

ВІДГУК

офіційного опонента

**доктора технічних наук, професора Єременко Олександри Сергіївни
на дисертаційну роботу Касереса Антона
«Комплексний підхід проєктування обчислювальної інфраструктури у
гетерогенному мультихмарному середовищі»,
представлену на здобуття наукового ступеня доктора філософії
за спеціальністю 172 – Телекомунікації та радіотехніка,
галузь знань 17 – Електроніка та телекомунікації**

Актуальність теми роботи

Ускладнення обчислювальних систем і зростання вимог до оброблення великих масивів даних призводить до необхідності в ефективній організації мультихмарних середовищ, які поєднують ресурси різних провайдерів для забезпечення гнучкості, масштабованості та стійкості до відмов. Проте, гетерогенність таких середовищ створює складнощі у забезпеченні сумісності сервісів, динамічному розподілі навантаження, інтеграції обчислювальних ресурсів і підтримці стабільного рівня продуктивності. Зростаюча складність архітектурних рішень вимагає нових підходів до автоматизації процесів проєктування мультихмарної інфраструктури, що здатні враховувати мінливі умови роботи та вимоги до продуктивності, безпеки, надійності та економічної ефективності.

Науковий і практичний інтерес до цієї проблематики обумовлений необхідністю розробки нових моделей і методів ефективної інтеграції хмарних платформ для створення адаптивної та високопродуктивної інфраструктури. Водночас використання методів машинного навчання, багатокритеріальної оптимізації та багаторівневої взаємодії агентів відкриває нові можливості для підвищення рівня автоматизації та оптимізації використання ресурсів у гетерогенних мультихмарних середовищах.

Виходячи з цього, є актуальною проблематика дисертаційної роботи Касереса Антона, яка присвячена розв'язанню науково-практичної задачі підвищення рівня автоматизації проєктування та переналаштування віртуальної мультихмарної платформи шляхом розробки комплексного методу формування обчислювальної інфраструктури у гетерогенному мультихмарному середовищі.

Актуальність теми дисертації також підкріплена впровадженням отриманих дисертантом результатів у держбюджетних темах і міжнародному проєкті, а саме:

- 2218п «Гетерогенна мережа збору, передачі та обробки інформації для системи розподіленої генерації MicroGrid» (номер державної реєстрації 0119U001184);
- 2313п «Побудова інформаційно-аналітичної платформи для супроводження функціонування кіберфізичних систем» (номер державної реєстрації 0120U102298);

- «IDEA-East-Hub: International Innovation Hub for Data Science and renewable Energy», DAAD Program – HAW International Modul за співпрацею НТУУ «КПІ ім. І. Сікорського» та Анхальтським університетом прикладних наук Кьотен, Німеччина (номер договору 57603761);

які виконувались на кафедрі інформаційно-комунікаційних технологій та систем Навчально-наукового Інституту телекомунікаційних систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

Оцінка змісту дисертації, її завершеності в цілому й оформлення

Дисертація складається з п'яти розділів, в яких викладено отримані наукові результати. Структура дисертаційної роботи логічна та послідовна. Актуальність дисертації обґрунтована та повністю відповідає проблематиці сучасного стану досліджень в області проєктування високопродуктивних обчислювальних інфраструктур у гетерогенному мультимарному середовищі

У *вступі* подано загальну характеристику дисертаційної роботи, обґрунтовано всі процедурні положення, актуальність теми дисертації, показана її наукова і практична цінність, сформульовані мета і задачі дослідження, які необхідно вирішити для її досягнення, описано зв'язок дисертації з науковими планами та темами, приведена апробація дисертаційної роботи та публікації.

В *першому розділі* проведено аналіз проблем і сучасних підходів до проєктування обчислювальної інфраструктури у гетерогенних мультимарних середовищах. Розглянуто особливості обчислювального навантаження, вимоги до ефективного функціонування мультимарних систем і специфіку їхньої взаємодії. Проаналізовано переваги та обмеження існуючих рішень, а також визначено чинники, що впливають на сумісність обчислень у мультимарних середовищах і формують вимоги до подальшої оптимізації архітектурних рішень.

У *другому розділі* роботи формалізовано процес взаємодії обчислювальних ресурсів у гетерогенному мультимарному середовищі. Визначено критерії оцінювання ефективності мультимарної взаємодії, побудовано математичну модель мультимарного середовища та сформульовано цільові функції оптимізації. Розглянуто обмеження, що накладаються на параметри взаємодії, виконано класифікацію рішень побудови мультимарної інфраструктури та формалізовано критерії сумісності сервісів різних провайдерів. Запропоновано інтегрований показник оцінки ефективності архітектурних рішень і спосіб нормалізації компонентів моделі для забезпечення порівнянності критеріїв. Розроблено стохастичну модель динамічної адаптації вагових коефіцієнтів і метод багатокритеріальної оптимізації для підвищення ефективності проєктування мультимарної інфраструктури. Визначено стратегію взаємодії сервісів при побудові мультимарної архітектури.

В *третьому розділі* розроблено методологію проєктування архітектури

обчислювальної інфраструктури у гетерогенному мультимарному середовищі. Сформульовано постановку задачі та математичну модель вибору архітектури для мультимарного розподілу обчислювальних задач. Запропоновано формальну модель динамічної адаптації інфраструктури, описано структуру та взаємодію основних компонентів мультимарної системи. Розроблено метод багатокритеріального аналізу для автоматизованого вибору оптимального мультимарного інструментарію з використанням моделі аналізу ієрархій та онтологічного підходу. Крім того, представлено моделі машинного навчання та LLM, а також побудовано мультиагентну систему на їх основі для підтримки процесів прийняття рішень у мультимарному середовищі.

У *четвертому розділі* розроблено комплексний метод динамічного формування обчислювальної інфраструктури у мультимарному середовищі. Запропоновано гібридну структуру проєктування мультимарної інфраструктури, сформульовано математичну модель інтегрованого показника ефективності виконання обчислювальних завдань, а також формалізовано простір станів і дій для процесу проєктування. Визначено функції винагороди на основі багатокритеріальної оптимізації та розроблено механізми адаптації та навчання системи. Запропоновано архітектуру мультиагентної системи підтримки прийняття рішень, алгоритм оптимізації архітектури мультимарної інфраструктури та модель динамічної адаптації до змін параметрів середовища. Крім того, реалізовано побудову агентів на основі LLM і описано сценарії використання мультиагентної системи в процесі формування обчислювальної інфраструктури.

У *п'ятому розділі* представлено результати експериментальних досліджень запропонованого підходу та його практичну реалізацію. Розроблено прототип інтелектуальної системи для проєктування мультимарної інфраструктури, описано архітектуру, компоненти програмної реалізації та інтеграцію методів машинного навчання й LLM. Визначено умови експерименту, обґрунтовано вибір метрик оцінювання та наведено опис тестового середовища і сценаріїв перевірки ефективності. Проведено апробацію системи в промисловому середовищі, отримано результати практичного впровадження та здійснено порівняльний аналіз з альтернативними підходами. Виконано узагальнення експериментальних результатів, а також визначено наявні обмеження та подано рекомендації щодо подальшого вдосконалення та масштабування системи.

Висновки дисертаційної роботи підкреслюють наукову новизну та практичну цінність проведених досліджень. Аналіз публікацій, апробацій та акту впровадження свідчить про повноту викладу в дисертаційній роботі отриманих наукових результатів.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертаційній роботі Касереса А.,

впливають з достовірності отриманих дисертантом результатів, засвідчених відповідним актом впровадження, обговоренням матеріалів дисертації на міжнародній науково-технічній і семи практичних конференціях, а також наукових семінарах, де отримали схвальну оцінку. Адекватність запропонованих рішень та оцінка їхньої ефективності підтверджені результатами експериментального дослідження запропонованого підходу з реалізацією прототипу інтелектуальної системи для проектування мультихмарної інфраструктури, загальна архітектура якої складається з п'яти рівнів, а саме інтерфейсного, рівня агентів, аналітичного, інтеграційного та рівня зберігання даних.

Впровадження системи автоматизованого проектування мультихмарної платформи в промисловому середовищі та експериментальні дослідження на типових сценаріях розгортання вебзастосунків з REST API та ETL-систем для обробки даних довели ефективність розробленого підходу та продемонстрували зниження вартості, підвищення продуктивності та покращення масштабованості порівняно з традиційними підходами.

Достовірність і новизна наукових положень, висновків і рекомендацій

У дисертаційній роботі Касереса А. отримано такі наукові результати:

- *вперше запропоновано* комплексний метод формування обчислювальної інфраструктури у гетерогенному мультихмарному середовищі на основі інтегрованого показника ефективності обчислювальних завдань для визначення розташування і типу сервісів хмарних провайдерів з використанням навчання з підкріпленням та еволюційних алгоритмів, що дозволив підвищити продуктивність і захищеність, а також знизити витрати виконання обчислювальних завдань;
- *запропоновано* математичну модель мультихмарної взаємодії обчислювальних сервісів з урахуванням динаміки змін вимог користувачів і характеристик хмарних ресурсів, що дозволила автоматизувати переналаштування мультихмарної платформи;
- *запропоновано* метод визначення інтегрованого показника ефективності виконання обчислювальних завдань з урахуванням динаміки зміни стану інфраструктури мультихмарного середовища і вимог користувачів, що дозволив автоматизувати проектування та переналаштування мультихмарної платформи;
- *запропоновано* метод визначення складових інтегрованого показника ефективності обчислювальних завдань у динамічно змінюваному мультихмарному середовищі на основі LLM, що дозволив враховувати ступінь впливу кожного критерія та підвищити достовірність і об'єктивність прийняття рішень.

Практична значимість результатів роботи

Отримані в дисертаційній роботі Касереса А. наукові результати мають практичну цінність у зв'язку з тим, що можуть бути використані під час створення нових і вдосконалення існуючих підходів до проектування обчислювальної інфраструктури у гетерогенному мультимарному середовищі. Впровадження запропонованої системи автоматизованого проектування мультимарної платформи в промисловому середовищі дозволило знизити загальні витрати на 47,5%, а також підвищити рівень продуктивності на 25,2% і масштабованості на 31,8% порівняно з традиційними підходами.

Важливість для практики результатів дисертаційної роботи підтверджена актом їхнього впровадження в компанії «Continental Automotive Technologies GmbH». Розроблений комплексний метод оптимізації обчислювальної інфраструктури в гетерогенному мультимарному середовищі застосовано під час удосконалення платформи PRIME-MES для керування даними. Відповідні сценарії використання охоплювали оптимізацію хмарної інфраструктури, контроль вартості зберігання даних у data lake та розподіл обчислювальних навантажень. Запропонований підхід підтримував архітектурні рішення та стратегії динамічного розподілу ресурсів, спрямовані на підвищення продуктивності, стійкості та ефективності хмарних операцій. Метод забезпечив зниження вартості зберігання даних більш ніж на 30% і підвищення продуктивності обробки ETL-процесів до п'яти разів завдяки покращеному паралелізму виконання.

Повнота викладу основних результатів дисертації у фахових виданнях

Проведений аналіз показав, що здобувач має необхідний обсяг наукових публікацій та апробацій. Результати дисертаційної роботи висвітлено у 5 наукових працях, серед них 2 статті у наукових фахових виданнях України категорії А, що індексуються наукометричними базами Scopus і Web of Science, та 2 статті у наукових фахових виданнях України категорії Б. Дисертант доповідався на міжнародній конференції, що проходила під егідою IEEE, та семи практичних конференціях.

Опубліковані матеріали відповідають вимогам пункту 8 Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії, затвердженого Постановою КМУ від 12.01.2022 р. №44.

Академічна доброчесність

Порушень академічної доброчесності в дисертації та наукових публікаціях, в яких висвітлені основні наукові результати дисертації, не виявлено.

Усі результати, які винесено автором на захист, отримані самостійно і містяться в опублікованих працях. У роботах, опублікованих у співавторстві, використані тільки ті ідеї, положення та розрахунки, які є результатом особистих наукових пошуків.

Зауваження та недоліки

1. У першому розділі під час аналізу переваг та обмежень рішень щодо мультихмарної взаємодії недостатньо розкрито аспекти забезпечення безпеки, стійкості та надійності функціонування систем (підрозділи 1.3, 1.4), що обмежує повноту оцінки підходів до проєктування мультихмарних середовищ.

2. У другому розділі (підрозділ 2.1) подано визначення надійності та її символічне позначення. Водночас відсутнє чітке обґрунтування вибору метрик для кількісної оцінки цього показника та способу його нормалізації (підрозділ 2.3). У подальших розділах надійність використовується у формулах, зокрема, (2.3), (4.10), проте не наведено єдиного узагальненого виразу або моделі для її розрахунку, що ускладнює відтворення результатів. Крім того, позначення R застосовується в різних контекстах (на рівні завдання, системи та конфігурації), що може створювати неоднозначність інтерпретації цього параметра.

3. У дисертаційній роботі безпека розглядається як один із критеріїв ефективності мультихмарної взаємодії. В підрозділі 2.6 визначено для кількісної оцінки ефективності різних підходів до мультихмарної інтеграції комплексний показник (2.15), проте недостатньо деталізовано методику кількісного оцінювання метрики безпеки. Визначення безпеки (підрозділ 2.1) носить описовий характер і не містить чітких формалізованих залежностей між складовими безпеки та інтегральними показниками, вирази (2.15), (2.21), (4.1). Крім того, недостатньо висвітлено принципи вибору вагових коефіцієнтів у цих показниках, що ускладнює їх практичне застосування.

4. В третьому розділі дисертаційної роботи (п. 3.4.2) при побудові моделі АНР результати експериментів, представлені в таблицях 3.2 та 3.3, потребують додаткового пояснення та аналізу отриманих результатів.

5. У п'ятому розділі при узагальненні результатів експериментального дослідження (п. 5.5.1, таблиці 5.1, 5.2) недостатньо уваги приділено сценаріям 3 та 4.

Проте, вказані недоліки не впливають на загальну позитивну оцінку виконаної роботи. Дисертаційні дослідження є актуальними, мають наукову цінність та практичну значущість.

Загальний висновок

Дисертаційна робота Касереса Антона «Комплексний підхід проєктування обчислювальної інфраструктури у гетерогенному мультихмарному середовищі» є завершеною науково-дослідною роботою, яка розв'язує важливу науково-практичну задачу підвищення рівня автоматизації проєктування та переналаштування віртуальної мультихмарної платформи

шляхом розробки комплексного методу формування обчислювальної інфраструктури у гетерогенному мультимедійному середовищі. За своєю формою, об'ємом і змістом робота відповідає вимогам до дисертацій на здобуття наукового ступеня доктора філософії, а саме вимогам пунктів 6, 7, 8 і 9 Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії, затвердженого Постановою КМУ від 12.01.2022 р. №44.

Загалом здобувач Касерес Антон за рівнем своєї підготовки та кваліфікації заслуговує присудження наукового ступеня доктора філософії в галузі знань 17 – Електроніка та телекомунікації за спеціальністю 172 – Телекомунікації та радіотехніка.

Офіційний опонент:

професор кафедри інфокомунікаційної
інженерії імені В. В. Поповського
Харківського національного університету
радіоелектроніки,
доктор технічних наук, професор



Олександра ЄРЕМЕНКО

Учений секретар

Харківського національного університету
радіоелектроніки
кандидат технічних наук, доцент




Ірина ЖАРІКОВА