Federated Learning*, орієнтовані на підвищення надійності та прозорості функціонування інтелектуальних систем.

Перспективні напрями розвитку

Проведений аналіз дозволяє виділити такі перспективні напрями досліджень:

- побудова систем розподіленого інтелекту на основі багатоагентних технологій;
- інтеграція штучного інтелекту з цифровими двійниками;
- розвиток семантичних комунікацій між агентами;
- використання федеративного навчання;
- створення адаптивних систем прийняття рішень у режимі реального часу;
- побудова мережецентричних систем керування нового покоління.

Особливий інтерес становлять семантичні мережі комунікацій, які орієнтовано не на передачу даних, а на передачу знань і намірів між інтелектуальними агентами [16].

Висновки

У статті проведено аналіз сучасних інформаційних технологій створення систем інтелектуального керування в розподілених комп'ютерно-комунікаційних середовищах.

Встановлено, що найбільш перспективними технологіями є машинне навчання, глибоке навчання, багатоагентні системи, навчання з підкріпленням та інтелектуальні агенти. Визначено, що подальший розвиток систем інтелектуального керування пов'язаний із впровадженням розподіленого інтелекту, семантичних комунікацій, цифрових двійників та федеративного навчання.

Отримані результати можуть бути використані як теоретична основа для розроблення нових архітектур інтелектуального керування складними розподіленими технічними системами.

ДЕКЛАРАЦІЇ

Внесок авторів: Боровик В.О. провів комплексний аналіз сучасних інформаційних технологій, що використовуються для побудови систем інтелектуального керування в розподілених комп'ютерно-комунікаційних середовищах. Семенов Р.В. проаналізував методи забезпечення автономності інтелектуальних систем.

ШІ та інструменти: Автори заявляють, що не використовували інструменти штучного інтелекту при підготовці даної статті.

Конфлікт інтересів: Автори заявляють, що вони не мають фінансових інтересів або особистих зв'язків, які могли б вплинути на представлену роботу.

ЛІТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Russell S., Norvig P. *Artificial Intelligence: A Modern Approach*. 4th ed., Pearson, 2021, 1166 P.
2. Wooldridge M. *An Introduction to MultiAgent Systems*. John Wiley & Sons, 2020, 365 P.
3. Cardoso R., Ferrando A. A Review of Agent-Based Programming for Multi-Agent computers10020016
4. Jaleel H., Stephan J., Naji S. Multi-Agent Systems: A Review Study. *Ibn Al-Haitham Journal for Pure and Applied Sciences*, 2020, Vol. 33 (3), 188–214. <https://doi.org/10.30526/33.3.2483>
5. Herrera M., Pérez-Hernández M., Parlikad A., Izquierdo J. Multi-Agent Systems and Complex Networks: Review and Applications in Systems Engineering. *Processes*, 2020, Vol. 8 (3), Article 312. <https://doi.org/10.3390/pr8030312>
6. Gronauer S., Diepold K. Multi-agent Deep Reinforcement Learning: A Survey. *Artificial Intelligence Review*, 2022, Vol. 55, 895–943. <https://doi.org/10.1007/s10462-021-09996-w>
7. Wong A., Back T., Kononova A., Laat A. Deep Multiagent Reinforcement Learning: Challenges and Directions. *Artificial Intelligence Review*, 2023, Vol. 56, 5023–5056. <https://doi.org/10.1007/s10462-022-10299-x>
8. Volkov O., Tyshchuk O., Desiateryk O., Revunova E., Rachkovskij D. A Linear System Output Transformation For Sparse Approximation. *Cybernetics And Systems Analysis*, 2022, Vol. 58 (5), 840–850. <https://doi.org/10.1007/s10559-022-00517-3>
9. Ma C. et al. *Trusted AI in Multi-agent Systems: An Overview of Privacy and Security for Distributed Learning*. ArXiv, 2022. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2202.09027>
10. Guo S. et al. A Survey on Semantic Communication Networks: Architecture, Security, and Privacy. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2025, Vol. 27 (5), 2860–2894. <https://doi.org/10.1109/COMST.2024.3516819>
11. Goodfellow I., Bengio Y., Courville A. *Deep Learning*. MIT Press, 2016, 800 P.
12. Weiss G. *Multiagent Systems*. MIT Press, 2013, 920 P.
13. Jennings N., Wooldridge M. *Agent Technology: Foundations, Applications and Markets*. Springer, 2012, 325 P.
14. Cao Y., Yu W., Ren W., Chen G. An Overview of Recent Progress in the Study of Distributed Multi-Agent Coordination. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2013, Vol. 9 (1), 427–438. <https://doi.org/10.1109/TII.2012.2219061>
15. Sutton R., Barto A. *Reinforcement Learning: An Introduction*. 2nd ed. MIT Press, 2018, 352 (338) P.
16. Bondar S.O., Kozhokhina O.V., Borovik V.O., Linder Ya.M., Korshunov M.V. Groups of unmanned aerial vehicles usage perspectives and peculiarities. *Control Systems and Computers*, 2018, Issue 5, 25–37. <https://doi.org/10.15407/usim.2018.05.025>

Отримано/Received 18.06.2026

Прийнято/Accepted 12.07.2026

Опубліковано/Published 25.08.2026

V.O. BOROVYK, Leading Software Engineer
Institute of Information Technologies and Systems of the NAS of Ukraine,
40, Hlushkova Akad. ave., Kyiv, 03187, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0001-8860-616X>
vadymborovyk@gmail.com
R.V. SEMENOH, Senior Researcher, Deputy Head of laboratory
Institute of Information Technologies and Systems of the NAS of Ukraine,
40, Hlushkova Akad. ave., Kyiv, 03187, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-6714-6444>
ruslansemenoh8@gmail.com

INFORMATION TECHNOLOGIES FOR CREATING INTELLIGENT CONTROL SYSTEMS IN DISTRIBUTED COMPUTER AND COMMUNICATION ENVIRONMENTS

Introduction. The increasing complexity of distributed computer and communication environments requires the development of advanced intelligent control technologies capable of operating under conditions of uncertainty, dynamic network topology, communication delays, and large-scale data processing. Traditional control approaches are often unable to provide the required level of adaptability and autonomy in such environments, which has led to the widespread adoption of artificial intelligence technologies.

The purpose of the paper is to analyze existing information technologies used for the development of intelligent control systems in distributed computer and communication environments and to identify promising directions for their further evolution.

Results. The paper reviews contemporary artificial intelligence technologies, including machine learning, deep learning, reinforcement learning, expert systems, fuzzy logic, intelligent agents, and multi-agent systems. Particular attention is paid to the issues of autonomous decision-making, distributed intelligence, adaptive control, and coordination of autonomous agents operating in network-centric environments. The advantages, limitations, and application domains of the considered technologies are analyzed and compared.

The study demonstrates that multi-agent architectures, reinforcement learning algorithms, and distributed artificial intelligence technologies provide the highest potential for the implementation of intelligent control functions in complex distributed environments. Furthermore, emerging approaches based on digital twins, edge computing, federated learning, and semantic communications significantly expand the capabilities of next-generation intelligent control systems.

Conclusions. The obtained results can serve as a theoretical foundation for the design and implementation of adaptive intelligent control systems capable of autonomous operation and real-time decision-making in distributed computer and communication infrastructures.

Keywords: *artificial intelligence, intelligent control systems, distributed computer and communication environments, distributed intelligence, machine learning, reinforcement learning, multi-agent systems, autonomous systems, decision support, network-centric control.*