

**Голові разової спеціалізованої вченої ради
Національного університету «Львівська політехніка»
доктору технічних наук, доценту
Бешлею М.І.**

ВІДГУК

офіційного опонента

**професора кафедри кібербезпеки та захисту інформації
Київського національного університету імені Тараса Шевченка,
д.т.н., професора Наконечного Володимира Сергійовича
на дисертаційну роботу
Журавля Станіслава Сергійовича
"Методи та моделі підвищення ефективності функціонування
розподілених сервісних систем",
представлену на здобуття наукового ступеня доктора філософії
в галузі знань 17 «Електроніка та телекомунікації»
за спеціальністю 172 «Телекомунікації та радіотехніка»**

Актуальність теми дисертації

Ефективне функціонування розподілених сервісних систем (РСС) вимагає вирішення складних завдань, зокрема виявлення та локалізації відмов, координації вузлів та забезпечення їх консистентної та узгодженої роботи. У зв'язку з цим, постає нагальна потреба у розробці моделей та методів, здатних не лише реагувати на поточний стан системи, а й передбачати її поведінку за умов невизначеності, що особливо актуально з огляду на постійне зростання обсягів даних та критичну залежність бізнес-процесів від безперебійної роботи РСС. Це передбачає використання інтелектуальних підходів до аналізу стану системи та вчасного виявлення відмов, що дає змогу автоматично ухвалювати рішення як про наявність збою, так і про відновлення сервісів.

Незважаючи на значні зусилля науковців, спрямовані на покращення узгодженості роботи розподілених систем через управління мережевими ресурсами, недостатньо уваги приділено адаптивному та прогнозованому виявленню відмов з урахуванням поточних умов функціонування системи. Це створює ключове протиріччя між мінімізацією часу очікування відповіді вузлом для оперативної реакції на збої та підвищенням ймовірності хибнопозитивного спрацювання механізму виявлення відмов, що у свою чергу, як наслідок, призводить до зайвих реконфігурацій, порушення узгодженості даних та зниження продуктивності.

Отже, необхідність балансування між швидкістю реагування на відмови та точністю функціонування механізмів виявлення збоїв визначає актуальність

науково-практичного завдання – розроблення нових методів та моделей підвищення ефективності функціонування РСС з прогнозованим адаптивним виявленням відмов, які враховуватимуть поточні характеристики мережевого середовища, динаміку затримок і поведінку вузлів у кластері та визначатимуть їх порогові значення.

Ступінь обґрунтованості та достовірності основних наукових положень, висновків і рекомендацій

Високий ступінь обґрунтованості та достовірності основних наукових положень, висновків і рекомендацій дисертаційної роботи підтверджується послідовним застосуванням наукових методів, отриманими кількісними результатами та їхнім успішним практичним впровадженням. У роботі вдало та обґрунтовано застосовано математичний апарат теорії ймовірності, математичної статистики та інших суміжних напрямів. Отримані результати логічно вписуються у фундаментальні засади інформаційних систем і повністю відповідають чинним стандартам. Дисертаційна робота Журавля С.С. отримала практичне підтвердження, що засвідчено відповідними актами впровадження. Зокрема, результати дослідження були використані та впроваджені у діяльність ТзОВ «Вітертек» та ТзОВ ВТФ «Контех» з метою підвищення ефективності функціонування розподілених сервісних систем.

Наукова новизна дисертаційної роботи

1. Набув подальшого розвитку метод виявлення відмов у роботі розподілених сервісних систем. На відміну від традиційних рішень, він дозволяє глибше аналізувати поточний стан системи та значно зменшувати кількість хибних спрацювань, що виникають через короточасні мережеві збої. Це стало можливим завдяки інтеграції ймовірнісного байєсівського підходу в логіку прийняття рішень. Це дозволяє системі приймати більш обґрунтовані, ймовірнісні рішення щодо збоїв вузлів, оновлюючи ймовірності в динаміці. Завдяки цьому кількість хибно-позитивних спрацювань зменшено приблизно на 4–5%. Це досягається за рахунок більш гнучкого, накопичувального аналізу подій та адаптивного порогу, що враховує історію поведінки вузла та додаткові ознаки збою.

2. Удосконалено метод адаптивного визначення порогу відмов шляхом прогнозування часу очікування повідомлень від вузлів, які можуть бути непрацездатними. Для цього використано модель машинного навчання SARIMA, що дозволяє враховувати історичні затримки та передбачати їх зміни. Такий підхід значно знижує негативний вплив нестабільного мережевого з'єднання на роботу алгоритмів консистентності – а відтак і на загальну надійність функціонування розподіленої сервісної системи.

3. Уперше запропоновано автономний адаптивний метод підвищення продуктивності розподілених сервісних систем. Метод базується на використанні лідер-орієнтованої структури алгоритму консенсусу (наприклад, Raft) і дає змогу

динамічно налаштовувати затримки між вузлами кластера, а також обирати лідера з урахуванням поточних мережових умов. Його ключова особливість – використання мережевої затримки як головного критерію для визначення пріоритетності вузлів. Вузли з гіршими показниками зв'язку навмисно уповільнюють процес ініціювання виборів, "поступаючись" лідерством тим, хто має стабільніше з'єднання – що має позитивний вплив на працездатність системи в цілому.

Повнота викладу результатів дисертаційної роботи у наукових публікаціях

За результатами досліджень, які викладені у дисертаційній роботі, опубліковано 9 наукових праць, з них 1 стаття у науковому періодичному виданні інших держав, що входять до міжнародних науково-метричних баз даних, 1 стаття у наукових фахових виданнях України, що входять до міжнародних науково-метричних баз даних, 1 стаття у науковому періодичному виданні інших держав; 3 статті у наукових фахових виданнях України, 3 публікації у збірниках тез наукових конференцій (зокрема 2 – у виданнях, які входять до науко-метричних баз даних Scopus та Web of Science).

Опубліковані праці повною мірою висвітлюють матеріали дисертаційної роботи.

Важливість одержаних результатів для науки і техніки та перспективи їх використання

Результати дисертаційного дослідження Журавля С.С. мають значну наукову новизну та практичне значення. Головним розв'язаним науково-практичним завданням є розроблення нових методів та моделей підвищення ефективності функціонування РСС через прогнозоване адаптивне виявлення відмов, що враховують поточні характеристики мережевого середовища, динаміку затримок та поведінку вузлів у кластері, а також визначають їх порогові значення.

Практичне значення та перспективи використання:

Запропоновані методи та моделі адаптивного виявлення відмов і вдосконалення механізмів консенсусу можуть бути використані як наукове підґрунтя для створення прикладних рішень та побудови розподілених сервісних систем.

Результати дослідження можуть слугувати основою для розроблення рекомендацій та технічних регламентів щодо інтеграції адаптивних механізмів керування відмовами у хмарні та сервісно-орієнтовані ІКТ-інфраструктури телекомунікаційних операторів, що функціонують в умовах змінного навантаження та динамічного мережевого середовища.

Розроблено програмно-апаратний комплекс на основі автономного адаптивного підходу для управління функціонуванням розподіленої системи, що дозволило на практиці підтвердити ефективність запропонованих методів та алгоритмів. Крім того завдяки цьому комплексу вдалося зменшити стандартне відхилення затримки на 44%, що свідчить про підвищену стабільність і передбачуваність роботи системи.

Досягнуто зменшення ймовірності реконфігурації кластеру на 4.5%, що

дозволяє обробляти запити в моменти пікових навантажень без переобрання нових лідерів.

Наукові та практичні результати досліджень використано в навчальному процесі кафедри інформаційно-комунікаційних технологій Національного університету «Львівська політехніка».

Основні результати дисертаційної роботи впроваджено у діяльність ТзОВ «Вітертек» та ТзОВ ВТФ «Контех», що підтверджено актами впровадження.

Таким чином, в дисертації Журавля С.С. пропонуються вагомі рішення для підвищення надійності, ефективності та стабільності РСС, що є критично важливим для сучасної цифрової інфраструктури.

Загальна характеристика дисертаційної роботи

Дисертаційне дослідження розв'язує науково-практичне завдання – розроблення нових методів та моделей підвищення ефективності функціонування РСС. Запропоновані методи та моделі враховуватимуть актуальні параметри мережевого середовища, динамічні зміни затримок, а також характер поведінки вузлів у кластері, з подальшим визначенням відповідних порогових значень для їх оцінки.

Дисертаційна робота складається зі списку умовних скорочень, вступу, чотирьох основних розділів, висновків, списку використаних джерел та двох додатків. Загальний обсяг роботи становить 186 сторінок друкованого тексту. З них 7 сторінок займає вступ, у якому обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету, завдання, об'єкт і предмет дослідження, а також викладено наукову новизну, практичне значення та структуру роботи. Основний зміст дисертації охоплює 151 сторінку, на яких представлено теоретичні положення, методи дослідження, результати експериментів та їх аналіз. Ілюстративний матеріал включає 63 рисунки та 6 таблиць, що сприяють кращому розумінню наведених положень та результатів. Список використаних джерел містить 148 найменувань, що свідчить про ґрунтовну теоретичну і практичну базу дослідження. У додатках, що займають 5 сторінок, наведено акти впровадження результатів дисертаційної роботи в практику, а також подано повний перелік наукових праць автора за темою дисертації.

У вступі обґрунтовано актуальність обраної тематики дослідження в контексті сучасного розвитку РСС, їх широкого застосування в інформаційних технологіях та зростаючих вимог до їхньої надійності та відмово-стійкості. Представлено зв'язок з спорідненими дослідженнями які розкривають, сформульовано мету і завдання дослідження, а також визначено об'єкт, предмет, методологічну базу, наукову новизну та практичну значущість отриманих результатів. Також наведено інформацію про апробацію роботи, публікації основних положень дисертації, особистий внесок здобувача та впровадження розроблених рішень у практичну діяльність.

Розділ 1 присвячений всебічному аналізу існуючих методів і моделей функціонування розподілених сервісних систем. З'ясовано, що основою

узгодженості у РСС є алгоритми досягнення консенсусу, які дозволяють підтримувати цілісність та послідовність даних між вузлами навіть за умов часткових або повних збоїв у підсистемах. Показано, що забезпечення надійності таких систем є складним завданням унаслідок динамічності топологій, високої масштабованості та гетерогенності сучасних мережевих середовищ, що вимагає застосування інтелектуальних підходів до моніторингу, адаптації та самовідновлення. Ключовим чинником забезпечення стійкості є своєчасне виявлення збоїв (fault detection), для чого використовуються класичні евристичні методи, статистичні моделі, а також алгоритми машинного навчання. Виявлено актуальні невирішені науково-практичні задачі, зокрема конфлікт між швидкістю реагування на потенційну відмову та точністю її ідентифікації, що актуалізує потребу в розробленні нових адаптивних методів із прогнозованим виявленням збоїв.

Розділ 2 зосереджено на розробленні інноваційних адаптивних методів підвищення ефективності функціонування алгоритмів консенсусу в умовах змінного мережевого середовища:

Запропоновано метод виявлення відмов на основі ймовірнісного байєсівського підходу, що дозволяє здійснювати оцінку стану вузлів системи та зменшує ймовірність прийняття хибних рішень, спричинених короткочасними мережевими затримками. Цей підхід підвищує точність і надійність механізмів досягнення консенсусу.

Удосконалено метод адаптивного визначення порогу відмов шляхом прогнозування часу очікування повідомлень від підозрюваних вузлів із використанням моделі SARIMA (Seasonal Autoregressive Integrated Moving Average). Запропонований підхід базується на статистичному аналізі історичних даних, що дозволяє моделювати характер затримок та динамічно коригувати тайм-аут для виявлення відмов.

Вперше розроблено автономний адаптивний метод підвищення продуктивності РСС, який враховує лідер-орієнтовану структуру консенсусних алгоритмів (зокрема, Raft) та дозволяє автоматично регулювати параметри затримки між вузлами кластеру, обирати лідера з урахуванням мережевих умов і забезпечувати максимальну продуктивність системи. Метод використовує мережеву затримку як критерій пріоритетності для обрання лідера, а також містить стохастичну компоненту для уникнення одночасного спрацювання тайм-аутів.

У розділі 3 проведено моделювання, математичний аналіз і дослідження ефективності запропонованих методів:

Використання байєсівського методу дало змогу розрахувати апостеріорну ймовірність відмови вузла, що продемонструвало зменшення кількості хибно-позитивних спрацювань приблизно на 4–5%, порівняно з традиційними евристичними підходами.

Розроблено імітаційну модель кластера IoT, за допомогою якої протестовано

ефективність методу адаптивного визначення порогу з використанням SARIMA. Результати моделювання показали, що точне прогнозування часу відповіді дозволяє динамічно адаптувати поріг тайм-ауту та підвищити точність виявлення збоїв на 20%, чітко розмежовуючи нормальну роботу й пікові фази деградації.

За допомогою імітаційного моделювання підтверджено ефективність методу автономного визначення потенційного лідера в умовах нестабільного мережевого середовища.

Розділ 4 присвячено практичній реалізації розроблених рішень та оцінці їхнього функціонування:

Інтеграція автономного адаптивного методу в імітаційну модель кластерної системи дозволила знизити ймовірність передчасної реконфігурації у 3 рази в умовах стандартного навантаження. В умовах пікового навантаження досягнуто додаткового підвищення ймовірності успішної реконфігурації на 5,6% завдяки своєчасному реагуванню системи на зміну стану вузлів.

Реалізовано програмно-апаратний комплекс, побудований на базі запропонованого автономного адаптивного підходу, призначений для управління функціонуванням РСС у реальному часі.

Впровадження запропонованих рішень у програмно-апаратний комплекс дало змогу зменшити стандартне відхилення затримки на 44%, а також знизити ймовірність реконфігурації кластера на 4,5%.

Апробація та публікації. Основні результати дисертаційного дослідження були апробовані на трьох міжнародних науково-технічних конференціях і семінарах, де здобули позитивну оцінку фахівців галузі. За темою дисертації опубліковано 9 наукових праць, включаючи статті, індексовані в міжнародних наукометричних базах даних, таких як Scopus та Web of Science. Достовірність отриманих результатів підтверджено відповідними актами впровадження в практичну діяльність, що свідчить про високу прикладну цінність роботи та її готовність до реального застосування в інфо-комунікаційних системах.

Зауваження та рекомендації до дисертаційної роботи

1. У першому розділі автор обґрунтовано зосереджується на теоретичних засадах функціонування алгоритмів консенсусу в розподілених сервісних системах, а також аналізує існуючі підходи до побудови детекторів відмов. Водночас доцільно було б більш докладно висвітлити взаємозв'язок між самими розподіленими системами, алгоритмами консенсусу та механізмами виявлення відмов — саме ці компоненти разом формують основу відмовостійкості таких систем. Глибше розкриття цієї взаємодії допомогло б чітко окреслити логіку та послідовність подальших досліджень, представлених у наступних розділах.

2. Під час опису методу виявлення відмов у розподілених сервісних системах на основі баєсівського підходу було б доцільно навести варіанти архітектурної реалізації РСС з інтеграцією цього методу, враховуючи сучасні технології та підходи до побудови систем. Такий крок допоміг би краще уявити практичні

аспекти впровадження запропонованого рішення, а також висвітлити потенційні сценарії його використання у різних типах реальних розподілених середовищ.

3. Під час опису роботи методу виявлення відмов на основі моделі машинного навчання SARIMA доцільно було б детальніше висвітлити потенційні сфери його застосування з урахуванням обчислювального навантаження, яке лягає на вузли розподіленої системи. Такий аналіз дозволив би краще оцінити практичну доцільність впровадження моделі в різних типах інфраструктур – зокрема в умовах обмежених ресурсів або високої динаміки мережевого середовища.

4. З огляду на те, що запропонований в роботі автономний адаптивний метод має виразні переваги при розгортанні на кластерах із обмеженими обчислювальними ресурсами, доцільно було б докладніше розкрити ці переваги. Зокрема, варто акцентувати увагу на тому, яким чином метод оптимізує використання ресурсів і забезпечує стабільну роботу системи в умовах обмеженої продуктивності вузлів.

5. Доцільно було б подати порівняльний аналіз запропонованих у роботі методів, оскільки вони вирішують спільну проблему ефективного функціонування РСС, проте базуються на різних підходах. Такий аналіз дозволив би чіткіше окреслити переваги кожного з методів, їхню сферу застосування та можливу взаємодоповнюваність у практичному використанні.

6. Під час опису переваг функціонування ймовірнісного баєсівського методу доцільно було б детальніше порівняти його з іншими ймовірнісними підходами до виявлення відмов. Такий аналіз дозволив би чіткіше висвітлити унікальність запропонованого рішення, його практичні переваги, а також обґрунтувати вибір саме цього методу для розв'язання поставленого наукового завдання.

7. Таблиця 3.1 містить надто велику кількість числової інформації, що ускладнює її сприйняття. Доцільно було б структурувати дані більш компактно або візуально спростити подання.

8. Розділ 4.1.2, у якому подано оцінку впливу параметра тайм-ауту на процес реконфігурації, містить надмірно деталізований аналіз окремих сценаріїв погіршення працездатності кластеру. Доцільним було б спростити виклад або згрупувати типові випадки, щоб зробити подану інформацію більш компактною та легшою для сприйняття.

Загальний висновок

Дисертація Журавля Станіслава Сергійовича на тему «Методи та моделі підвищення ефективності функціонування розподілених сервісних систем» є завершеним самостійним науковим дослідженням, що має як теоретичну, так і практичну цінність. Зазначені зауваження не знижують наукової та прикладної значущості отриманих результатів.

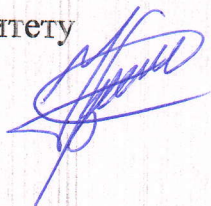
У роботі успішно розв'язано важливе науково-практичне завдання – розроблення нових методів і моделей підвищення ефективності функціонування РСС з адаптивним виявленням відмов відповідно до динаміки зміни працездатності

мережі. Запропоновані підходи враховують поточні характеристики мережевого середовища, динаміку затримок і поведінку вузлів у кластері, а також дозволяють визначати їх порогові значення. Результати мають вагоме значення для розвитку галузі знань 17 «Електроніка та телекомунікації».

Дисертація відповідає вимогам наказу МОН України № 40 від 12.01.2017 р. «Про затвердження вимог до оформлення дисертації», а також 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 від 12 січня 2022 р. № 44 зі змінами), а її автор заслуговує присудження наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 172 «Телекомунікації та радіотехніка».

Офіційний опонент

доктор технічних наук, професор,
професор кафедри
кібербезпеки та захисту інформації,
факультету інформаційних технологій,
Київського національного університету
імені Тараса Шевченка
«30» липня 2025 року



Володимир НАКОНЕЧНИЙ

ПІДПИС ЗАСВІДЧУЮ
ВЧЕНИЙ СЕКРЕТАР
КАРАУЛЬНА

30.07.2025

