РЕЦЕНЗІЯ

на дисертаційну роботу

Божухи Даніїлі Ігоровича

на тему «Розроблення методів аналізу та побудови структури хмарних систем», яка представлена на здобуття наукового ступеня доктора філософії в галузі знань 12 Інформаційні технології за спеціальністю 121 Інженерія програмного забезпечення

Актуальність теми дисертації

Дисертаційне дослідження є актуальним через потребу у побудові складних хмарних систем, що поєднують різні рівні обчислень: від кінцевих пристроїв до хмарних центрів. Проблема полягає у відсутності формалізованих моделей взаємодії між рівнями. Автор пропонує чотирирівневу архітектуру та математичні моделі її функціонування. У дисертаційному дослідженні проведено системний аналіз теоретичних і практичних підходів до побудови хмарних систем, розглянуто архітектурні моделі та методи оптимізації багаторівневих структур, описано формалізовані моделі чотирирівневої хмарної архітектури та сценарії її функціонування, приділено увагу питанням балансування навантаження, оцінки ефективності, виявлення «вузьких місць» та розробленню програмних рішень для імітаційного моделювання.

Дисертація є завершеним дослідженням, у якому запропоновано методи побудови хмарних систем, реалізовано програмні рішення для аналізу їх роботи та проведено масштабні експерименти на сотнях тисяч моделей.

Актуальність теми дослідження обумовлена необхідністю формування нових теоретичних і практичних підходів до побудови багаторівневих хмарних систем, здатних забезпечувати високу продуктивність, стійкість та адаптивність при динамічній зміні інтенсивності інформаційних потоків. Зростання вимог до ефективного управління ресурсами, мінімізації затримок обробки даних та підтримання стабільності роботи системи в умовах пікових

навантажень робить розроблення таких підходів особливо актуальним.

Актуальним є розроблення нових методів аналізу та побудови структури багаторівневих хмарних систем, здатних забезпечувати високу продуктивність та стійкість в умовах динамічної зміни інтенсивності інформаційних потоків.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Дисертаційна робота виконувалась у відповідності з індивідуальним планом підготовки аспіранта кафедри інженерії програмного забезпечення та інформаційних технологій Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара. Дослідження за темою дисертації здійснювалися також в рамках науково-дослідних робіт № ФПМ-2-22 «Розроблення програмного забезпечення аналізу та кластеризації часових рядів» 2022-24 рр. № держреєстрації 0122U001465 та № ФПМ-2-25 «Розроблення інформаційної технології обробки статистичних даних» 2025-27рр. номер держреєстрації 0125U002280.

Дисертаційна робота виконана відповідно до поточних і перспективних планів наукової та науково-технічної діяльності Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара, спрямованих на подальший розвиток інженерії програмного забезпечення.

Формулювання наукової задачі, нове вирішення якої одержане в дисертації

Наукова задача роботи полягає у розробленні та формалізації методів побудови багаторівневої хмарної архітектури, здатної ефективно функціонувати за умов динамічної зміни інтенсивності інформаційних потоків, забезпечувати оптимальний розподіл ресурсів між рівнями системи та мінімізувати затримки обробки даних. Наукова задача включає створення математичних моделей чотирирівневої хмарної системи, визначення критеріїв її оптимізації, дослідження стратегій балансування навантаження та розроблення програмних рішень для імітаційного моделювання складних структур. *Об'єктом дослідження* є процеси побудови хмарних систем

автоматизації процесів та взаємодії з комп'ютеризованими пристроями. *Предметом дослідження* є методи побудови архітектурного рішення та алгоритмічного забезпечення хмарних систем автоматизації процесів та взаємодії з комп'ютеризованими пристроями.

Основними задачами дисертаційного дослідження є:

1. Провести аналіз існуючих підходів побудови хмарних систем, моделей та методів їх представлення та управління, інформаційних технологій для їх опису.

2. Дослідити характеристики хмарної системи та побудувати узагальнене архітектурне рішення її IT-інфраструктури.

3. Спроєктувати IT-інфраструктуру хмарної системи із застосуванням підходів управління, методів розміщення ресурсів, споживання послуг та прогнозування навантажень хмарної системи.

4. Розглянути підходи організації роботи систем масового обслуговування та методи побудови складних дискретних систем.

5. Дослідити існуючі (в термінології систем масового обслуговування) умови сталого режиму і перевірки складності структури хмарної системи.

6. Розробити програмне рішення щодо роботи вузлів під час навантаження хмарної системи підходами імітаційного моделювання.

7. Розглянути різні комбінації архітектурних рішень структури хмарної системи.

8. Розробити програмне рішення для побудованої структури хмарної системи.

9. Для навантаження хмарних систем провести аналіз даних з відкритих джерел для проведення імітаційних експериментів та підготувати обрані набори даних для імітаційних експериментів роботи хмарної системи.

10. Провести програмні експерименти та дослідити роботу моделі хмарної системи.

Наукова новизна отриманих автором результатів

Автором отримано низку результатів, що мають ознаки наукової новизни.

Зокрема, вперше розроблено формалізовану модель чотирирівневої хмарної архітектури (DC–EC–FC–CC), яку представлено у вигляді багатофазової стохастичної мережі масового обслуговування. Для оптимізації її роботи запропоновано нові математичні стратегії розвантаження, алгоритми перерозподілу запитів та агентні підходи для підвищення стабільності й прогнозованості системи. Практична цінність результатів підтверджена створенням програмних модулів, призначених для масштабного моделювання достатньо великої кількості варіантів структурних комбінацій.

Основні наукові результати дисертації полягають у наступному.

1. Вперше проведено комплексний аналіз існуючих архітектурних рішень для побудови структур хмарних систем з позиції теорії систем масового обслуговування та подальшого узагальнення на розподілені системи, що дозволило виявити приховані недоліки наявних підходів, зокрема їхню низьку адаптивність до динамічної зміни інтенсивності вхідного потоку заявок та неефективне використання обчислювальних ресурсів при пікових навантаженнях. На основі отриманих результатів було формалізовано критерії оптимізації структурних параметрів хмарних систем, що забезпечує мінімізацію часу затримки обробки даних та підвищує загальну відмовостійкість системи.
2. Вперше розроблено архітектурне рішення побудови хмарної системи з визначеною послідовністю руху запиту/завдання, що відрізняється від існуючих рішень тим, що використовує більшу кількість рівнів (включення парадигм Edge/Fog) представлення зв'язків, яке є масштабованою ієрархією при використанні розподілених ресурсів для ефективної підтримки та розгортання хмарної системи.
3. Вперше запропоновано можливість представлення хмарної системи через чотири рівні з включенням рівнів Edge/Fog та її розгляду, як простого потоку запитів/завдань, що призводить багатофазову систему до стохастичної мережі.
4. Вперше запропоновано підхід щодо проєктування архітектури хмарної системи з визначеною кількістю рівнів, який поєднує в собі умову розміщення

усіх запитів/завдань на ресурсах та швидкодію роботи використаних ресурсів (умови споживання). Зокрема, для чотирирівневої архітектури хмарної системи запропоновано використання перевірки показників ефективності та надійності, як універсальних метрик функціонування системи масового обслуговування.

5. Запропоновано програмне рішення щодо об'єднання існуючої умови сталого режиму та вибору критеріїв структури чотирирівневої хмарної системи для подальшої перебудови на етапі її проєктування, що незначно збільшує обчислювальну складність роботи запропонованих алгоритмів.

6. Визначено три модифікації чотирирівневих хмарних систем з достатньо великою кількістю комбінацій зв'язків між вузлами системи та визначеними правилами перенесення запитів/завдань. Зокрема, наведено ґрунтовне дослідження однієї модифікації чотирирівневої хмарної системи для обмеженого часу [0,T] з припущенням, що визначено правило балансування та швидкість виконання запитів/завдань кожною колекцією вузлів рівнів.

7. Запропоновано визначення двох типів вузлів для побудови структури хмарної системи та розроблено програмне рішення, що надало можливість аналізу їх відокремленого функціонування та виявлення проблемних структур при імітації хмарного сервісу. Зокрема, дослідити "вузькі місця" цих блоків за параметрами надійності та отримати гнучкий інструмент використання розроблених програмних модулів для дослідження поведінки різних структур складної хмарної системи.

8. Вперше сформовано набори різних комбінацій чотирирівневих хмарних систем для проведення імітаційних експериментів роботи хмарної системи. Зокрема, сформовано набори з 810000 та 244140625 комбінацій різних структур хмарної системи в залежності від використаних обчислювальних потужностей, що досить суттєво обмежує використання другого набору для аналізу на безкоштовних сервісах.

9. Розроблено програмне рішення для побудованої структури хмарної системи, що використовує різні її комбінації (зокрема, побудовано 810000

моделей) та надає методи та підходи аналізу її організаційної структури та функціональних зв'язків.

10. Підготовлено набори даних великого обсягу (отримані з відкритих джерел) з зменшеною кількістю параметрів для дослідження різних структур хмарної системи при імітаційному моделюванні їх роботи (зокрема, з 2 наборів у загальній кількості 49/47 параметрів та 2540047/46686579 проведених експериментів відповідно при використанні підходів та технологій підготовки даних машинного навчання – отримано 2 параметри для моделювання двох типів інтервалів).

11. Досліджено вбудовування агента-додатку на рівень хмарної системи, який має математичні локальні та глобальні наслідки при зростанні складності управління на рівні та прогнозованості, що в порівнянні з алгоритмом перерозподілу (всередині вузлів) демонструє різницю між глобальною стратегією та локальною тактикою. Зокрема, запропоновано алгоритм перерозподілу за рахунок виконання умов (п.4 наукової новизни) контролюють стабільність вузлів, а агенти-додатки підтримують баланс між рівнями.

12. Вперше проведено експерименти моделювання чотирирівневої хмарної системи при додаванні розроблених програмних рішень для кожного з запропонованих методів та підходів дисертаційного дослідження, що частково підтвердило гіпотезу про наявність "вузького місця" на першому рівні системи та існування порогу (який приблизно дорівнює 50%) зв'язку між вхідним потоком запитів/завдань та швидкістю обробки. Зокрема, збільшення швидкості обслуговування (μ) спочатку різко покращувало пропускну здатність, але після певного порогу приріст ставав незначним, що вказує на переміщення "вузького місця" до інших компонентів системи.

Практичне значення одержаних результатів

Практична цінність дисертації полягає у створенні програмних рішень для моделювання хмарних систем, методів аналізу їхньої складності та продуктивності, інструментів виявлення «вузьких місць», а також підходів до

оптимізації архітектурних рішень і відповідних наборів даних для імітаційного моделювання. Впровадження розроблених методів дозволяє суттєво підвищити масштабованість хмарних систем, їхню стійкість та відмовостійкість, забезпечити високу продуктивність обробки запитів і загальну ефективність управління ресурсами.

Наукові результати дослідження є внеском у розвиток архітектурних рішень побудови хмарної системи задачі відстеження складності побудови та контролю динаміки навантаження. Дослідження може бути використане як основа для подальших наукових досліджень у галузі управління хмарними системами.

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій, які захищаються

Дисертація виконана на належному науковому рівні та відповідає вимогам досліджень третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти.

Надійність і достовірність отриманих результатів гарантуються використанням коректним застосуванням апробованого математичного апарату (теорії масового обслуговування та методів аналізу), узгодженістю теоретичних положень із результатами імітаційного моделювання, а також масштабними експериментальними дослідженнями, що охопили тестування великої кількості структур на основі реальних наборів даних із відкритих джерел. Зокрема, підтверджено існування «вузького місця» на першому рівні системи та порогу приблизно 50% між інтенсивністю надходження запитів та швидкістю їх обробки.

Особистий внесок здобувача

У дисертаційній роботі здобувачем самостійно виконано аналіз літературних джерел, розроблення алгоритмів, математичних моделей та програмного забезпечення, а також повну обробку й інтерпретацію отриманих результатів. Усі теоретичні положення, моделі, експериментальні дослідження та програмні реалізації є особистим внеском автора. У межах наукових публікацій здобувачем самостійно виділено суттєві характеристики

ієрархічності хмарної структури, побудовано класифікатор проєктування хмарних систем, формалізовано умови розміщення і споживання ресурсів, розроблено допоміжні вузли та імітаційні моделі, створено архітектурне рішення інфраструктури та проведено експериментальні дослідження поведінки хмарної системи.

Божухою Д.І. сформовано цілісний науковий підхід до побудови та аналізу багаторівневих хмарних систем, що охоплює теоретичні, математичні та прикладні аспекти дослідження. Зокрема, сформовано критерії оптимізації структурних параметрів хмарних систем, що забезпечують підвищення їх продуктивності та стійкості; розроблено чотирирівневу архітектуру з включенням рівнів Edge/Fog та визначено формалізовану послідовність руху запитів у системі; запропоновано формалізоване представлення хмарної системи як стохастичної мережі з багатофазовою обробкою; створено підхід проєктування архітектури, який враховує умови розміщення та споживання ресурсів на різних рівнях; розроблено програмні рішення для перебудови структури системи, аналізу її ефективності та оцінки надійності; сформовано великі набори моделей хмарних систем та проведено їх імітаційне моделювання для дослідження поведінки різних структур; підготовлено та оброблено великі набори даних, отримані з відкритих джерел, для моделювання хмарного навантаження та побудови динамічних потоків запитів; досліджено інтеграцію агентів-додатків у хмарну архітектуру; проведено повний цикл експериментів, що підтвердив наявність «вузьких місць» у структурі системи та встановив порогові значення взаємозв'язку між інтенсивністю потоку та швидкістю обробки.

Таким чином, усі ключові результати дисертаційного дослідження отримані дисертантом особисто та становлять його самостійний науковий внесок у розвиток методів побудови та аналізу багаторівневих хмарних систем.

Апробація матеріалів дисертації

Основні положення та результати дисертаційної роботи доповідалися й

обговорювалися на XX та XXIII Міжнародних науково-практичних конференціях «Математичне та програмне забезпечення інтелектуальних систем (MPZIS)» (м. Дніпро, 2022, 2023, 2024, 2025), XXVII Міжнародній конференції «Автоматика-2024» (м. Дніпро, 2024), V Міжнародній науково-практичній інтернет-конференції «Ways of Science Development in Modern Crisis Conditions» (м. Дніпро, 2024), IX Всеукраїнській науково-практичній конференції «Перспективні напрямки сучасної електроніки, інформаційних і комп'ютерних систем (MEICS-2024)» (м. Дніпро, 2024), наукових конференціях за підсумками науково-дослідної роботи Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара (м. Дніпро, 2023, 2024, 2025), Міжнародній науково-практичній інтернет-конференції «Тенденції та перспективи розвитку науки і освіти в умовах глобалізації» (Переяслав, 2023).

Мова і стиль роботи

Матеріал роботи викладений логічно, представлений достатньою мірою і написаний гарною українською мовою з використанням сучасної наукової термінології. Зміст дисертації відповідає вимогам, що висуваються до наукових праць такого рівня, а також вирізняється послідовністю, системністю та обґрунтованістю та висвітлює основні результати наукових досліджень.

Публікації

За темою дисертації опубліковано 12 наукових публікацій, серед яких 4 статті в періодичних наукових журналах і збірниках наукових праць категорії Б та 8 тез доповідей у збірниках матеріалів наукових конференцій.

Структура та обсяг дисертації

Дисертаційна робота викладена на 189 сторінках машинописного тексту, складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, переліку використаних джерел та додатків. Обсяг основного тексту дисертації складає 132 сторінки машинописного тексту. Робота ілюстрована 44 рисунками та 7 таблицями. Список використаних джерел охоплює 117 найменувань.

У *вступі* розкрито актуальність обраного напряму, сформульовано мету і

дослідницькі завдання, а також висвітлено наукову новизну, практичну цінність одержаних результатів, особистий внесок здобувача та дані щодо апробації. Дисертація базується на наукових здобутках автора, отриманих під час виконання дослідницьких робіт на кафедрі інженерії програмного забезпечення та інформаційних технологій ДНУ імені Олеся Гончара.

У *першому розділі* автором розглянуто спеціалізовану літературу та інформаційні технології для визначення актуальності теми дослідження даної дисертаційної роботи. Розглянуто сучасні підходи, архітектурні моделі та проблеми масштабованості хмарних систем.

У *другому розділі* для формалізації моделей автором проведено побудову чотирирівневої моделі, умови розміщення та споживання ресурсів.

У *третьому розділі* для опису балансування навантаження описано визначення математичних стратегій, детальний опис формування траєкторії навантаження.

У четвертому розділі приділена увага програмній реалізації рішень при імітаційному моделюванні хмарної системи, проведено робота з великими наборами даних та проаналізовано продуктивність роботи хмарної системи з різними структурами.

Висновки по роботі чіткі, логічні і витікають із теоретичних та експериментальних даних, отриманих автором.

Додатки містять список публікацій здобувача за темою дисертації, акт впровадження результатів роботи в освітній процес кафедри інженерії програмного забезпечення та інформаційних технологій Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара та частину програмного коду.

Окремі дискусійні питання і зауваження

1. У тексті дисертаційної роботи трапляються терміни, які варто уніфікувати або додатково навести визначення.

2. У першому розділі дисертаційної роботи проведено аналіз існуючих методів оцінювання ефективності хмарних систем та підходів до їх

формалізації. Разом із тим, доцільним було б приділити більше уваги порівняльному аналізу придатності зазначених методів для багаторівневих архітектур, що поєднують вузли різних типів (DC/EC/FC/CC), з урахуванням особливостей розподілу навантаження, механізмів взаємодії між рівнями та вимог до забезпечення відмовостійкості системи.

3. Для запропонованих математичних моделей хмарних систем наведено основні припущення щодо їх функціонування, однак потребують більш детального формулювання структурні та ресурсні обмеження, пов'язані з особливостями взаємодії рівнів архітектури. Наведення прикладів використання таких обмежень для різних умов функціонування хмарних систем дозволило б підвищити практичну цінність запропонованих моделей та розширити можливості їх адаптації до реальних умов експлуатації.

4. У другому розділі дисертаційної роботи запропоновано формалізовану модель чотирирівневої хмарної системи з використанням рівнів Edge/Fog та апарату теорії систем масового обслуговування. Разом із тим, автором не наведено порівняльного аналізу впливу зміни кількості вузлів на кожному рівні архітектури на основні показники продуктивності системи (час очікування, середню довжину черги та коефіцієнт завантаження ресурсів). Наведення відповідних залежностей дозволило б більш повно оцінити масштабованість запропонованого підходу та визначити межі його ефективного застосування.

5. Отримані автором результати щодо існування порогового значення співвідношення між інтенсивністю вхідного потоку запитів та швидкістю їх обробки (близько 50 %) є цікавими з наукової точки зору. Проте в роботі не наведено достатнього обґрунтування щодо збереження зазначеної закономірності при використанні інших моделей надходження запитів, зокрема самоподібних або нерівномірних потоків даних, характерних для сучасних розподілених обчислювальних систем.

6. Запропоновані узагальнені умови аналізу складності хмарних систем та алгоритми дослідження різних конфігурацій багаторівневої архітектури

достатньо повно формалізовані. Разом із тим, у роботі недостатньо висвітлено питання оцінювання обчислювальної складності запропонованих алгоритмів залежно від кількості вузлів та можливих комбінацій структурних елементів системи. Проведення такого аналізу дозволило б більш повно оцінити можливості масштабування запропонованих методів у високонавантажених хмарних середовищах.

7. У дисертаційній роботі основну увагу приділено питанням проєктування архітектури хмарних систем, балансування навантаження та дослідженню їх продуктивності засобами імітаційного моделювання, що дозволило комплексно оцінити ефективність функціонування запропонованих архітектурних рішень. Водночас поза межами детального розгляду залишилися окремі показники якості обслуговування хмарної системи, що може бути реалізовано у подальших наукових дослідженнях автора.

Сформульовані зауваження не принципові та не знижують загальної позитивної оцінки дисертаційного дослідження. Автором отримано вагомі наукові результати, які мають високий рівень новизни, що дає всі підстави вважати подану працю цілісним, актуальним та повністю завершеним науковим дослідженням.

Загальний висновок

Дисертаційна робота Божухи Даніїла Ігоровича на тему «Розроблення методів аналізу та побудови структури хмарних систем» є актуальною за змістом, містить наукову новизну, основні результати та висновки дисертації обґрунтовані, мають теоретичне та практичне значення. Рецензована дисертаційна робота є завершеною науковою працею. Оформлення дисертації відповідає вимогам, затверджених наказом Міністерства освіти і науки України № 40 від 12.01.2017 року. Методичний рівень, наукова новизна і практичне значення, рівень оприлюднення результатів рецензованої роботи відповідає вимогам до дисертацій ступеня доктора філософії згідно з вимогами Постанови Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 року № 44 (зі змінами) «Про затвердження Порядку присудження ступеня доктора філософії

та скасування рішення разової вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», а здобувач Божуха Даніїл Ігорович заслуговує на присудження ступеня доктора філософії в галузі знань 12 Інформаційні технології за спеціальністю 121 Інженерія програмного забезпечення.

Рецензент

завідувачка кафедри кібербезпеки
та комп'ютерно-інтегрованих технологій
фізико-технічного факультету
Дніпровського національного університету
імені Олеся Гончара
кандидат техн. наук, доцент Світлана КЛИМЕНКО

Підпис канд. техн. наук, доцента Клименко С.В. засвідчую

Проректор з наукової роботи
Дніпровського національного університету
імені Олеся Гончара,
кандидат біологічних наук, професор Олег МАРЕНКОВ