ВІДГУК

офіційного опонента кандидата технічних наук, доцента кафедри автоматизації виробничих процесів Центральноукраїнського національного технічного університету **Смірнової Тетяни Віталіївни**

на дисертаційну роботу **Чижова Олександра Вікторовича**

на тему: «Інформаційна технологія оптимізації використання обчислювальних ресурсів у хмарних кластерах для динамічного хостингу веб-сервісів»

подану на здобуття наукового ступеня доктора філософії зі спеціальності

122 Комп'ютерні науки (галузь знань 12 «Інформаційні технології»), Національний університет «Київський авіаційний інститут», Київ, 2026

Актуальність теми дисертації

Сучасний розвиток хмарних технологій супроводжується постійним зростанням кількості вебсервісів та підвищенням вимог до їх доступності, продуктивності й ефективності використання обчислювальних ресурсів. Особливої актуальності ця проблема набуває для систем масового вебхостингу, в яких одночасно обслуговується значна кількість доменів із нерівномірним і стохастичним характером навантаження. За таких умов необхідно, з одного боку, забезпечувати визначені SLA показники якості обслуговування, а з іншого — мінімізувати надлишкове резервування та непродуктивне використання ресурсів хмарної інфраструктури.

Традиційні підходи, що ґрунтуються на статичному розподілі обчислювальних ресурсів або реактивному масштабуванні за окремими показниками завантаження, не повною мірою враховують стохастичну природу багатодоменного трафіку. Це зумовлює необхідність переходу до формалізованого визначення мінімально достатньої ємності хмарного кластера та побудови стабільних механізмів адаптивного керування його конфігурацією. Важливим при цьому є забезпечення балансу між ресурсною ефективністю, дотриманням вимог SLA та стійкістю системи до короткочасних коливань навантаження.

Окремим актуальним аспектом функціонування сучасних вебсервісів є забезпечення їх стійкості до атак прикладного рівня. Застосування ресурсоємних механізмів аналізу HTTP/HTTPS-трафіку безпосередньо у критичному тракті обслуговування запитів може негативно впливати на продуктивність системи. Тому науковий і практичний інтерес становить побудова асинхронного контуру прикладного захисту, який дозволяє здійснювати поглиблений аналіз трафіку

поза критичним шляхом оброблення легітимних запитів.

У дисертаційній роботі Чижова О.В. зазначені питання розглядаються комплексно шляхом поєднання математичного моделювання ємності хмарного кластера, методів адаптивного керування його масштабуванням, оцінювання ефективності консолідації обчислювальних ресурсів та організації асинхронного контуру прикладного захисту.

Таким чином, тема дисертаційної роботи «Інформаційна технологія оптимізації використання обчислювальних ресурсів у хмарних кластерах для динамічного хостингу веб-сервісів» є актуальною, а сформульоване в роботі науково-прикладне завдання має важливе значення для подальшого розвитку методів та інформаційних технологій ефективного керування ресурсами хмарних систем.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Дисертаційну роботу Чижова Олександра Вікторовича виконано в Національному університеті «Київський авіаційний інститут» відповідно до планів науково-дослідної роботи кафедри комп'ютерних інформаційних технологій. Основні результати дослідження висвітлено в наукових статтях і матеріалах міжнародних конференцій, а одне з розроблених прикладних рішень захищено патентом України на корисну модель. Тематика дисертації відповідає пріоритетним тематичним напрямам наукових досліджень і науково-технічних розробок, затвердженим постановою Кабінету Міністрів України від 30 квітня 2024 р. № 476 «Про затвердження переліку пріоритетних тематичних напрямів наукових досліджень і науково-технічних розробок на період до 31 грудня року, наступного після припинення або скасування воєнного стану в Україні». Зокрема, робота безпосередньо пов'язана з напрямами «Інформаційні та комунікаційні технології», «Інформаційно-комунікаційні системи та мережі» та «Суперкомп'ютерні комплекси. Моделювання та розв'язання надскладних задач. Хмарні обчислення». Отже, тема дисертації відповідає державним пріоритетам розвитку інформаційних і хмарних технологій, галузі знань 12 «Інформаційні технології» та спеціальності 122 «Комп'ютерні науки».

Наукова новизна одержаних результатів

Наукова новизна дисертаційної роботи Чижова О.В. полягає у розвитку моделей і методів оптимізації використання обчислювальних ресурсів хмарних кластерів для динамічного хостингу вебсервісів в умовах стохастичного багатодоменного навантаження та заданих вимог SLA. Одержані результати утворюють взаємопов'язану науково-методичну основу розробленої інформаційної технології та охоплюють завдання планування ємності кластера,

адаптивного керування його конфігурацією, оцінювання ресурсної ефективності й організації прикладного захисту.

Основні положення наукової новизни полягають у такому:.

1. Уперше розроблено математичну модель адаптивного керування ємністю хмарного кластера масового вебхостингу, в якій розподілена інфраструктура розглядається як єдиний пул обчислювальних ресурсів, а оперативна пам'ять — як критично обмежувальний ресурс. На основі моделі втрат Ерланга встановлено зв'язок між характеристиками вхідного навантаження, параметрами обслуговування, доступною ємністю та допустимою ймовірністю відмови, що дає можливість формалізувати вимоги SLA та визначати мінімально достатню ємність кластера за стохастичного багатодоменного навантаження.

2. Уперше розроблено математичну модель асинхронного контуру прикладного захисту, в якій процес відкладеного аналізу HTTP/HTTPS-запитів поза критичним шляхом їх обслуговування формалізовано як багатоканальну систему з обмеженою чергою. Це дозволяє визначати умови своєчасного виявлення та блокування джерел шкідливого трафіку й застосовувати ресурсоємні механізми його поглибленого аналізу без істотного збільшення затримки оброблення легітимних запитів.

3. Удосконалено метод визначення необхідної конфігурації хмарного кластера та керування його масштабуванням шляхом використання чисельно стійкої рекурентної процедури визначення ймовірності блокування, ітеративного пошуку мінімально достатньої ємності та застосування порогового і часового гістерезису. На відміну від реактивного масштабування за поточними показниками завантаження, запропонований підхід забезпечує обґрунтоване визначення необхідної конфігурації та підвищує стійкість контуру керування до короткочасних коливань навантаження.

4. Набув подальшого розвитку метод оцінювання ресурсної ефективності консолідації в системах масового вебхостингу, який ґрунтується на інтегральному порівнянні ресурсних витрат фрагментованої серверної архітектури та динамічного хмарного кластера з урахуванням навантажувального профілю та вимог SLA. Це забезпечує кількісне оцінювання ефекту консолідації ресурсів і дає змогу обґрунтовувати доцільність переходу від традиційної моделі спільного хостингу до кластерної архітектури.

Зазначені положення наукової новизни є взаємопов'язаними, відповідають меті та завданням дисертаційного дослідження і формують цілісну наукову основу інформаційної технології оптимізації використання обчислювальних ресурсів у хмарних кластерах. Їхню обґрунтованість підтверджують результати

математичного моделювання, програмної реалізації та експериментальної перевірки запропонованих рішень.

Практична цінність та впровадження отриманих результатів

Практична цінність результатів дисертаційного дослідження Чижова О.В. полягає у можливості безпосереднього використання розроблених моделей, методів та програмних засобів під час проєктування, модернізації й експлуатації інфраструктури масового хмарного вебхостингу. Запропоновані рішення дають змогу визначати мінімально достатню ємність хмарного кластера з урахуванням вимог SLA, здійснювати адаптивне керування його масштабуванням та кількісно оцінювати ефективність консолідації обчислювальних ресурсів.

Практичне значення має також розроблений підхід до організації асинхронного контуру прикладного захисту, який забезпечує можливість поглибленого аналізу HTTP/HTTPS-запитів поза критичним шляхом їх обслуговування, що дозволяє підвищувати стійкість вебсервісів до шкідливого трафіку без істотного погіршення часових характеристик оброблення легітимних запитів.

Практична придатність одержаних результатів підтверджується їх використанням у ТОВ «АксонСофт» під час аудиту поточної ефективності серверного парку компанії. Окремі результати дисертаційного дослідження також впроваджено в освітній процес Національного університету «Київський авіаційний інститут» під час викладання дисциплін «Хмарні технології» та «Адміністрування комп'ютерних систем та мереж». Відповідні документи, що підтверджують практичне використання результатів роботи, наведено в додатках до дисертації.

Таким чином, одержані результати мають прикладну спрямованість і можуть бути використані для підвищення ресурсної ефективності, керованості та стійкості сучасних хмарних інфраструктур динамічного вебхостингу..

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

Достовірність і обґрунтованість наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертаційній роботі Чижова Олександра Вікторовича, забезпечується коректним вибором методологічного апарату, відповідністю застосованих методів поставленим завданням, а також поєднанням теоретичних та експериментальних досліджень. Для формалізації процесів надходження й обслуговування запитів автором використано методи теорії масового обслуговування та втратну модель Ерланга. Стохастичний характер багатодоменного трафіку враховано із застосуванням методів теорії

ймовірностей і статистичного аналізу, а чисельно стійке визначення ймовірності блокування та необхідної ємності кластера забезпечено рекурентною обчислювальною процедурою. Архітектурні рішення щодо побудови кластера без збереження стану, централізованої керованої точки входу та асинхронного контуру прикладного захисту обґрунтовано за допомогою методів системного й архітектурного аналізу.

Теоретичні результати перевірено шляхом створення дослідницького програмного прототипу та проведення серії натурних експериментів у контрольованому багатодоменному середовищі. Експериментально підтверджено правильність визначення мінімально необхідної ємності кластера, коректність роботи механізмів масштабування, доцільність застосування порогового і часового гістерезису, ресурсні переваги консолідації та ефективність асинхронного контуру захисту під час HTTP flood-атак. Узгодженість результатів розрахунків із поведінкою програмного прототипу дає підстави вважати сформульовані наукові положення, висновки та практичні рекомендації достатньо обґрунтованими й достовірними.

Аналіз змісту, структури та обсягу роботи

Дисертаційна робота Чижова Олександра Вікторовича є завершеним науковим дослідженням із логічною та послідовною структурою, що відповідає поставленій меті та завданням. Загальний обсяг дисертації становить 227 сторінок, з яких 162 сторінки основного тексту. Робота містить анотації українською та англійською мовами, вступ, чотири розділи, загальні висновки, список використаних джерел та додатки. Ілюстративний матеріал представлено 31 рисунком і 15 таблицями, список використаних джерел налічує 114 найменувань, додаткова частина містить 8 додатків.

У вступі обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету та завдання дослідження, визначено об'єкт, предмет і методи дослідження, наведено положення наукової новизни, практичне значення одержаних результатів, відомості про їх апробацію та публікації здобувача.

У першому розділі проведено аналіз сучасного стану проблеми організації масового вебхостингу, розглянуто наявні архітектури та підходи до консолідації й оптимізації обчислювальних ресурсів, балансування навантаження, керування TLS у багатодоменному середовищі та забезпечення захисту на прикладному рівні. За результатами аналізу визначено обмеження існуючих рішень та сформульовано науково-прикладне завдання дослідження.

У другому розділі розроблено математичні моделі та методи планування ємності й адаптивного керування ресурсами хмарного кластера. Формалізовано

визначення його мінімально достатньої конфігурації з урахуванням вимог SLA, запропоновано рекурентну процедуру розрахунку ймовірності блокування, механізми стабілізації масштабування, модель асинхронного контуру прикладного захисту та метод оцінювання ресурсної ефективності консолідації.

У третьому розділі представлено архітектурні, алгоритмічні та програмні складові розробленої інформаційної технології. Обґрунтовано архітектуру хмарного кластера, механізми маршрутизації, керування TLS-сертифікатами та динамічного оновлення топології, а також реалізацію модулів телеметрії, визначення необхідної ємності, масштабування та взаємодії з асинхронним контуром захисту.

У четвертому розділі наведено результати експериментальної перевірки розробленої інформаційної технології. Досліджено масштабованість системи в багатодоменному TLS-середовищі, роботу механізмів визначення ємності та масштабування, ресурсну ефективність адаптивної кластерної архітектури, а також стійкість системи до HTTP flood-атак із застосуванням асинхронного контуру прикладного захисту.

У загальних висновках систематизовано основні наукові та практичні результати дослідження, а в додатках наведено матеріали програмної реалізації, експериментального забезпечення та документи, що підтверджують практичне використання отриманих результатів.

Загалом структура дисертації є обґрунтованою, її розділи змістовно взаємопов'язані, а послідовність викладення матеріалу забезпечує логічний перехід від аналізу предметної області та постановки науково-прикладного завдання до розроблення моделей і методів, їх програмної реалізації та експериментального підтвердження.

Мова та стиль викладання результатів

Дисертаційна робота Чижова Олександра Вікторовича написана українською мовою з дотриманням норм наукового стилю. Матеріал викладено послідовно, логічно та аргументовано. Використана термінологія відповідає предметній галузі дослідження, а текстовий виклад належним чином доповнено математичними залежностями, алгоритмами, таблицями й ілюстративними матеріалами.

Повнота викладу основних положень дисертації в опублікованих наукових працях.

За темою дисертаційного дослідження Чижовим Олександром Вікторовичем опубліковано 10 наукових праць, серед яких 2 статті у наукових фахових виданнях України, 2 праці у виданнях, що індексуються міжнародною наукометричною базою Scopus, зокрема одна стаття у виданні квартиля Q3, 1

наукова праця, що додатково відображає результати дослідження, та 5 публікацій у матеріалах міжнародних наукових конференцій. Окремим практичним результатом дослідження є патент України на корисну модель № 160974 U. У наукових працях здобувача висвітлено основні положення дисертації, зокрема результати аналізу архітектур хмарного вебхостингу, методологію оцінювання балансувальників навантаження, метод планування ємності та консолідації ресурсів хмарного кластера, а також принципи забезпечення стійкості вебхостингової інфраструктури до DDoS-атак. Кількість, зміст і рівень опублікування наукових праць відповідають чинним вимогам до висвітлення основних результатів дисертації на здобуття ступеня доктора філософії. Основні наукові положення та результати, винесені на захист, достатньо повно представлені в публікаціях здобувача.

Зауваження та дискусійні положення

Позитивно оцінюючи науковий рівень, обґрунтованість і практичну спрямованість дисертаційної роботи Чижова О.В., слід зазначити окремі положення, які мають дискусійний характер та можуть бути предметом подальшого розвитку дослідження.

1. Потребує додаткового обґрунтування область застосовності математичної моделі асинхронного контуру прикладного захисту. У п. 2.3.3 потік запитів від атакувального джерела описується на основі припущення про його пуассонівський характер. Водночас реальний HTTP flood-трафік може характеризуватися пакетністю, синхронізованістю та зміною інтенсивності в часі. У цьому контексті доцільно було б оцінити чутливість отриманих результатів щодо ймовірності відкладеного відхилення запитів і часу реакції системи до порушення прийнятого припущення про характер вхідного потоку.

2. Доцільним було б розширити експериментальне дослідження параметрів аналітичного контуру захисту. У п. 3.4.3 затримка інференсу ML-Worker моделюється як випадкова величина із середнім значенням близько 45 мс, тоді як експериментальна перевірка в п. 4.7.2 здійснюється для одного профілю такої затримки. Додаткове дослідження різних значень середньої затримки та її варіативності дозволило б повніше визначити вплив продуктивності аналітичного модуля на час виявлення атаки, завантаження черги та загальну стійкість захисного контуру.

3. Окремого уточнення потребує інтерпретація результатів експериментальної перевірки механізму виявлення шкідливого трафіку. У п. 4.7 розмежування легітимного та атакувального трафіку здійснюється за наперед визначеним діапазоном IP-адрес із використанням службового заголовка X-Test-

IP. Така організація експерименту є достатньою для перевірки працездатності асинхронного контуру та оцінювання швидкості застосування рішень про блокування, однак не дає можливості оцінити точність безпосередньої класифікації запитів. На думку опонента, це обмеження експериментальної верифікації доцільно було б чіткіше відобразити при формулюванні та інтерпретації відповідних результатів.

4. Недостатньо повно експериментально досліджено поведінку асинхронного контуру прикладного захисту в умовах відмов його окремих компонентів. У пп. 2.3.2 та 3.4.3 передбачено режим Fail-Open у разі переповнення черги або недоступності ML-Worker, проте у четвертому розділі окремий експеримент для такого режиму не наведено. Доцільно було б дослідити поведінку системи за відмови аналітичного модуля або брокера повідомлень, зокрема оцінити частку втрачених аналітичних подій, збереження працездатності основного тракту обслуговування запитів та тривалість відновлення захисного контуру.

5. Експериментальну оцінку стійкості системи до HTTP flood-атак доцільно було б провести для ширшої множини сценаріїв. У п. 4.7 досліджується атака на один вебресурс за фіксованих рівнів додаткового навантаження від 500 до 2000 RPS. Для повнішого визначення меж застосовності запропонованого методу доцільно було б додатково розглянути сценарії розподіленої атаки на декілька доменів, ротації IP-адрес, а також одночасного надходження запитів від значної кількості низькоінтенсивних джерел.

Наведені зауваження не ставлять під сумнів достовірність основних наукових положень і результатів дисертаційної роботи та не знижують її загальної наукової і практичної цінності. Вони мають переважно дискусійний і рекомендаційний характер, стосуються розширення умов експериментальної перевірки та визначають перспективні напрями подальшого розвитку запропонованої інформаційної технології.

Висновок

На підставі детального аналізу дисертації Чижова Олександра Вікторовича, з огляду на актуальність обраної теми, обґрунтованість положень наукової новизни, теоретичне та практичне значення одержаних результатів, вважаю, що дисертаційна робота «Інформаційна технологія оптимізації використання обчислювальних ресурсів у хмарних кластерах для динамічного хостингу веб-сервісів» є завершеним самостійним науковим дослідженням. У роботі розв'язано актуальну науково-прикладну задачу підвищення ефективності

використання обчислювальних ресурсів хмарних кластерів за стохастичного багатодоменного навантаження з урахуванням вимог SLA та необхідності забезпечення стійкості вебсервісів до атак прикладного рівня.

Висловлені у відгуку зауваження мають переважно дискусійний і рекомендаційний характер, не знижують наукової та практичної цінності отриманих результатів і не впливають на загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи. Дисертація Чижова Олександра Вікторовича відповідає вимогам Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44, а також Вимогам до оформлення дисертації, затвердженим наказом Міністерства освіти і науки України від 12 січня 2017 р. № 40.

Вважаю, що Чижов Олександр Вікторович заслуговує на присудження ступеня доктора філософії за спеціальністю 122 «Комп'ютерні науки».

Офіційний опонент:
старший викладач кафедри автоматизації виробничих процесів
Центральноукраїнського національного технічного університету,
кандидат технічних наук, доцент Тетяна СМІРНОВА

Підпис доцента Смірнової Т.В. засвідчую:
Проректор з наукової роботи та міжнародних зв'язків
Центральноукраїнського національного технічного університету,
кандидат технічних наук, доцент Андрій ТИХИЙ
"28" серпня 2026 року