Голові
разової спеціалізованої вченої ради
Національного університету
«Київський авіаційний інститут»
просп. Любомира Гузара, 1, м. Київ

ВІДГУК

офіційного опонента, доктора технічних наук (спеціальність 05.12.02 – Телекомунікаційні системи та мережі), професора кафедри інфокомунікаційної інженерії ім. В.В. Поповського Харківського національного університету радіоелектроніки **Євдокименко Марини Олександрівни** на дисертацію **Чижова Олександра Вікторовича** «Інформаційна технологія оптимізації використання обчислювальних ресурсів у хмарних кластерах для динамічного хостингу веб-сервісів», яка подана на здобуття наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 12 – Інформаційні технології за спеціальністю 122 – Комп'ютерні науки.

Актуальність теми дисертації

Розвиток хмарних технологій та зростання масштабів використання динамічних вебсервісів зумовлюють необхідність підвищення ефективності використання обчислювальних ресурсів за одночасного забезпечення встановлених показників якості обслуговування. Особливої актуальності ця проблема набуває для систем масового багатодоменного вебхостингу, які характеризуються стохастичним характером трафіку, нерівномірністю розподілу навантаження між доменами та значними короткочасними змінами інтенсивності запитів. За таких умов надмірне резервування ресурсів призводить до зниження ефективності їх використання, тоді як недостатня ємність кластера створює ризик погіршення швидкодії та порушення встановлених вимог SLA.

Існуючі механізми масштабування хмарної інфраструктури значною мірою ґрунтуються на контролі поточних показників завантаження окремих обчислювальних ресурсів. Проте для динамічного багатодоменного середовища такий підхід не повною мірою враховує стохастичну природу вхідного навантаження, імовірнісний характер виникнення ресурсного дефіциту та необхідність забезпечення заданого рівня обслуговування. Це зумовлює потребу

в розвитку моделей і методів, які дозволяють формалізувати взаємозв'язок між параметрами вхідного потоку, доступними обчислювальними ресурсами та показниками якості обслуговування.

Окремого значення набуває забезпечення стійкості процесів адаптивного масштабування та можливості застосування механізмів прикладного захисту без суттєвого впливу на основний тракт оброблення легітимних запитів. Таким чином, виникає комплексне науково-прикладне завдання оптимізації використання обчислювальних ресурсів хмарного кластера, яке поєднує планування його необхідної ємності, адаптивне керування ресурсами, забезпечення вимог SLA та врахування впливу механізмів прикладного захисту.

Отже, тема дисертації є актуальною, оскільки спрямована на розв'язання важливого науково-прикладного завдання формалізованого планування та адаптивного керування ресурсами хмарного кластера за стохастичного навантаження. Одержані результати створюють підґрунтя для підвищення щільності консолідації без погіршення якості обслуговування вебсервісів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Тематика дисертаційної роботи Чижова Олександра Вікторовича відповідає науковому напряму кафедри комп'ютерних інформаційних технологій Національного університету «Київський авіаційний інститут» у частині дослідження хмарних обчислень, інформаційно-комунікаційних систем та методів оптимізації використання обчислювальних ресурсів.

Спрямованість дисертаційного дослідження узгоджується з пріоритетними тематичними напрямами наукових досліджень і науково-технічних розробок, затвердженими постановою Кабінету Міністрів України від 30 квітня 2024 р. № 476, зокрема за напрямами «Інформаційні та комунікаційні технології», «Технологічні засоби та сервіси програмного інжинірингу», «Інформаційно-комунікаційні системи та мережі», «Суперкомп'ютерні комплекси. Моделювання та розв'язання надскладних задач. Хмарні обчислення».

Таким чином, дисертаційна робота за своєю тематичною спрямованістю

відповідає актуальним пріоритетам наукових досліджень у галузі інформаційних технологій та предметній області спеціальності 122 «Комп’ютерні науки»..

Наукова новизна одержаних результатів

Проведений аналіз дисертаційної роботи Чижова Олександра Вікторовича засвідчує, що автором отримано сукупність взаємопов’язаних наукових результатів у сфері керування ресурсами хмарних кластерів, призначених для динамічного хостингу значної кількості вебсервісів. Науковий доробок здобувача спрямований на узгоджене розв’язання завдань планування ємності, адаптивного масштабування, консолідації ресурсів і забезпечення прикладного захисту за умови дотримання встановлених показників SLA.

До основних положень наукової новизни дисертації належать такі:

1. Уперше розроблено математичну модель адаптивного керування ємністю хмарного кластера масового вебхостингу, яка, на відміну від підходів статичного резервування, подає інфраструктуру як єдиний пул обчислювальних ресурсів та враховує оперативну пам’ять як критично обмежувальний ресурс. Використання втратної моделі Ерланга B для формалізації вимог SLA через допустиму ймовірність відмови в обслуговуванні дає змогу визначати мінімально достатню ємність кластера за стохастичного багатодоменного навантаження.

2. Уперше розроблено математичну модель асинхронного контуру прикладного захисту, яка, на відміну від синхронних схем інспекції трафіку, передбачає винесення поглибленого аналізу HTTP/HTTPS-запитів за межі критичного тракту їх обслуговування та подання підсистеми аналізу як багатоканальної системи з обмеженою чергою. Це дає змогу формалізувати процес відкладеної верифікації та умови своєчасного реагування на прикладні атаки зі збереженням швидкодії оброблення легітимного трафіку.

3. Удосконалено метод визначення необхідної конфігурації хмарного кластера та керування його масштабуванням, який відрізняється використанням чисельно стійкого рекурентного обчислення ймовірності блокування,

ітеративного визначення мінімально достатньої ємності та застосуванням порогового і часового гістерезису. Це забезпечує розмежування короткочасних флуктуацій і стійких змін навантаження та зменшує ризик автоколивань у контурі керування масштабуванням.

4. Набув подальшого розвитку метод оцінювання ресурсної ефективності консолідації в системах масового вебхостингу, який, на відміну від локального оцінювання завантаження окремих обчислювальних вузлів, ґрунтується на інтегральному порівнянні витрат ресурсів у часі для традиційної статично фрагментованої архітектури та адаптивного хмарного кластера. Це дає змогу кількісно оцінювати ефект спільного резервування та статистичного мультиплексування навантаження й обґрунтовувати доцільність застосування кластерної моделі за умови дотримання вимог SLA.

Наукові положення не є ізольованими результатами, а утворюють узгоджену основу розробленої інформаційної технології. Їхню достовірність підтверджують теоретичне обґрунтування, обчислювальні експерименти, створення програмного прототипу та результати випробувань у сценаріях, наближених до умов функціонування систем масового вебхостингу.

Практична цінність та впровадження отриманих результатів

Практична цінність результатів дисертаційної роботи Чижова Олександра Вікторовича полягає у можливості їх використання під час проєктування та модернізації хмарної інфраструктури динамічного вебхостингу, зокрема для визначення мінімально достатньої конфігурації кластера, побудови систем адаптивного масштабування та оцінювання ефективності консолідації обчислювальних ресурсів за умови дотримання встановлених вимог SLA.

Практичне значення має також запропонований підхід до організації асинхронного контуру прикладного захисту, який передбачає винесення ресурсоємного аналізу HTTP/HTTPS-запитів за межі критичного тракту їх оброблення та дає змогу поєднати вимоги до захищеності й швидкодії вебсервісів.

Результати дисертаційного дослідження використано в ТОВ «АксонСофт» під час аудиту ефективності використання серверного парку підприємства, а також в освітньому процесі Національного університету «Київський авіаційний інститут» під час викладання дисциплін «Хмарні технології» та «Адміністрування комп'ютерних систем та мереж». Факт практичного використання результатів підтверджено відповідними документами, наведеними в додатку 8 дисертації.

Наведене свідчить про практичну значущість одержаних результатів та можливість їх використання для розв'язання прикладних завдань планування, масштабування й підвищення ефективності функціонування хмарної інфраструктури.

Достовірність і обґрунтованість наукових положень, висновків і рекомендацій, які сформульовано та висвітлено в дисертації

Достовірність і обґрунтованість наукових положень, висновків та рекомендацій дисертаційної роботи Чижова Олександра Вікторовича забезпечуються послідовною логікою дослідження, коректним застосуванням математичного апарату та експериментальною перевіркою одержаних результатів.

Теоретичне обґрунтування базується на використанні методів теорії масового обслуговування, втратних моделей Ерланга, теорії ймовірностей, статистичного, системного та архітектурного аналізу. Запропоновані моделі встановлюють взаємозв'язок між параметрами вхідного навантаження, характеристиками обслуговування, ресурсними обмеженнями хмарного кластера та допустимою ймовірністю відмови в обслуговуванні. Для визначення мінімально достатньої конфігурації кластера використано чисельно стійку рекурентну процедуру розрахунку ймовірності блокування.

Основні складові запропонованої інформаційної технології реалізовано у вигляді дослідницького програмного прототипу. Експериментальну перевірку проведено на спеціально сформованому стенді з контрольованою

генерацією навантаження, що забезпечило можливість відтворюваного дослідження масштабованості, ресурсної ефективності та стійкості системи до атак прикладного рівня. Окремо виконано верифікацію програмної реалізації алгоритмів згладжування телеметрії та розрахунку необхідної ємності кластера шляхом зіставлення отриманих значень із теоретичними розрахунками.

Узгодженість результатів математичного моделювання, функціонування програмного прототипу та даних експериментальних досліджень дає підстави вважати сформульовані в дисертації наукові положення та висновки достатньо обґрунтованими і достовірними. Основні результати дослідження пройшли апробацію на наукових конференціях та відображені у публікаціях здобувача.

Аналіз змісту, структури та обсягу роботи

Загальний обсяг дисертаційної роботи Чижова Олександра Вікторовича становить 227 сторінок, з яких 162 сторінки припадають на основний текст. Дисертація містить 31 рисунок, 15 таблиць і 8 додатків. Список використаних джерел охоплює 114 найменувань. Структура роботи включає анотації українською та англійською мовами, список публікацій здобувача, вступ, чотири змістовно взаємопов’язані розділи, загальні висновки, список використаних джерел і додатки.

У вступі розкрито актуальність оптимізації використання ресурсів хмарних кластерів за стохастичного багатодоменного навантаження, обґрунтовано необхідність поєднання адаптивного масштабування з дотриманням SLA та захистом вебсервісів від атак прикладного рівня. Визначено мету, завдання, об’єкт і предмет дослідження, наведено застосовані методи, сформульовано наукову новизну та практичне значення результатів. Висвітлено особистий внесок автора, апробацію результатів, публікації та структуру дисертації.

Перший розділ присвячено аналізу передумов створення інформаційної технології динамічного хостингу. Автором розглянуто класичний спільний хостинг, кластерні та хмарні архітектури, засоби оркестрації, балансування й

масштабування. Проаналізовано особливості багатодоменного TLS-середовища та загрози доступності на рівні L7. Обґрунтовано, що ефективне використання ресурсів у системах масового вебхостингу потребує керованої консолідації стохастичних навантажень у спільному ресурсному пулі. За підсумками розділу визначено невирішені питання та сформульовано завдання дослідження.

У другому розділі виконано математичну формалізацію процесів планування ємності та адаптивного керування ресурсами. Визначено базову одиницю ресурсу й параметри обчислювального вузла, сформовано цільову функцію та систему обмежень. Розроблено модель визначення необхідної ємності на основі втратної моделі Ерланга, рекурентного обчислення ймовірності блокування та ітеративного пошуку конфігурації. Для запобігання нестійким перемиканням передбачено пороговий і часовий гістерезис. Окремо формалізовано асинхронний контур прикладного захисту як багатоканальну систему з обмеженою чергою та визначено показник ресурсної ефективності консолідації.

У третьому розділі теоретичні положення перетворено на архітектурні рішення, алгоритми та програмні компоненти. Запропоновано stateless-архітектуру з відокремленим шаром даних і централізованою керованою точкою входу. Розроблено засоби обслуговування конкурентних TLS-з’єднань, гарячого оновлення сертифікатів і маршрутів, збору телеметрії, розрахунку ємності та формування команд масштабування. Реалізовано асинхронний контур прикладного захисту і механізм оперативного поширення правил блокування.

Четвертий розділ містить результати експериментальної перевірки розробленої технології. У ньому описано архітектуру програмного комплексу, експериментальний стенд і порядок проведення випробувань. Перевірено роботу балансувальника в багатодоменному TLS-середовищі, програмну реалізацію модуля прогнозування та механізму масштабування, а також вплив резервування на втрати запитів у перехідних режимах. Порівняно статичну та адаптивну кластерну архітектури, досліджено поведінку системи під час HTTP flood-атаки та підтверджено позитивний вплив асинхронного контуру захисту на стійкість

системи.

Загальні висновки відповідають меті та завданням дослідження й узагальнюють основні наукові та практичні результати. Додатки містять фрагменти програмної реалізації, допоміжні сценарії проведення експериментів, профіль навантаження та документи щодо практичного використання результатів. Структура дисертації є логічною, матеріал викладено послідовно, а зміст розділів повною мірою розкриває предмет дослідження.

Мова та стиль викладання результатів

Дисертацію викладено українською мовою у науковому стилі. Автор послідовно переходить від аналізу наявних підходів і формалізації науково-прикладної задачі до розроблення інформаційної технології та експериментального підтвердження отриманих результатів. Текст роботи є структурованим, змістовним і зрозумілим, а використані поняття та позначення загалом застосовуються послідовно.

Повнота викладу основних положень дисертації в опублікованих наукових працях

Основні результати дисертаційної роботи Чижова Олександра Вікторовича оприлюднено у 10 наукових публікаціях. До них належать 2 статті у фахових наукових виданнях України, 2 праці у виданнях, включених до наукометричної бази Scopus, одна з яких опублікована у виданні квартиля Q3, 1 додаткова наукова праця та 5 публікацій у збірниках матеріалів міжнародних конференцій. За результатами розроблення асинхронного способу захисту вебдодатків здобувачем також одержано патент України на корисну модель № 160974 U. Тематика опублікованих праць безпосередньо пов’язана зі змістом дисертації та охоплює її основні складові: обґрунтування доцільності кластерної моделі масового вебхостингу, оптимізацію розподілу навантаження, планування потужностей і консолідацію ресурсів, експериментальне оцінювання балансувальників HTTPS та захист хмарної інфраструктури від атак прикладного рівня. Публікаційна активність здобувача відповідає вимогам Порядку

присудження ступеня доктора філософії, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 року № 44. Аналіз змісту праць підтверджує, що наукові результати дисертації оприлюднено з належною повнотою.

Зауваження та дискусійні положення

1. У підрозділах 2.1–2.2 для визначення мінімально достатньої ємності хмарного кластера використано втратну модель Ерланга B. Водночас доцільно було б чіткіше окреслити межі її застосовності для реального вебтрафіку, який може характеризуватися пакетністю, часовою кореляцією та відхиленням від пуассонівського характеру надходжень.

2. У математичній моделі оперативну пам’ять визначено як критично обмежувальний ресурс. Разом із тим фактична ресурсоємність одного запиту залежить від програмної платформи, архітектури вебзастосунку та характеру навантаження. Доцільно було б доповнити дослідження аналізом чутливості моделі до зміни питомого споживання оперативної пам’яті.

3. Для формалізації вимог SLA у роботі використано безпосередній зв’язок між рівнем доступності та допустимою ймовірністю ресурсного блокування, зокрема для SLA 99,9 % прийнято Pblock=0,001. Доцільно було б чіткіше розмежувати модельну ймовірність ресурсного блокування та комплексний показник виконання SLA, який у практичних системах також залежить від часових, мережевих та інших характеристик.

4. У запропонованому методі керування масштабуванням окремі параметри згладжування та стабілізації, зокрема коефіцієнт EMA, ширина вікна спостереження та параметри гістерезису, задаються емпірично або конфігураційно. Доцільно було б навести методику їх вибору або оцінити вплив цих параметрів на швидкість реакції системи та кількість операцій масштабування.

5. У моделі асинхронного контуру прикладного захисту при досягненні граничної довжини черги передбачено перехід у режим Fail-Open, за якого частина запитів пропускається без поглибленого аналізу. Такий підхід потребує додаткового обґрунтування з погляду компромісу між доступністю та

захищеністю системи в умовах інтенсивного атакувального навантаження.

6. Експериментальну перевірку проведено на контрольованому дослідницькому стенді, що забезпечує відтворюваність результатів. Водночас окремі параметри експериментальної моделі спрощено, зокрема середній час обслуговування запиту прийнято сталим. Доцільно було б додатково перевірити запропоновані моделі за гетерогенного навантаження, характерного для реальних багатодоменних хмарних середовищ.

Наведені зауваження мають дискусійний і рекомендаційний характер, не впливають на достовірність основних результатів дисертаційної роботи та не знижують її наукової і практичної цінності. Вони переважно окреслюють можливі напрями подальшого розвитку запропонованої інформаційної технології.

Висновок

Аналіз змісту дисертаційної роботи Чижова Олександра Вікторовича дає підстави стверджувати, що поставлену мету дослідження досягнуто, визначені завдання виконано, а сформульовані наукові положення належним чином обґрунтовано та підтверджено результатами експериментальних досліджень. Дисертація «Інформаційна технологія оптимізації використання обчислювальних ресурсів у хмарних кластерах для динамічного хостингу веб-сервісів» є цілісною, завершеною та самостійно виконаною науковою працею, у якій отримано нові науково обґрунтовані результати щодо планування ємності, адаптивного масштабування, консолідації ресурсів і асинхронного захисту вебсервісів у хмарних кластерах. Наведені у відгуку зауваження не стосуються принципових положень роботи, мають рекомендаційний характер і не применшують значення одержаних здобувачем наукових та практичних результатів.

За актуальністю теми, рівнем наукової новизни, обґрунтованістю і достовірністю результатів, практичним значенням та повнотою їх оприлюднення дисертаційна робота відповідає вимогам Порядку присудження ступеня доктора філософії, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня

2022 р. № 44, і Вимогам до оформлення дисертації, затвердженим наказом Міністерства освіти і науки України від 12 січня 2017 р. № 40. Автор, Чижов Олександр Вікторович, заслуговує на присудження ступеня доктора філософії за спеціальністю 122 «Комп'ютерні науки».

Офіційний опонент
професор кафедри
інфокомунікаційної інженерії
ім. В.В. Поповського
Харківського національного
університету радіоелектроніки,
доктор технічних наук, професор Марина ЄВДОКИМЕНКО

«23» серпня 2026 року

Підпис професора Євдокименко М.О. засвідчую.
Проректор з наукової роботи
Харківського національного
університету радіоелектроніки
доктор технічних наук, професор Юрій РОМАНЕНКОВ

