

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу Божухи Даніїла Ігоровича на тему: **«Розроблення методів аналізу та побудови структури хмарних систем»**, представлену на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 121 Інженерія програмного забезпечення

Актуальність теми дисертаційної роботи. Актуальність роботи визначається потребою у створенні архітектур, здатних ефективно функціонувати під час пікових навантажень. Проблема полягає у неефективному використанні ресурсів та відсутності універсальних методів аналізу складності хмарних систем. Дисертаційне дослідження вирішує це шляхом формалізації багаторівневої структури та розроблення методів балансування навантаження.

Дисертаційна робота Божухи Д. І. присвячена комплексному дослідженню методів побудови, аналізу складності та оптимізації багаторівневих хмарних систем, з особливим акцентом на архітектурні рішення, моделі масового обслуговування, балансування навантаження та програмне моделювання. Дисертаційна робота є завершеним науковим дослідженням, у якому розроблено формалізовану чотирирівневу архітектуру хмарної системи, математичні моделі її функціонування та програмні рішення для імітаційного моделювання. Робота містить повний цикл: від теоретичного аналізу до практичної реалізації.

Зв'язок роботи з науковими програмами та планами. 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

пр. № держреєстрації 0122U001465 та № ФПМ-2-25 «Розроблення інформаційної технології обробки статистичних даних» 2025-27пр. номер держреєстрації 0125U002280.

Формулювання наукової задачі, розв'язання якої одержане в дисертації. Дисертаційна робота Божухи Д. І. спрямована на розв'язання актуальної науково-прикладної задачі – розроблення архітектурного рішення побудови хмарної системи для її ефективної підтримки.

Наукова задача дисертаційної роботи полягає у створенні концептуальної та прикладної основи для побудови багаторівневої хмарної системи, здатної адаптуватися до змін навантаження та включає розроблення математичних моделей, архітектурних рішень та програмних засобів, що забезпечують ефективне функціонування системи в умовах динамічних потоків запитів.

Конкретні завдання дослідження:

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 ІТ-інфраструктури.
3. Спроекувати ІТ-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 результатів. Вважаю, що наукова новизна отриманих результатів полягає у наступному:

1. Вперше виконано комплексний аналіз архітектур хмарних систем у термінах систем масового обслуговування, що дозволило виявити їхню низьку адаптивність до змін інтенсивності запитів та неефективність при пікових навантаженнях. На основі цього сформовано критерії оптимізації структурних параметрів для зменшення затримок та підвищення відмовостійкості.
2. Вперше розроблено архітектурне рішення з чітко визначеною послідовністю руху запиту, яке включає додаткові рівні Edge/Fog та формує масштабовану ієрархію розподілених ресурсів.
3. Вперше запропоновано чотирирівневу модель хмарної системи, подану як стохастична багатофазова мережа з потоком запитів/завдань.
4. Вперше сформовано підхід до проектування багаторівневої архітектури, що поєднує умови розміщення запитів та швидкодію ресурсів, а також використовує універсальні метрики ефективності та надійності систем масового обслуговування.
5. Запропоновано програмне рішення для вибору структури чотирирівневої системи, яке поєднує умову сталого режиму з критеріями оптимізації та забезпечує перебудову архітектури на етапі проектування.

6. Визначено три модифікації чотирирівневих систем із різними комбінаціями зв'язків та правилами перенесення запитів; одну з них детально досліджено для інтервалу $[0, T]$ із заданими функціями балансування та швидкостями обробки.
7. Запропоновано два типи вузлів хмарної системи та створено програмні модулі для їх аналізу, що дозволило виявляти «вузькі місця» та досліджувати поведінку окремих блоків у різних конфігураціях.
8. Вперше сформовано великі набори комбінацій структур хмарних систем для проведення імітаційних експериментів, що забезпечило масштабне дослідження архітектурної складності.
9. Розроблено програмне рішення для моделювання різних структур хмарної системи, яке дозволяє аналізувати організаційні та функціональні зв'язки між рівнями.
10. Підготовлено великі набори даних із відкритих джерел для моделювання потоків запитів, що дозволило виконати мільйони експериментів та звести параметри до двох ключових інтервалів.
11. Досліджено використання агентів-додатків у хмарній системі, показано їхній вплив на локальну та глобальну стабільність, а також відмінність між глобальною стратегією та локальною тактикою балансування.
12. Вперше проведено комплексні експерименти моделювання чотирирівневої системи, які підтвердили існування «вузького місця» на першому рівні.

Практичне значення одержаних результатів. Практична цінність дослідження полягає у створенні інструментів і методів, що забезпечують побудову, аналіз та оптимізацію архітектур хмарних систем, дозволяючи контролювати їхню складність і динаміку навантаження та інтегрувати отримані результати в існуючі алгоритми управління хмарними інфраструктурами. Зокрема:

1. Розроблено два типи вузлів хмарної системи, що дають змогу виявляти та аналізувати «вузькі місця» в її структурі.
2. Створено програмне рішення та сформовано великі набори комбінацій чотирирівневих архітектур, які використовуються для масштабних імітаційних експериментів.
3. Проведено моделювання різних конфігурацій хмарних систем, що підтвердило ефективність запропонованих методів аналізу складності та продуктивності.
4. Підготовлено оптимізовані набори даних із відкритих джерел, які застосовано для формування динамічних потоків запитів із різними розподілами та інтервалами надходження.
5. Розроблено комплекс програмних модулів для моделювання чотирирівневої хмарної системи, включно з умовами розміщення ресурсів, споживання послуг та обчисленням ключових показників ефективності.
6. Для реалізації програмних рішень використано Python та хмарні SaaS-інструменти, що забезпечило виконання задач із високою обчислювальною складністю.
7. Результати дослідження впроваджено в освітній процес кафедри інженерії програмного забезпечення ДНУ — у курсах «Інженерія надійності систем», «Імітаційне моделювання» та «Методи теорії масового обслуговування», а також під час виконання кваліфікаційних робіт.
8. Отримані наукові результати становлять внесок у розвиток архітектур хмарних систем, зокрема в задачах контролю складності та динаміки навантаження, і можуть слугувати основою для подальших досліджень у сфері управління хмарними інфраструктурами.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків та рекомендацій. Наукові положення, висновки та рекомендації, сформульовані в дисертаційній роботі, ґрунтуються на використанні математичних моделей масового обслуговування, методів оптимізації та

імітаційного моделювання, що дозволило підтвердити коректність запропонованих підходів і продемонструвати можливість виявлення «вузьких місць» у хмарних системах. Вони підкріплені значним обсягом експериментальних даних, зокрема результатами моделювання понад 810 000 структур, які доводять ефективність розроблених алгоритмів балансування й узгоджуються з теоретичними висновками. Обґрунтованість роботи забезпечено застосуванням сучасних технологій аналізу даних, машинного навчання, моделей потоків і спеціалізованих програмних інструментів, що продемонстрували повну відповідність між теоретичними припущеннями та реальною поведінкою системи під час моделювання. Усі кінцеві висновки базуються на комплексному поєднанні аналізу архітектурних рішень, математичного апарату та масштабних експериментальних досліджень, які практично підтверджують наукову новизну та високу ефективність запропонованих рішень.

Розроблені методи суттєво підвищують масштабованість, стійкість та загальну продуктивність хмарних систем завдяки ефективному розподілу навантаження між рівнями Dev/Edge/Fog/Cloud, оптимізації потоків запитів і мінімізації затримок обробки. Запропоновані підходи та алгоритми забезпечують високу відмовостійкість інфраструктури шляхом своєчасного виявлення критичних вузлів, а також підвищують ефективність управління ресурсами через механізми адаптивного балансування та прогнозування динаміки навантаження.

Особистий внесок здобувача. Усі результати дисертаційної роботи, що виносяться на захист, отримані автором особисто та за його безпосередньою участю. Дисертаційна робота є завершеним науковим дослідженням, виконаним автором відповідно до його індивідуального навчального плану. Зокрема, дисертантом проведено пошук та аналіз літературних джерел; обрані методи аналізу складності хмарної системи; побудову моделей чотирирівневої хмарної системи на прикладах

найпростішого потоку та з балансуванням рівнів; програмні експерименти та ілюстрацію одержаних результатів.

Оцінка структури дисертації, мови та стилю викладення.

Дисертаційна робота має класичну структуру, яка включає:

1. **Вступ**, де обґрунтовано актуальність теми дослідження, визначено мету та завдання дослідження, описано об'єкт і предмет дослідження, а також наукову новизну та практичне значення роботи;

2. **Розділ 1**, в якому проаналізовано існуючі методи та IT-рішення для побудови хмарних систем, визначено їхні ключові властивості (масштабованість, стійкість, гнучкість) та формалізовано задачу побудови багаторівневої архітектури.

3. **Розділ 2**, що присвячений дослідженню надійності системи на основі запропонованої чотирирівневої ієрархії; за допомогою мереж масового обслуговування побудові моделі, яка враховує кількість користувачів, граничних/туманних вузлів та віртуальних машин; визначенню умови контролю складності архітектури.

4. **Розділ 3**, в якому розглянуто методологію розвантаження чотирирівневої ієрархічної системи та описано три модифікації архітектури з різними правилами перенаправлення запитів між вузлами та детально досліджено одну з них на обмеженому часовому інтервалі $[0, T]$.

5. **Розділ 4**, присвячений тестуванню програмних модулів для оцінки ефективності та оптимізації системи; формуванню тестових наборів даних для апробації рішень, а також аналізу відкритих даних про навантаження хмарних ресурсів для подальшого імітаційного моделювання.

6. **Висновки** складаються з 11 пунктів, що логічно та послідовно сформульовані, повністю відображають отримані здобувачем результати роботи, підтверджуючи їхню актуальність для управління хмарними системами та контролю навантаження. Чітка та логічна побудова розділу

дозволяє характеризувати здобувача як сформованого науковця, здатного самостійно вирішувати поставлені завдання.

7. **Список використаних джерел** містить 117 найменування.

8. **Додатки**, які містять перелік публікацій здобувача, акт впровадження результатів роботи в освітній процес та частину програмного коду.

Робота написана українською мовою з використанням сучасної наукової термінології. Матеріал викладено логічно, послідовно та чітко.

Зауваження по роботі

Незважаючи на високий науковий рівень роботи, є декілька зауважень, які не впливають на загальну позитивну оцінку, але можуть бути враховані для подальшого вдосконалення:

1. Наведені результати практичної частини не відображають в повній мірі всі отримані можливості проведених експериментів.

2. Огляд літературних джерел є повним, але окремі підходи до багаторівневих архітектур подані без достатнього порівняння з сучасними промисловими рішеннями (наприклад, наявні узагальнені архітектури AWS, Google Cloud та Azure, але відсутня архітектури Kubernetes, Istio, OpenShift). Це зменшує можливість критичного зіставлення запропонованих рішень із реальними практиками.

3. Математичне формулювання побудови стратегії балансування на чотирирівневій системі є цікавим, але бракує порівняння з існуючими алгоритмами (наприклад, Round Robin, Least Connections, Weighted Fair Queueing).

4. У підрозділі 3.6 згадується DevOps, але не розкрито, як саме агентні підходи можуть бути інтегровані у CI/CD-процеси.

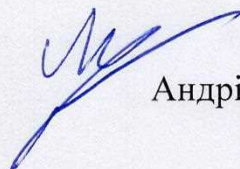
5. Як ви вважаєте, залучення квантових комп'ютерів могло б вирішити проблеми обчислювальної складності?

Загальний висновок по дисертаційній роботі

Враховуючи актуальність, новизну, важливість одержаних автором наукових результатів, їх обґрунтованість і достовірність, а також цінність сформульованих положень і висновків, вважаю, що дисертаційна робота Божухи Даніїла Ігоровича «Розроблення методів аналізу та побудови структури хмарних систем», представлена на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 121 Інженерія програмного забезпечення, відповідає вимогам, що висуваються до дисертацій, які встановлені відповідно наказу МОН України № 40 від 12.01.2017 р. «Про затвердження вимог до оформлення дисертації», «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії» (Постанова Кабінету Міністрів України № 44 від 12 січня 2022 р. зі змінами від 21.03.2022 р.), а її автор Божуха Даніїл Ігорович заслуговує присудження наукового ступеня доктора філософії зі спеціальності 121 Інженерія програмного забезпечення.

Офіційний опонент

доцент кафедри інформатики та програмної інженерії,
факультету інформатики та обчислювальної техніки
Національного технічного університету України
«Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»
кандидат технічних наук



Андрій ГУБСЬКИЙ

Підпис Губського А. М. засвідчую

Т.В.о Вчений секретар КПІ ім. Ігоря Сікорського



Валерія ХОЛЯВКО

Валерія Холявко