

С. С. Пироженко, А. С. Гук

Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна

ПРОЕКТУВАННЯ СТРУКТУРИ ІМІТАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ ГЕТЕРОГЕННОГО ВІРТУАЛІЗОВАНОГО ЦЕНТРУ ОБРОБКИ ДАНИХ

Анотація. **Актуальність дослідження.** У реальних умовах експлуатації центри обробки даних формуються на основі різномірних апаратних платформ, мережових рішень та програмних середовищ, що призводить до появи гетерогенних обчислювальних інфраструктур. Така гетерогенність ускладнює процеси керування ресурсами, балансування навантаження та забезпечення заданого рівня якості обслуговування. **Об'єктом** дослідження є процес обробки даних у гетерогенній віртуалізованій центрі обробки даних як складна багатокомпонентна обчислювальна система, що об'єднує різномірні апаратні, програмні та мережові ресурси у єдину інфраструктуру. **Предметом** дослідження є методи та засоби імітаційного моделювання процесів функціонування гетерогенного віртуалізованого центру обробки даних, зокрема моделі взаємодії різномірних ресурсів, механізми їх віртуалізації та алгоритми розподілу навантаження. **Метою** дослідження є проектування та дослідження структури імітаційної моделі гетерогенного віртуалізованого центру обробки даних, що дозволяє аналізувати вплив різномірності обчислювальних, мережових і програмних ресурсів на ефективність функціонування системи, а також оцінювати характеристики продуктивності, масштабованості та керування ресурсами в умовах віртуалізації. **Результати дослідження.** У ході виконання роботи було розроблено структуру імітаційної моделі гетерогенного віртуалізованого центру обробки даних з урахуванням різномірності апаратних та програмних ресурсів, обґрунтовано вибір середовища імітаційного моделювання для дослідження процесів функціонування ГВЦОД, реалізовано імітаційну модель, що дозволяє досліджувати вплив гетерогенності ресурсів на продуктивність та ефективність роботи віртуалізованої інфраструктури, отримано кількісні та якісні показники функціонування ГВЦОД у різних сценаріях навантаження, проведено аналіз результатів моделювання та сформульовано рекомендації щодо підвищення ефективності керування різномірними ресурсами. Подальші дослідження буде спрямовано на розширення імітаційної моделі з урахуванням енергоспоживання та енергоефективності гетерогенних ресурсів.

Ключові слова: центр обробки даних, гетерогенність, віртуалізація, багатокомпонентність, імітаційна модель.

Вступ

Стрімкий розвиток інформаційних технологій, хмарних обчислень та сервіс-орієнтованих архітектур зумовлює зростання вимог до продуктивності, масштабованості та ефективності сучасних центрів обробки даних. У реальних умовах експлуатації центри обробки даних формуються на основі різномірних апаратних платформ, мережових рішень та програмних середовищ, що призводить до появи гетерогенних обчислювальних інфраструктур [1]. Така гетерогенність ускладнює процеси керування ресурсами, балансування навантаження та забезпечення заданого рівня якості обслуговування.

Використання технологій віртуалізації є ключовим підходом до об'єднання різномірних ресурсів у єдине логічне середовище, проте в умовах гетерогенності зростає складність аналізу поведінки системи, прогнозування її характеристик та оцінювання ефективності прийнятих рішень [2]. Проведення експериментів безпосередньо на реальному гетерогенному віртуалізованому центрі обробки даних є економічно витратним, технічно складним та часто неможливим.

У зв'язку з цим особливої актуальності набуває застосування імітаційного моделювання як інструменту дослідження процесів функціонування гетерогенних віртуалізованих центрів обробки даних [3]. Імітаційні моделі дозволяють враховувати різномірність ресурсів, динамічний характер навантажень, механізми віртуалізації та взаємодію компонентів системи, забезпечуючи отримання достовірних кількісних і якісних характеристик [4, 5].

Таким чином, проектування структури імітаційної моделі гетерогенного віртуалізованого центру обробки даних є актуальним науково-практичним завданням, вирішення якого сприяє підвищенню ефективності керування ресурсами, оптимізації функціонування обчислювальних інфраструктур та обґрунтованому прийняттю проектних рішень [6].

Об'єктом дослідження є процес обробки даних у гетерогенній віртуалізованій центрі обробки даних як складна багатокомпонентна обчислювальна система, що об'єднує різномірні апаратні, програмні та мережові ресурси у єдину інфраструктуру.

Предметом дослідження є методи та засоби імітаційного моделювання процесів функціонування гетерогенного віртуалізованого центру обробки даних, зокрема моделі взаємодії різномірних ресурсів, механізми їх віртуалізації та алгоритми розподілу навантаження.

Метою дослідження є проектування та дослідження структури імітаційної моделі гетерогенного віртуалізованого центру обробки даних, що дозволяє аналізувати вплив різномірності обчислювальних, мережових і програмних ресурсів на ефективність функціонування системи, а також оцінювати характеристики продуктивності, масштабованості та керування ресурсами в умовах віртуалізації.

1. Обґрунтування вибору середовища імітаційного моделювання

У даній роботі розглянуто завдання синтезу складної системи використовуючи засоби комп'ютерного моделювання. З усіх доступних методів найкращим вибором є застосування інструментів

імітаційного моделювання (ІМ), оскільки це найпоширеніший підхід вирішення таких завдань [7].

Головна ціль моделювання полягає у отриманні як кількісних, і якісних результатів з урахуванням імітаційної моделі [8]. Під якісними характеристиками маються на увазі виявлені властивості моделюється системи, а під кількісними - значення змінних та їх характеристики. Створення комп'ютерної моделі є складне завдання, оскільки необхідно враховувати всі

внутрішні зв'язки об'єкта моделювання, і модель повинна точно відображати всі його фактори. Тому потрібно проаналізувати існуючі інструменти імітаційного моделювання на ринку, здатні вирішити поставлені дослідницькі завдання. В даний час на ринку програмного забезпечення для імітаційного моделювання представлено безліч різних продуктів, розробники яких пропонують широкий спектр систем різних методів імітаційного моделювання. (табл. 1) [9].

Таблиця 1 – Програмне забезпечення для імітаційного моделювання

Методи ІМ	Програмні інструменти імітаційного моделювання
Дискретно-подійне	GPSS, AnyLogic, Arena, Extend, PowerSim Studio, ProModel, Pilgrim, SimScript, FlexSim та ін.
Системна динаміка	AnyLogic, SimBioSys, eMPlant, Plant Simulation, SimuLab, VenSim, Pilgrim, Stella та ін.
Агентне моделювання	AnyLogic, SimAgent, SimBioSys, AgentSpeak, TeleScript, RePast, NetLogo, Mason та ін.

Так як структурою архітектури програмного комплексу підтримки процесу перерозміщення ВМ обрано парадигму «менеджер-агент», то вибір середовища моделювання був зроблений на користь програмного продукту FlexSim. Це середовище імітаційного моделювання має низку переваг: необхідні для вирішення дослідницьких завдань вбудовані бібліотеки, можливість програмування на Java для створення нестандартних властивостей об'єктів та класів, зручний та інтуїтивно зрозумілий графічний інтерфейс, безліч прикладів моделей та вичерпна документація [10, 11]. Платформа також пропонує гнучкість та потужні аналітичні інструменти.

2. Формування структури імітаційної моделі гетерогенного віртуалізованого центру обробки даних

Структура імітаційної моделі гетерогенного віртуалізованого центру обробки даних (ГВЦОД) представлена такими модулями (генераторами структурних елементів):

- 1) модуль генерації параметрів ЦОД;
- 2) модуль створення параметрів кластера;
- 3) модуль створення параметрів ВМ;
- 4) модуль генерації параметрів ЖМ.

У модулі генерації «Параметри ЦОД» генерується кількість кластерів ФМ, представлених як кластери серверів, оскільки ЖМ ВМ здійснюється в межах одного кластера.

У модулі генерації «Параметри кластера» ФМ визначається кількість серверів (ФМ) і пропускна здатність кластера, при цьому в кожному сервері генеруються ресурси: С (CPU), М (RAM).

Тип ГВ (g_1, g_2) представлений типом алгоритму ЖМ: g_1 – це Pre-cory; g_2 – це Post-cory.

У модулі генерації «Параметри ВМ» визначається кількість ВМ із запитуваними/споживаними ресурсами: С (CPU), М (RAM). Для кожної ВМ генеруються різні за обсягом ресурси. У модулі генерації «Параметри ЖМ» реалізовано два алгоритми ЖМ ВМ Pre-cory та Post-cory:

1) з урахуванням методу XEN SandPiper – XEN SandPiper;

2) з урахуванням методу обчислення навантаження віртуалізованого сервера – МНВС;

3) розроблений алгоритм перерозміщення ГВЦОД на основі метаевристики

Вигляд інтерфейсу налаштування структури ГВЦОД розробленої імітаційної моделі представлений на рис. 1.



Рис. 1. Інтерфейс налаштування структури гетерогенного віртуалізованого центру обробки даних

3. Експериментальна оцінка збіжності та обчислювальної складності алгоритму перерозміщення віртуальних машин віртуалізованого центру обробки даних

Для оцінювання ступеня досягнення мети дослідження було ухвалено рішення щодо проведення імітаційного експерименту на розробленому симуляторі ГВЦОД. Для перевірки розробленого алгоритму перерозміщення ВМ на властивість збіжності необхідно запустити алгоритм на розробленій імітаційній моделі ГВЦОД і перевірити, чи він зупиниться після виконання кінцевого числа кроків з виведенням результату. Конфігурація використовуваного в експерименті комп'ютера включає:

- процесор Intel Core i7-2500 CPU;
- ОЗУ – 16 Гб;
- відеоадаптер Intel HD Graphics;
- операційна система MS Windows 11 PRO.

У ході проведення експерименту результати порівняльного аналізу часу роботи алгоритму були зведені до табл. 2 та представлені на графіку рис. 2.

Таблиця 2 – Оцінка тимчасової складності алгоритму перерозміщення віртуальних машин

№ прогону	Розмір вхідних даних, ФМ	Час роботи алгоритму t , с
1	10	0,55
2	20	2,56
3	30	5,55
4	40	9,51
5	50	13,8
6	60	17,7
7	70	21,02
8	80	24,59
9	90	27,63
10	100	31,08

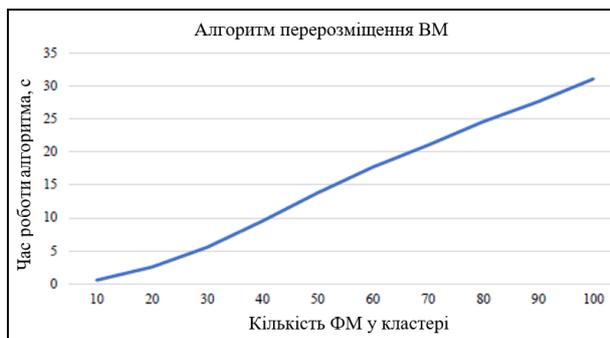


Рис. 2. Залежність тривалості роботи алгоритму перерозміщення ВМ від збільшення обсягу кластера ФМ

Результати експерименту дозволяють дійти висновку, що час роботи алгоритму перерозміщення ВМ збільшується лінійно зі збільшенням розміру кластера. Для кластера розміром 100 ФМ час прийняття рішення становить близько 31,08 секунд, що є цілком прийнятним часом виконання для автономного алгоритму.

Таким чином можна дійти невтішного висновку, що запропонований алгоритм перерозміщення ВМ є швидким і здійсненням методом у тих великомасштабних ЦОД.

Висновки

У статті розглянуто проектування структури імітаційної моделі гетерогенного віртуалізованого центру обробки даних (ГВЦОД), функціонування якого базується на використанні різнорідних обчислювальних, мережевих та програмних ресурсів. Основну увагу приділено обґрунтуванню вибору середовища імітаційного моделювання як ефективного інструменту дослідження складних гетерогенних систем. Показано, що імітаційне моделювання дозволяє адекватно враховувати неоднорідність апаратних платформ, відмінності у продуктивності ресурсів, особливості віртуалізації та їх вплив на загальну поведінку ГВЦОД. Отримані результати формують основу для подальшої побудови імітаційної моделі ГВЦОД та дослідження ефективності керування різнорідними ресурсами в різних режимах роботи.

Гетерогенність обчислювальних ресурсів, що проявляється у різній архітектурі, продуктивності та функціональному призначенні апаратних і програмних компонентів, суттєво ускладнює процес аналізу та проектування сучасних центрів обробки даних.

Імітаційне моделювання є найбільш доцільним підходом для дослідження гетерогенних віртуалізованих систем, оскільки дозволяє враховувати різнорідність ресурсів, механізми їх об'єднання у віртуальне середовище та динамічний характер розподілу навантаження. Використання імітаційних моделей забезпечує можливість отримання кількісних показників ефективності роботи ГВЦОД, а також якісних характеристик, що відображають вплив гетерогенності на стабільність і масштабованість системи. Проведений аналіз середовищ імітаційного моделювання показав, що правильний вибір інструментів дозволяє ефективно досліджувати сценарії функціонування гетерогенного віртуалізованого центру обробки даних.

Подальші дослідження буде спрямовано на розширення імітаційної моделі з урахуванням енергоспоживання та енергоефективності гетерогенних ресурсів, дослідження адаптивних і інтелектуальних алгоритмів керування ресурсами в гетерогенних віртуалізованих центрах обробки даних, інтеграцію моделей відмовостійкості та надійності для аналізу поведінки ГВЦОД в умовах збоїв і деградації ресурсів, моделювання сценаріїв масштабування та міграції віртуальних машин у гетерогенному середовищі, оптимізацію розподілу навантаження та прогнозування станів гетерогенного віртуалізованого центру обробки даних.

Конфлікт інтересів

Автори декларують, що не мають конфлікту інтересів стосовно даного дослідження, в тому числі фінансового, особистісного характеру, авторства чи іншого характеру, що міг би вплинути на дослідження та його результати, представлені в даній статті.

Використання засобів штучного інтелекту

Автори підтверджують, що не використовували технології штучного інтелекту при створенні представленої роботи.

REFERENCES

1. Pyrozhenko S., and Radchenko V. (2025), "Methods and algorithms for virtual machine migration", *Системи управління, навігації та зв'язку*. Полтава : Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», 2025. вип. 3(81), С. 167–171, doi: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2025.3.167>
2. Silva, D., Rafael, J. & Fonte, A., 2023. Virtualization Maturity in Creating System VM: An Updated Performance Evaluation. *Int. Journal of Electrical and Computer Engineering Research*, 3(2), pp. 7–17. <https://doi.org/10.53375/ijecer.2023.341>
3. Zhang, S., Wang, Y., Wan, X., Li, Z. & Guo, Y., 2023. Virtualization Airborne Trusted General Computing Technology. *Applied Sciences*, 13(3), 1342. <https://doi.org/10.3390/app13031342>
4. Altahat, M.A., Daradkeh, T. & Agarwal, A., 2025. Virtual machine scheduling and migration management across multi-cloud data centers: blockchain-based versus centralized frameworks. *Journal of Cloud Computing*, 14, Article number: 1. <https://doi.org/10.1186/s13677-024-00724-7>
5. Kuchuk, N., Mozhaiev, O., Semenov, S., Haichenko, A., Kuchuk, H., Tiulieniev, S., Mozhaiev, M., Brusakova, O. and Gnusov, Y. (2023), "Devising a method for balancing the load on a territorially distributed foggy environment", *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1(4 (121), pp. 48–55. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.274177>.
6. Chen, J., Wang, Y. and Liu, T. (2021), "A proactive resource allocation method based on adaptive prediction of resource requests in cloud computing", *J. Wireless Com Network*, 24, doi: <https://doi.org/10.1186/s13638-021-01912-8>.
7. Petrovska, I. and Kuchuk, H. (2022), "Static allocation method in a cloud environment with a service model IAAS", *Advanced Information Systems*, vol. 6, is. 3, pp. 99–106. doi: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2022.3.13>.
8. Kuchuk, N., Shefer, O., Cherneva, G. and Alnaeri, F.A. (2021), "Determining the capacity of the self-healing network segment", *Advanced Information Systems*, vol. 5, no. 2, pp. 114–119, Jun. 2021, doi: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2021.2.16>.
9. Petrovska, I. and Kuchuk H. (2022), "Features of the distribution of computing resources in cloud systems", *Control, Navigation and Communication Systems*, No. 2, pp. 75-78, doi: <http://dx.doi.org/10.26906/SUNZ.2022.2.075>.
10. Nechausov, A., Mamusuč, I. and Kuchuk, N. (2017), "Synthesis of the air pollution level control system on the basis of hyperconvergent infrastructures", *Advanced Information Systems*, vol. 1, no. 2, pp. 21–26, doi: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2017.2.04>.
11. Wang, J., Bewong, M. & Zheng, L. (2024), "SD-WAN: Hybrid Edge Cloud Network between Multi-site SDDC", *Computer Networks*, 250, Article number 110509, doi: <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2024.110509>

Received (Надійшла) 16.10.2025

Accepted for publication (Прийнята до друку) 14.01.2026

Publication date (Дата публікації) 27.02.2026

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

Пироженко Сергій Станіславович – аспірант кафедри електронних обчислювальних машин, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна;

Serhii Pyrozhenko – PhD candidate of Department of Electronic Computers, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine;

e-mail: serhii.pyrozhenko@nure.ua; ORCID Author ID: <http://orcid.org/0009-0006-4209-2144>;

Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=59675302400&origin=resultlist>.

Гук Артем Сергійович – старший викладач кафедри електронних обчислювальних машин, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна;

Artem Guk – senior lecturer of Department of Electronic Computers, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine;

e-mail: Viacheslav.Radchenko@nure.ua; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0009-0004-2011-1901>.

Методи та алгоритми міграції віртуальних машин

Serhii Pyrozhenko, Artem Guk

Abstract. Relevance of the study. In real operating conditions, data centers are formed on the basis of heterogeneous hardware platforms, networking solutions, and software environments, which leads to the emergence of heterogeneous computing infrastructures. Such heterogeneity complicates resource management processes, load balancing, and the provision of a specified level of service quality. **The object of the study** is the data processing process in a heterogeneous virtualized data center as a complex multi-component computing system that integrates diverse hardware, software, and network resources into a unified infrastructure. **The subject of the study** comprises methods and tools for simulation modeling of the functioning processes of a heterogeneous virtualized data center, in particular models of interaction among heterogeneous resources, mechanisms of their virtualization, and load distribution algorithms. **The purpose of the study** is to design and investigate the structure of a simulation model of a heterogeneous virtualized data center that makes it possible to analyze the impact of heterogeneity of computing, network, and software resources on system performance, as well as to evaluate performance, scalability, and resource management characteristics under virtualization conditions. **Research results.** In the course of the work, the structure of a simulation model of a heterogeneous virtualized data center was developed, taking into account the heterogeneity of hardware and software resources; the choice of a simulation environment for studying the functioning processes of the heterogeneous virtualized data center was substantiated; a simulation model was implemented that allows investigation of the impact of resource heterogeneity on the performance and efficiency of the virtualized infrastructure; quantitative and qualitative indicators of the functioning of the heterogeneous virtualized data center under various load scenarios were obtained; the modeling results were analyzed and recommendations were formulated to improve the efficiency of managing heterogeneous resources. **Further research** will be aimed at extending the simulation model to account for energy consumption and energy efficiency of heterogeneous resources.

Keywords: data center, heterogeneity, virtualization, multi-component system, simulation model.