

РЕЦЕНЗІЯ

на дисертаційну роботу **Божухи Даніїла Ігоровича**
на тему **«Розроблення методів аналізу та побудови структури
хмарних систем»**,

яка представлена на здобуття наукового ступеня доктора філософії за
спеціальністю 121 Інженерія програмного забезпечення

Актуальність теми дослідження зумовлена стрімким зростанням обсягів даних та навантаження на ІТ-інфраструктуру, що потребує нових підходів до побудови хмарних систем. У роботі порушено проблему недостатньої адаптивності традиційних архітектур до динамічних потоків запитів. Запропонована багаторівнева модель із включенням рівнів Edge/Fog забезпечує гнучке масштабування та підвищення стійкості системи. Необхідність створення концептуально нових підходів до організації хмарного середовища зумовлена потребою мінімізувати ризики нестабільності інфраструктури та забезпечити високу продуктивність за умов мінімальних операційних витрат.

Приділено увагу ключовим теоретичним, методологічним та прикладним аспектам побудови багаторівневих хмарних систем, аналізу архітектурних моделей, формалізації взаємодії між рівнями DC–EC–FC–CC, дослідженню умов розміщення та споживання ресурсів, математичним підходам до оптимізації та балансування навантаження, методам імітаційного моделювання, підготовці великих масивів даних та агентним механізмам підвищення стабільності системи.

Робота є завершеним науковим дослідженням, що включає розроблення нових архітектурних рішень, формалізацію критеріїв оптимізації, моделювання потоків запитів та створення наборів даних для експериментів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертаційна робота виконувалась відповідно до індивідуального плану підготовки аспіранта кафедри інженерії програмного забезпечення та

інформаційних технологій Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара. Дослідження проводилися в рамках науково-дослідних робіт № ФПМ-2-22 (0122U001465) та № ФПМ-2-25 (0125U002280).

Робота узгоджена з поточними та перспективними планами наукової діяльності університету.

Формулювання наукової задачі, нове вирішення якої одержане в дисертації.

Наукова задача дисертаційного дослідження полягає у створенні теоретичних, математичних та прикладних засад побудови багаторівневої хмарної архітектури, здатної забезпечувати ефективне функціонування в умовах динамічної зміни інтенсивності інформаційних потоків. Її вирішення передбачає формалізацію структурної організації чотирирівневої хмарної системи (DC–EC–FC–CC), розроблення математичних моделей взаємодії між рівнями, визначення критеріїв оптимізації розподілу ресурсів, дослідження стратегій балансування навантаження та створення програмних засобів для імітаційного моделювання складних архітектурних конфігурацій.

Сформульована наукова задача охоплює побудову узагальненої моделі хмарної системи як багатофазової стохастичної мережі, розроблення методів оцінювання її ефективності та надійності, а також визначення умов стабільного функціонування при різних сценаріях навантаження. Нове вирішення задачі полягає у поєднанні архітектурних, математичних та програмних підходів, що забезпечують можливість комплексного аналізу, оптимізації та моделювання багаторівневих хмарних систем.

Наукова новизна отриманих автором результатів. Сукупність отриманих в дисертаційному дослідженні результатів вирішує актуальне науково-технічне завдання розроблення методів побудови хмарної системи.

Зазначене наукове завдання має вагомe значення для подальшого розвитку архітектурних підходів до проєктування хмарних систем, орієнтованих на відстеження структурної складності та контроль динаміки навантаження. Отримані результати формують наукове підґрунтя для

вдосконалення методів управління багаторівневими хмарними інфраструктурами та підвищення їх ефективності в умовах змінних потоків даних.

В умовах стрімкого розвитку інформаційних технологій, постійного оновлення програмних рішень та нерівномірної доступності актуальних наукових публікацій, результати проведеного дослідження набувають особливої значущості. Динамічність еволюції хмарних технологій та швидка зміна інструментів їх реалізації зумовлюють потребу у фундаментальних підходах, здатних забезпечити стійкість, узагальненість і практичну придатність отриманих наукових висновків.

В дисертаційному дослідженні отримані наступні основні результати:

1. У роботі виконано аналіз сучасних концепцій і моделей хмарних систем та визначено архітектурне рішення з формалізованою послідовністю проходження запиту/завдання через багаторівневу структуру, що забезпечує узгодженість, масштабованість і керованість системи.
2. Проаналізовано предметну область та визначено особливості проєктування ІТ-інфраструктури хмарної системи з використанням методів розподіленого управління, розміщення ресурсів і прогнозування навантажень. Запропоновано чотирирівневу структуру, що формалізує взаємодію між рівнями як впорядкований потік запитів/завдань.
3. Сформовано підхід до проєктування хмарної архітектури з довільною кількістю рівнів, який інтегрує умови розміщення та споживання ресурсів. Зокрема, для чотирирівневої системи запропоновано використання показників ефективності систем масового обслуговування для оцінювання працездатності.
4. Запропоновано програмне рішення, що поєднує умову сталого режиму та критерії вибору структури чотирирівневої системи.
5. Визначено три модифікації чотирирівневих хмарних систем із великою кількістю комбінацій зв'язків та формалізованими правилами перенесення

запитів/завдань, що забезпечує коректну взаємодію між рівнями за умов змінного навантаження.

6. Сформовано підхід до розроблення програмного рішення для підтримки роботи вузлів хмарної системи в умовах змінного навантаження. Реалізовано імітаційну модель, що відтворює різні сценарії та дає змогу оцінити ефективність роботи вузлів.

7. Розроблено програмне рішення для формування наборів різних комбінацій чотирирівневих хмарних систем.

8. Створено програмне рішення для аналізу побудованої структури хмарної системи та досліджено 810000 її моделей, що забезпечує оцінку функціональних зв'язків.

9. Використано набори UNSW-NB15 і CICIoT2023 для формування наборів даних з меншою кількістю параметрів та розроблено відповідне програмне рішення.

10. Досліджено особливості інтеграції агента-додатку, що впливає на локальні та глобальні механізми управління.

11. Проведено експерименти моделювання чотирирівневої хмарної системи та розроблено програмне рішення, що дає змогу оцінити вплив запропонованих методів, порівняти їх ефективність і визначити оптимальні конфігурації.

Практичне значення одержаних результатів. Практичне значення отриманих результатів полягає в оптимізації архітектурних рішень хмарних систем, контролі їхньої складності й динаміки навантаження, а також в інтеграції розробленого програмного забезпечення в чинні системи управління.

Основні практичні результати роботи:

- для ідентифікації «вузьких місць» розроблено два типи вузлів для структурного аналізу архітектури хмарних систем;

- для імітаційного моделювання створено програмне рішення та сформовано набори даних із різними комбінаціями чотирирівневих хмарних систем для дослідження їхньої ефективності;
- для генерації динамічного навантаження підготовлено набори даних для моделювання потоку запитів на основі часових інтервалів їхнього надходження та заданих законів розподілу;
- для оцінки ефективності розроблено програмний комплекс (мовою Python) для імітаційного моделювання чотирирівневих систем (із врахуванням зв'язків між вузлами, умов розміщення ресурсів і споживання послуг) з обчисленням показників продуктивності та швидкості навантаження;
- результати дослідження та теоретичні наробки впроваджено на кафедрі інженерії програмного забезпечення та інформаційних технологій ДНУ при викладанні дисциплін «Інженерія надійності систем», «Імітаційне моделювання» та «Методи теорії масового обслуговування» для магістрів спеціальності 121 «Інженерія програмного забезпечення», а також при виконанні кваліфікаційних робіт.

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 оптимізації), узгодженістю теоретичних положень із результатами імітаційного моделювання, а також масштабними експериментальними дослідженнями, що охопили тестування понад 810 000 структур на основі реальних наборів даних із відкритих джерел.

Особистий внесок здобувача. Аналіз літературних джерел, розроблення алгоритмів та програмного забезпечення, обробка отриманих результатів здійснені безпосередньо автором. Власний внесок у

опублікованих роботах зазначено на початку дисертаційної роботи, зокрема здобувачеві належить виділення суттєвих характеристик ієрархічності хмарної структури, побудова класифікатора проектування хмарних систем та формалізація умов розміщення і споживання ресурсів, створення допоміжних вузлів та імітаційних моделей, розроблення архітектурного рішення інфраструктури, виконання експериментальних досліджень поведінки системи. Постановка мети і завдань дослідження, а також аналіз і узагальнення отриманих результатів проводились спільно з науковим керівником д.т.н., проф. О.Г. Байбузом.

Апробація матеріалів дисертації. Основні положення та результати дисертаційної роботи були представлені та обговорені на низці міжнародних і всеукраїнських науково-практичних конференцій, зокрема на XX-XXIII конференціях «Математичне та програмне забезпечення інтелектуальних систем (MPZIS)» (Дніпро, 2022–2025), XXVII конференції «Автоматика-2024» (Дніпро, 2024), V міжнародній інтернет-конференції «Ways of Science Development in Modern Crisis Conditions» (Дніпро, 2024), IX конференції «Перспективні напрямки сучасної електроніки, інформаційних і комп'ютерних систем (MEICS-2024)» (Дніпро, 2024), щорічних конференціях за підсумками науково-дослідної роботи ДНУ ім. Олесь Гончар (2023–2025), а також на міжнародній інтернет-конференції «Тенденції та перспективи розвитку науки і освіти в умовах глобалізації» (Переяслав, 2023).

Мова і стиль роботи. Матеріал дисертації викладено в академічному стилі, із дотриманням норм сучасної української наукової мови. Текст характеризується коректним використанням термінології, чіткістю формулювань та узгодженістю структури викладу, що забезпечує повноту й зрозумілість представлення отриманих наукових результатів. Зміст дисертації відповідає встановленим вимогам до наукових праць третього (освітньо-наукового) рівня, характеризується послідовністю викладу, логічною структурою та достатнім обґрунтуванням отриманих результатів. Матеріал подано у відповідності до сучасних стандартів академічної

комунікації та повною мірою відображає основні положення проведеного дослідження.

Публікації. За темою дисертації опубліковано у 12 роботах: 4 статті у наукових фахових виданнях України 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 переліку умовних позначень, 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* обґрунтовані актуальність теми, мета та завдання роботи, наведені наукова новизна, практичне значення, особистий внесок дисертанта та апробація роботи. В основу дисертаційної роботи покладені результати, отримані автором під час виконання наукових досліджень, проведених на кафедрі інженерії програмного забезпечення та інформаційних технологій Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара.

У *першому (теоретичному) розділі* автором розглянуто спеціалізовану літературу та інформаційні технології для визначення актуальності теми дослідження даної дисертаційної роботи. Розглянуто опис архітектур, принципів побудови та проблем сучасних хмарних систем.

У *другому (аналітичному) розділі* автором приділена увага формуванню математичних моделей, методам оптимізації ресурсів та формалізації потоків.

У *третьому (моделювальному) розділі* описано алгоритм розвантаження системи, балансування та приділена увага вибору агентних стратегій.

У *четвертому (експериментальному) розділі* приділена увага можливостям практичного застосування розроблених програмних рішень для побудови структури хмарної системи, розглянуто результати проведених експериментів та проведений аналіз отриманих даних.

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

Окремі дискусійні питання і зауваження.

1. У роботі подано великий обсяг матеріалу, однак окремі частини потребують більш чіткої структуризації, зокрема розмежування теоретичних і практичних аспектів. Це особливо помітно у розділах 1 та 2, де описові фрагменти змішуються з формальними моделями.
2. Парадигми Edge/Fog описані коректно, але недостатньо розкрито їхні обмеження, зокрема проблеми енергоспоживання, нестабільність каналів зв'язку, безпекові ризики на периферійних вузлах, обмеженість обчислювальних ресурсів.
3. В розділі 2 при визначенні моделі чотирирівневої архітектури недостатньо розкрито вплив затримок між рівнями (особливо між ЕС та FC), що може суттєво змінювати поведінку системи.
4. Використання агентів-додатків є новаторським, однак не повністю розкрито ризики їхнього впливу на глобальну стабільність системи (наприклад, можливість конфліктів між агентами, надмірне дублювання рішень, вплив на глобальну стабільність).
5. У четвертому розділі моделювання 810000 та 244140625 структур є вражаючим, але варто було б пояснити критерії відбору структур для глибшого аналізу, оскільки повний аналіз другого набору може бути неможливий через обмеження ресурсів.

Зазначені зауваження не впливають на загальний рівень поданої дисертаційної роботи. Автором досягнуто значних результатів, які мають високу наукову цінність. Це дозволяє оцінити дисертацію як цілісне, завершене та актуальне наукове дослідження.

Загальний висновок

Дисертаційна робота Божухи Данііла 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 Данііл Ігорович заслуговує на присудження ступеня доктора філософії в галузі знань 12 Інформаційні технології за спеціальністю 121 Інженерія програмного забезпечення.

Рецензент

доцент кафедри

інженерії програмного забезпечення та інформаційних технологій

Дніпровського національного університету

імені Олеся Гончара

кандидат техн. наук, доцент



 Марина ІВАНЧЕНКО

Підпис канд. техн. наук, доцента Іванченко М.Г. засвідчую:

Проректор з наукової роботи

Дніпровського національного університету

імені Олеся Гончара

кандидат біологічних наук, професор



Олег МАРЕНКОВ