

УДК 004.75:004.67

DOI <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.1.2.6>**М. О. ВОЛК**

доктор технічних наук, професор,  
професор кафедри електронних обчислювальних машин  
Харківський національний університет радіоелектроніки  
ORCID: 0000-0003-4229-9904

**А. М. БУГРІЙ**

кандидат технічних наук,  
старший викладач кафедри електронних обчислювальних машин  
Харківський національний університет радіоелектроніки  
ORCID: 0009-0002-9059-3200

**Є. В. БІТЮКОВА**

магістрантка кафедри електронних обчислювальних машин  
Харківський національний університет радіоелектроніки  
ORCID: 0009-0009-1817-4571

**О. І. ГАЛУШКА**

магістрант кафедри електронних обчислювальних машин  
Харківський національний університет радіоелектроніки  
ORCID: 0009-0001-0041-214X

**Р. М. БРЕСТОВИЦЬКИЙ**

аспірант кафедри електронних обчислювальних машин  
Харківський національний університет радіоелектроніки  
ORCID: 0009-0009-1278-7975

**Б. В. СОРОБЕЙ**

аспірант кафедри електронних обчислювальних машин  
Харківський національний університет радіоелектроніки  
ORCID: 0009-0007-1468-6508

## РОЗПОДІЛЕНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ГЕТЕРОГЕННИХ СИСТЕМ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ

Стаття присвячена дослідженню та розробці розподіленої системи моделювання для гетерогенних систем Інтернету речей (IoT). У сучасних умовах розвитку IoT-технологій виникає необхідність у створенні ефективних методів керування ресурсами, синхронізації даних і забезпечення взаємодії великої кількості пристроїв. Існуючі моделі та системи моделювання мають низку обмежень, зокрема високі затримки в обробці даних, обмежену масштабованість та значні вимоги до обчислювальних ресурсів. У роботі запропоновано трирівневу архітектуру розподіленого моделювання, яка дозволяє ефективно керувати взаємодією IoT-пристроїв. Архітектура складається з рівня розподіленого віртуального моделювання мережі, рівня взаємодії та контролю, а також рівня служби спільного зв'язку. Така структура дозволяє підвищити продуктивність системи, забезпечити швидку синхронізацію станів об'єктів та зменшити навантаження на центральні обчислювальні вузли. Проведено аналіз сучасних підходів до управління ресурсами та оптимізації обчислювальних процесів у IoT-системах. Досліджено алгоритми синхронізації станів об'єктів, розподілу завдань між вузлами та механізми балансування навантаження. Запропоновано методику динамічного перерозподілу ресурсів, що дозволяє адаптивно змінювати конфігурацію системи залежно від поточного навантаження. Експериментальне моделювання продемонструвало зменшення затримок обміну даними, покращення синхронізації та підвищення ефективності розподілу ресурсів. Запропонований підхід може бути використаний у різних сферах, зокрема в розумних містах, автоматизованому виробництві, транспортних системах та промисловому Інтернеті речей. Результати дослідження відкривають перспективи для подальшої оптимізації алгоритмів керування IoT-мережами, інтеграції штучного інтелекту для прогнозування навантажень та розробки нових методів адаптивного балансування ресурсів.

**Ключові слова:** Інтернет речей, гетерогенні системи, розподілене моделювання, управління ресурсами, мережі, балансування навантаження, машинне навчання, хмарні обчислення.

M. O. VOLK

Doctor of Technical Sciences, Professor,  
Professor at the Department of Electronic Computers  
Kharkiv National University of Radio Electronics  
ORCID: 0000-0003-4229-9904

A. M. BUHRII

Candidate of Technical Sciences,  
Senior Lecturer at the Department of Electronic Computers  
Kharkiv National University of Radio Electronics  
ORCID: 0009-0002-9059-3200

I. V. BITIUKOVA

Master's Student at the Department of Electronic Computers  
Kharkiv National University of Radio Electronics  
ORCID: 0009-0009-1817-4571

O. I. GALUSKA

Master's Student at the Department of Electronic Computers  
Kharkiv National University of Radio Electronics  
ORCID: 0009-0001-0041-214X

P. M. BRESTOVYTSKYI

Postgraduate Student at the Department of Electronic Computers  
Kharkiv National University of Radio Electronics  
ORCID: 0009-0009-1278-7975

B. V. SOROBEY

Postgraduate Student at the Department of Electronic Computers  
Kharkiv National University of Radio Electronics  
ORCID: 0009-0007-1468-6508

## DISTRIBUTED SIMULATION OF HETEROGENEOUS SYSTEMS OF THE INTERNET OF THINGS

*The article is devoted to the research and development of a distributed modelling system for heterogeneous Internet of Things (IoT) systems. In the current conditions of IoT technology development, there is a need to create effective methods for resource management, data synchronization, and ensuring the interaction of a large number of devices. Existing models and modelling systems have a number of limitations, in particular, high delays in data processing, limited scalability, and significant requirements for computing resources. The paper proposes a three-level distributed modelling architecture that allows for effective management of the interaction of IoT devices. The architecture consists of a distributed virtual network modelling layer, an interaction and control layer, and a shared communication service layer. Such a structure allows for increasing system performance, ensuring rapid synchronization of object states, and reducing the load on central computing nodes. An analysis of modern approaches to resource management and optimization of computing processes in IoT systems is conducted. Algorithms for object state synchronization, task distribution between nodes, and load balancing mechanisms are studied. A dynamic resource redistribution method is proposed, which allows adaptively changing the system configuration depending on the current load. Experimental modelling has demonstrated a reduction in data exchange delays, improved synchronization, and increased resource allocation efficiency. The proposed approach can be used in various areas, including smart cities, automated manufacturing, transportation systems, and the industrial Internet of Things. The research results open up prospects for further optimization of IoT network control algorithms, integration of artificial intelligence for load forecasting, and development of new methods for adaptive resource balancing.*

**Key words:** Internet of Things, heterogeneous systems, distributed simulation, resource management, networks, load balancing, machine learning, cloud computing.

### Постановка проблеми

Розвиток Інтернету речей (IoT) значно впливає на різні сфери, такі як розумні міста, промисловість, медицина та транспорт. Однією з основних проблем у цій галузі є ефективне управління ресурсами та синхронізація пристроїв [1, 2]. Проблема ще заглублюється завдяки гетерогенній природі таких розподілених систем [3]. Існуючі рішення мають низку обмежень, зокрема високі затримки в передачі даних, обмежену масштабованість та значні вимоги до обчислювальних ресурсів.

Одним із важливих аспектів розвитку IoT є створення ефективних методів аналізу та прогнозування трафіку, що дозволяє зменшити перевантаження мереж і підвищити ефективність обміну даними. Крім того, велика кількість

IoT-пристроїв створює додаткові виклики щодо безпеки та конфіденційності інформації. Саме тому необхідно розглядати не лише технічні аспекти управління ресурсами, а й заходи, які забезпечують захищеність даних.

Серед сучасних методів розподілення завдань за обчислювальними ресурсами можна виділити евристичні алгоритми [4], які дозволяють ефективно розподіляти обчислювальні ресурси, ринкові методи [5], що використовують механізми аукціонів для управління доступом до ресурсів, методи на основі альянсу [6], які створюють кооперативні групи пристроїв для спільного виконання завдань, та інші. Гетерогенні системи розглядаються як архітектури, які можуть відрізнятися своїми структурами, функціями, комунікацією, можливостями та розроблені для сумісної роботи у різних конфігураціях.

Розподілені підходи до управління IoT забезпечують вищу надійність у порівнянні з централізованими моделями, проте вони потребують ефективних алгоритмів координації та синхронізації. Дослідження показують, що комбіновані підходи, які поєднують локальне управління та глобальну координацію, можуть значно покращити ефективність систем у цілому.

Окремо варто зазначити важливість методів прогнозування навантаження, які базуються на машинному навчанні та аналізі історичних даних. Вони дозволяють адаптувати IoT-системи до змін у навантаженні, що підвищує їхню стабільність та продуктивність.

Останні роки розвиток платформ моделювання Інтернету речей відбувався паралельно з еволюцією архітектури розподілених гетерогенних систем. Спочатку компанії надавали модулі для моделювання разом із апаратними платформами, які можна було інтегрувати, наприклад, у Simulink, що дозволяло користувачам удосконалювати розробку. Однак зі збільшенням складності структур розширювався і спектр завдань, що ускладнювало процес моделювання. З появою нових пристроїв ця складність лише зростала. Як наслідок, єдина платформа моделювання перестала відповідати потребам користувачів, що стимулювало розробку незалежного програмного забезпечення для моделювання [7].

Технології моделювання постійно розвиваються, переходячи від роботи з окремими об'єктами до моделювання складних, взаємопов'язаних структур у динамічних середовищах. Масштаби програмного забезпечення також зростають, і традиційний підхід, що передбачає використання окремих комп'ютерів, вже не є ефективним. Для вирішення проблеми масштабованості необхідна архітектура розподіленої симуляції. Основним завданням є розробка такої архітектури, яка відповідала б зростаючим вимогам до функціональності та складності гетерогенних IoT-систем [8].

Розподілена архітектура моделювання має кілька важливих переваг. Вона точніше відображає реальні комунікаційні процеси в умовах гетерогенних систем із централізованою або розподіленою співпрацею. Це підкреслює важливість використання мережевої структури для розгортання складних IoT-систем [8].

Недоліками існуючих рішень є обмежена масштабованість, високе навантаження на центральні вузли, недостатня точність синхронізації станів об'єктів, висока складність інтеграції нових пристроїв.

#### **Формулювання мети дослідження**

Метою статті є розробка моделі системи розподіленого моделювання систем Інтернету речей (IoT) з урахуванням їх гетерогенних властивостей, що дозволить створити ефективні методи управління ресурсами, організувати синхронізацію даних, забезпечити високу продуктивність великої кількості IoT-пристроїв.

#### **Викладення основного матеріалу дослідження**

Використовуючи досвід розробки модулів контролю, взаємодії, координації датчиків та пристроїв розглянемо трирівневу розподілену архітектуру моделювання, адаптовану для гетерогенних систем Інтернету речей. Враховуючи можливі труднощі, пов'язані з узгодженістю роботи різнорідних платформ, у процесі проектування ми керувалися трьома ключовими принципами:

- моделювання має використовувати фізичні закони, а його результати повинні залишатися узгодженими між усіма розподіленими вузлами симуляції;
- можливості кожного пристрою визначаються його конструктивними особливостями, параметрами середовища, технічними характеристиками, допоміжними модулями та системою керування;
- алгоритми взаємодії повинні бути перевірені та протестовані з використанням автентичних розподілених методів верифікації.

На основі цих концепцій було розроблено архітектурну модель, яка включає три основні рівні (рисунк 1).

Рівень 1. Мережевий рівень розподіленого віртуального моделювання. Основне завдання цього рівня – підтримка спільного віртуального середовища для всіх учасників розподіленої системи.

Як і у випадку масових багатокористувацьких онлайн-ігор, застосовується клієнт-серверна архітектура, у якій клієнт підтримує локальну копію віртуального простору, а сервер виконує збереження параметрів і результатів симуляції. Функціональність сервера розподіляється між чотирма основними службами: моделювання фізичних взаємодій, управління сценаріями, синхронізації та адміністрування сеансів.

Рівень 2. Підмережевий рівень контролю та взаємодії. Запропонована архітектура зберігає ключові переваги наявних підходів. Розроблена підмережа забезпечує з'єднання віртуального користувача з його центральним модулем управління, який відповідає за контроль поведінки користувача або пристрою.

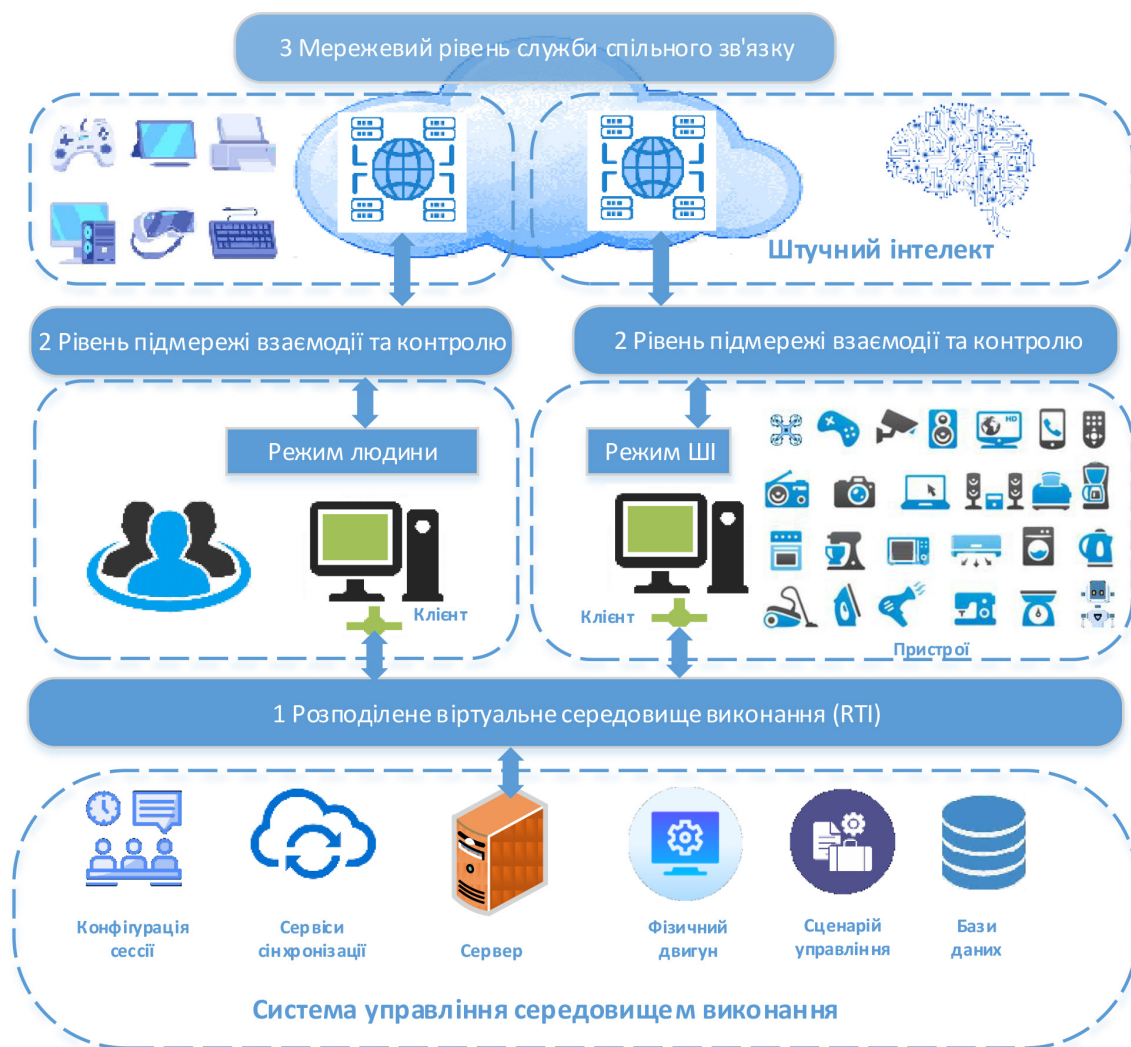


Рис. 1. Архітектура платформи розподіленого моделювання з трьома рівнями

Віртуальний користувач може функціонувати у вигляді мобільної платформи, оснащеної сенсорними модулями та приводами, тоді як центральний модуль управління може бути як апаратним комплексом із вбудованою операційною системою реального часу, так і працювати під управлінням людини. Таким чином, дана підмережа підтримує як автономний режим роботи на основі алгоритмів штучного інтелекту, так і інтерактивний режим, де керування здійснюється оператором.

Рівень 3. Мережевий рівень загального зв'язку. Концепція цього рівня, що продемонструвала свою ефективність у розподілених вбудованих системах реального часу (наприклад, у технології DDS для обміну даними), застосовується також у запропонованій моделі. Її основна функція – забезпечення базового рівня обміну інформацією між усіма учасниками системи. Передбачається, що цей рівень сприятиме координації між основними обчислювальними вузлами гетерогенних IoT-систем, дозволяючи їм ефективно взаємодіяти в межах єдиної інформаційної інфраструктури.

Було проведено тестування продуктивності системи в умовах реальних навантажень. Для моделювання використовувалися сценарії розподілу завдань у розумних містах та промислових IoT-мережах. Досліджувалися показники часу виконання, ефективності використання ресурсів і енергоспоживання.

Для проведення тестів було обрано кілька типових сценаріїв, які імітують роботу IoT-систем у різних середовищах. Наприклад, у міському середовищі аналізувалися ситуації, пов'язані з оптимізацією транспортних потоків та управлінням енергоспоживанням у смарт-будівлях. У промислових сценаріях оцінювалася ефективність роботи сенсорних мереж та розподілу обчислювальних ресурсів між різними пристроями.

На рисунку 2 представлено результати візуалізації отриманих даних. Графік відображає розподіл процесорного часу виконання моделей у відношенні до повного часу моделювання, що ініціює глобальні зміни параметрів моделювання на різних етапах – початковому, проміжному та завершальному.

Оскільки на початку моделювання всі пристрої знаходяться у стані очікування (режим сну), процент оновлення даних є низький і не перевищує 5 %. Коли система переходить у режим активного виконання завдань, пристрої починають взаємодію, змінюючи контрольовані параметри, що призводить до значного зростання часу використання процесора до 63 % окремими пристроями. Важливою властивістю системи є те, що у процесі моделювання задіяні тільки ті моделі приборів, які приймають участь у виконанні конкретного завдання. Моделі пристроїв, які не брали активної участі в процесі, не виконувались.

Результати тестування показали: зменшення середнього часу виконання завдань на 30 %; підвищення точності синхронізації станів об'єктів на 25 %; зниження енергоспоживання на 20 % завдяки оптимізації розподілу ресурсів.

Крім того, результати експериментів дозволили визначити оптимальні конфігурації параметрів для роботи IoT-систем в умовах високих навантажень.

Було виявлено, що використання адаптивного підходу до управління ресурсами дозволяє зменшити ризики перевантаження мережі та забезпечити стабільну роботу пристроїв.

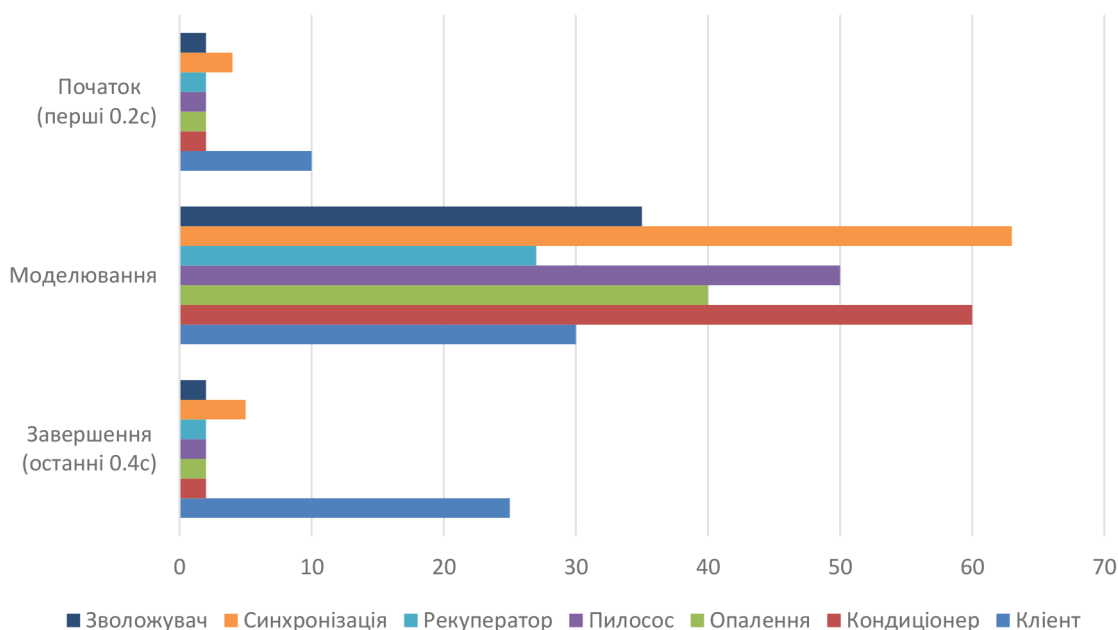


Рис. 2. Процент виконання моделей пристроїв (%) на початку, в процесі та в кінці фрейму моделювання

### Висновки

Запропонована архітектура розподіленого моделювання для IoT-систем дозволяє підвищити ефективність використання ресурсів, забезпечити масштабованість, а також мінімізувати затримки в комунікації між пристроями. Впровадження алгоритмів адаптивного балансування навантаження дозволить значно покращити продуктивність IoT-систем. Використання моделей штучного інтелекту та самонавчання створює перспективи для подальшого вдосконалення управління IoT-мережами.

Запропонована в роботі модель включає механізми балансування навантаження, адаптивну маршрутизацію та оптимізацію управління трафіком, що робить її ефективним інструментом для майбутніх досліджень і розробок у сфері IoT. Крім того, використання сучасних алгоритмів аналізу великих даних та машинного навчання дозволяє вдосконалити методи прогнозування трафіку, що є критично важливим для ефективного функціонування IoT-мереж.

Ключові переваги запропонованої моделі: підвищення продуктивності системи завдяки оптимізованому управлінню ресурсами; масштабованість, що дозволяє застосовувати систему у великих IoT-мережах; гнучкість, що забезпечує адаптацію до змін у навантаженні та зовнішніх умовах.

Таким чином, результати дослідження показують, що запропонована модель може значно покращити ефективність роботи IoT-систем у різних сферах, від розумних міст до промислових комплексів.

Можливі напрямки подальших досліджень: інтеграція штучного інтелекту для прогнозування змін у навантаженні на IoT-мережу; розробка механізмів адаптивного балансування навантаження для великих розподілених IoT-систем; оптимізація алгоритмів синхронізації для роботи у високонавантажених мережах; використання технологій блокчейн для забезпечення безпеки та надійності взаємодії між пристроями; удосконалення механізмів самонавчання для підвищення автономності IoT-систем.

Зокрема, перспективним напрямком є розробка методів інтелектуального аналізу даних, що дозволить прогнозувати пікові навантаження та автоматично коригувати параметри роботи системи. Також важливим аспектом є покращення безпеки IoT-мереж шляхом розробки нових механізмів аутентифікації та шифрування даних.

Запропоновані підходи сприяють розширенню можливостей розподілених IoT-систем та створюють основу для подальшого розвитку цієї технології. У майбутньому особливу увагу слід приділити впровадженню автономних механізмів управління ресурсами, що дозволить мінімізувати вплив людського фактора на роботу IoT-інфраструктури.

#### Список використаної літератури

1. Shakhathreh H., Sawalmeh A. H., Al-Fuqaha A., Dou Z., Almaita E., Khalil I., Othman N. S., Khreishah A., Guizani M. Unmanned Aerial Vehicles: A Survey on Civil Applications and Key Research Challenges. *IEEE Access* 2019, Vol.7. P. 48572–48634. doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2909530>
2. Qin B., Zhang D., Tang S., Wang M. Distributed Grouping Cooperative Dynamic Task Assignment Method of UAV Swarm. *Appl. Sci.* 2022, 12, 2865. <https://doi.org/10.3390/app12062865>
3. Rizk Y., Awad M., Tunstel E. W. Cooperative Heterogeneous Multi-Robot Systems: A Survey. *ACM Comput. Surv.* 2019, Vol.52(2) art.29. P.1–31. <https://doi.org/10.1145/330384>
4. Jiang X., Zeng X., Sun J., Chen J. Research status and prospect of distributed optimization for multiple aircraft. *Acta Astronaut.* 2021, 42, 524551. <https://doi.org/10.7527/S1000-6893.2020.24551>
5. Ye F., Chen J., Sun Q., Tian Y., Jiang T. Decentralized task allocation for heterogeneous multi-UAV system with task coupling constraints. *J. Supercomput.* 2020, 77, P.111–132.
6. Chen J., Wu Q., Xu Y., Qi N., Guan X., Zhang Y., Xue Z. Joint Task Assignment and Spectrum Allocation in Heterogeneous UAV Communication Networks: A Coalition Formation Game-Theoretic Approach. *IEEE Trans. Wirel. Commun.* 2021, 20, 440–452. DOI: <https://doi.org/10.1109/TWC.2020.3025316>
7. Filimonchuk T., Volk M., Ruban I., Tkachov V. Development of information technology of tasks distribution for grid-systems using the GRASS simulation environment. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies.* 2016. Vol. 3/9 (81). pp. 45–53. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.71892>
8. Volk M., Buhrii A., Kovtun E., Zhuravel D., Zborovskiy M. Simulation and management of fog computing for IoT. 7-th International Scientific and Technical Conference “COMPUTER AND INFORMATION SYSTEMS AND TECHNOLOGIES”. Kharkiv : NURE. – 2024. – P. 11–12.
9. Волк М. О., Гора М. В. Модифікований метод самовідновлення розподіленого програмного забезпечення в гетерогенних комп'ютерних системах. Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості. 2024. № 1(27). С. 5–17. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2024.27.005>

#### References

1. Shakhathreh, H., Sawalmeh, A. H., Al-Fuqaha, A., Dou, Z., Almaita, E., Khalil, I., Othman, N. S., Khreishah, A., Guizani, M. (2019) Unmanned Aerial Vehicles: A Survey on Civil Applications and Key Research Challenges. *IEEE Access* 2019, Vol.7. P. 48572–48634. doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2909530>
2. Qin, B., Zhang, D., Tang, S., Wang, M. (2022) Distributed Grouping Cooperative Dynamic Task Assignment Method of UAV Swarm. *Appl. Sci.* 2022, 12, 2865. <https://doi.org/10.3390/app12062865>
3. Rizk, Y., Awad, M., Tunstel, E. W. (2019) Cooperative Heterogeneous Multi-Robot Systems: A Survey. *ACM Comput. Surv.* 2019, Vol. 52(2) art. 29. P. 1–31. <https://doi.org/10.1145/330384>
4. Jiang, X., Zeng, X., Sun, J., Chen, J. (2021) Research status and prospect of distributed optimization for multiple aircraft. *Acta Astronaut.* 2021, 42, 524551. <https://doi.org/10.7527/S1000-6893.2020.24551>
5. Ye, F., Chen, J., Sun, Q., Tian, Y., Jiang, T. (2020) Decentralized task allocation for heterogeneous multi-UAV system with task coupling constraints. *J. Supercomput.* 2020, 77, P.111–132.
6. Chen, J., Wu, Q., Xu, Y., Qi, N., Guan, X., Zhang, Y., Xue, Z. (2021) Joint Task Assignment and Spectrum Allocation in Heterogeneous UAV Communication Networks: A Coalition Formation Game-Theoretic Approach. *IEEE Trans. Wirel. Commun.* 2021, 20, 440–452. DOI: <https://doi.org/10.1109/TWC.2020.3025316>
7. Filimonchuk, T., Volk, M., Ruban, I., Tkachov, V. (2016) Development of information technology of tasks distribution for grid-systems using the GRASS simulation environment. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies.* 2016. Vol. 3/9(81). pp. 45–53. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.71892>
8. Volk, M., Buhrii, A., Kovtun, E., Zhuravel, D., Zborovskiy, M. (2024) Simulation and management of fog computing for IoT. 7-th International Scientific and Technical Conference «COMPUTER AND INFORMATION SYSTEMS AND TECHNOLOGIES». Kharkiv: NURE. – 2024. – P. 11–12
9. Volk, M., & Hora, M. (2024). A modified method of self-recovery of distributed software in heterogeneous computer systems. *INNOVATIVE TECHNOLOGIES AND SCIENTIFIC SOLUTIONS FOR INDUSTRIES*, (1(27)), 5–17. <https://doi.org/10.30837/itssi.2024.27.005>