

**Голові разової спеціалізованої вченої ради
Національного університету «Львівська політехніка»
доктору технічних наук, доценту
Миколі БЕШЛЕЮ**

РЕЦЕНЗІЯ

доцента кафедри інформаційно-комунікаційних технологій Навчально-наукового інституту інформаційно-комунікаційних технологій та електронної інженерії Національного університету «Львівська політехніка» кандидата технічних наук Масюка Андрія Романовича 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» та спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

У сучасних інформаційно-комунікаційних системах стрімко зростає роль розподілених сервісних архітектур, які лежать в основі хмарних платформ, мікросервісів, IoT-рішень та обчислювальних інфраструктур на базі Edge і Fog технологій. Високий рівень масштабованості, динамічність середовища, розподіленість компонентів і вимоги до безперервної доступності зумовлюють потребу у використанні ефективних алгоритмів координації, зокрема механізмів досягнення консенсусу між вузлами. Одним із базових елементів таких алгоритмів є виявлення відмов, яке у більшості випадків реалізується через механізм тайм-аутів — очікування відповіді від вузла протягом фіксованого проміжку часу. Однак у динамічних, змінних умовах реального середовища постає суттєве протиріччя: зменшення тайм-ауту дозволяє системі швидко реагувати на збої, пришвидшуючи переобрання лідера та відновлення працездатності, проте значно підвищує ризик хибнопозитивних рішень. Це, у свою чергу, призводить до зайвих процедур реконфігурації, порушення узгодженості даних та зниження загальної продуктивності. Навпаки, збільшення часу очікування зменшує кількість помилкових спрацювань, але уповільнює реакцію на справжні збої, що критично у системах з високими вимогами до доступності. У таких умовах особливо важливим є розроблення методів, здатних адаптивно визначати порогові значення часу очікування з урахуванням поточних характеристик мережі, затримок і поведінкових параметрів вузлів. Застосування моделей, що дозволяють прогнозувати ймовірність відмов на основі сукупності ознак, відкриває шлях до формування

більш точних, обґрунтованих рішень про стан компонентів системи. Це дозволяє зменшити кількість хибних реконфігурацій, підвищити стабільність роботи кластера та загальну ефективність функціонування РСС.

Таким чином, актуальною є тема дисертаційних досліджень Журавля Станіслава Сергійовича, яка дозволяє знаходити баланс між швидкістю реагування на збої та точністю їх виявлення, що обумовлює потребу у створенні нових адаптивних методів і моделей, орієнтованих на контекстно залежне керування механізмами консенсусу в розподілених сервісних системах. Розв'язання цього науково-практичного завдання є важливою умовою підвищення надійності, узгодженості й ефективності сучасних цифрових сервісів.

Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та двох додатків. Робота викладена на 186 сторінках, включаючи 137 сторінок основного тексту. Перелік використаних джерел містить 148 найменувань.

У *вступі* обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, наведено зв'язок роботи з науковими програмами, темами, сформульовано мету і завдання дослідження, наукову новизну та практичне значення отриманих результатів. Наведено дані про впровадження результатів роботи, її апробацію, публікації та особистий внесок здобувача.

У *першому розділі* проаналізовано основні методи та моделі, які забезпечують функціонування розподілених сервісних систем. Встановлено, що основою узгодженості функціонування розподілених систем є робота алгоритмів консенсусу, що забезпечують їх стабільну роботу та є основним механізмом, який гарантує узгодженість даних між вузлами навіть у випадку збоїв. Забезпечення надійності розподілених сервісних систем є складною задачею, що вимагає комплексного підходу з урахуванням різноманітних джерел збоїв, зокрема апаратних, програмних та мережевих. Особливу складність становить високий рівень динамічності, масштабованості та гетерогенності сучасних середовищ, у яких мікросервісні додатки взаємодіють через нестабільні мережеві шляхи та можуть мати різну поведінку залежно від навантаження, що зумовлює необхідність впровадження інтелектуальних засобів моніторингу, адаптації та самовідновлення. Сформульовано основні невирішені задачі в галузі забезпечення узгодженості та працездатності системи в умовах постійних відмов та реконфігурацій її функціональних вузлів. Визначено, що в умовах нестабільних і непередбачуваних мережевих затримок ефективність виявлення відмов критично залежить від раціонального вибору порогового значення часу очікування повідомлень від вузлів.

У *другому розділі* набув подальшого розвитку метод виявлення відмов в роботі розподілених сервісних систем, який на відміну від існуючих аналізує стан функціонування системи та мінімізує кількість помилкових рішень про відмови, як викликані короткочасними мережевими збоями, шляхом інтеграції

ймовірнісного байєсівського підходу. Динамічно оновлюючи ймовірності збоїв, система може зменшити кількість хибнопозитивних спрацьовувань, тим самим підвищуючи надійність алгоритму консенсусу та дасть змогу забезпечувати стабільне функціонування розподілених сервісних систем. Для мінімізації кількості реконфігурацій удосконалено метод адаптивного визначення порогу відмов шляхом прогнозування часу очікування повідомлень від потенційно непрацездатного вузла за допомогою моделі машинного навчання SARIMA. Використовуючи історичні дані та модель машинного навчання SARIMA, вузли обчислюють очікувану затримку через часовий аналіз, що надає їм можливість прогнозувати потенційні відмови. Маючи набір значень прогнозованих затримок, кожне значення якого відповідає певному вузлу, вузол може ухвалити рішення щодо його несправності шляхом коригування порогу тайм-ауту. Для пришвидшення процесу коригування порогу тайм-ауту вперше запропоновано автономний адаптивний метод підвищення продуктивності РСС, який на основі знань про лідер-орієнтовану структуру алгоритму консенсусу, дозволяє динамічно коригувати параметри затримки між вузлами кластеру, обирати лідера в кластері, та забезпечити максимальну стабільність і продуктивність роботи системи в цілому.

У *третьому розділі* доведено ефективність функціонування розподіленої системи в умовах динамічного середовища та непередбачуваних мережевих затримок на основі методу виявлення відмов з використанням ймовірнісного байєсівського підходу проведено розрахунок апостеріорної ймовірності відбою вузла. Такий підхід значно зменшує кількість хибнопозитивних спрацьовувань приблизно на 4–5%. Для оцінки ефективності виявлення відмови в розподіленій сервісній системі системи, що функціонує на основі методу адаптивного визначення порогу відмов з використанням моделі машинного навчання SARIMA розроблено імітаційну модель структури IoT кластера, як частини РСС. Із використанням методу адаптивного визначення порогу відмов та моделі машинного навчання SARIMA вдалося підвищити точність виявлення збоїв на 20%, забезпечуючи при цьому адаптивну та ефективну реакцію системи на нестабільні умови функціонування мережі. Імітаційне моделювання кластеру розподіленої сервісної системи для визначення потенційного лідера з використанням запропонованого автономного адаптивного методу засвідчило його ефективність у динамічному мережевому середовищі. Результати моделювання продемонстрували здатність алгоритму визначення тайм-ауту точно і гнучко визначати вузол, який має найсприятливіші умови для виконання ролі лідера, з урахуванням фактичних характеристик мережі.

У *четвертому розділі* завдяки інтеграції автономного адаптивного методу підвищення ефективності функціонування розподілених сервісних систем у імітаційну модель кластеру вдалося досягти зменшення ймовірності передчасної реконфігурації системи у 3 рази у стандартному режимі функціонування. В результаті роботи розробленого програмно-апаратного

комплексу підтверджується необхідність ефективного адаптивного підходу до коригування параметру затримки між вузлами кластеру, що впливає на вибір лідера в кластері, та зменшення ймовірності реконфігурації кластеру і, як наслідок, підвищення якості надання послуг. Завдяки впровадженню автономного адаптивного методу у роботу програмно-апаратного комплексу вдалося зменшити стандартне відхилення затримки на 44%, що вказує на підвищену стабільність і передбачуваність роботи системи. Як наслідок, вдалося досягти зменшення ймовірності реконфігурації кластеру на 4.5%, що дозволить обробляти запити в моменти пікових навантажень без переобрання нових лідерів.

У додатках до роботи подано акти впровадження її результатів та список публікацій здобувача за темою дисертації та апробацію її результатів.

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків та рекомендацій, сформульованих у дисертаційній роботі Журавля Станіслава Сергійовича, впливають з наступного:

- у роботі коректно використано математичний апарат теорії ймовірності та математичної статистики, а також елементів штучного інтелекту;
- отримані результати не суперечать фундаментальним основам інформаційних систем та відповідають існуючим стандартам ITU-T;
- достовірність отриманих претендентом науково-практичних результатів засвідчено актами впровадження;
- отримані нові результати гармонійно доповнюють відомі;
- матеріали дисертації обговорювались на 3 міжнародних та всеукраїнських науково-технічних конференціях, а також на наукових семінарах, і отримали схвальну оцінку.

Дисертантом на достатньому науковому рівні обґрунтовано вибір теми, її актуальність, визначено мету, завдання, об'єкт, предмет, аргументовано використання обраних методів дослідження. Автор поставив перед собою мету – підвищення ефективності функціонування розподілених сервісних систем шляхом розроблення методів та моделей адаптивного покращення функціонування алгоритмів консенсусу через удосконалення механізмів виявлення відмов, зокрема шляхом оптимізації таймаутів як основного інструменту детекції збоїв.

Відповідно вперше запропоновано автономний адаптивний метод підвищення продуктивності розподілених сервісних систем, який на основі знань про лідер-орієнтовану структуру алгоритму консенсусу, дозволяє динамічно коригувати параметри затримки між вузлами кластеру, обирати лідера в кластері, та забезпечити максимальну стабільність і продуктивність роботи системи в цілому. Його реалізація дозволила зменшити ймовірність передчасної реконфігурації системи у 3 рази у стандартному режимі функціонування. Водночас у періоди пікового навантаження впровадження

даного підходу забезпечує додаткове підвищення ймовірності реконфігурації на 5,6% завдяки своєчасній реакції системи на динамічну зміну структури з'єднань.

Автором удосконалено метод адаптивного визначення порогу відмов шляхом прогнозування часу очікування повідомлень від потенційно непрацездатного вузла за допомогою моделі машинного навчання SARIMA, що дозволяє зменшити вплив нестабільності мережевих з'єднань на функціонування алгоритму консистентності, і як наслідок, на працездатність роботи розподіленої сервісної системи.

Набув подальшого розвитку метод виявлення відмов в роботі розподілених сервісних систем, який на відміну від існуючих аналізує стан функціонування системи та мінімізує кількість помилкових рішень про відмови, шляхом інтеграції ймовірнісного байєсівського підходу, що дасть змогу забезпечувати стабільне функціонування розподілених сервісних систем.

Не викликає сумніву і практичне значення одержаних результатів. Запропоновані в дисертації методи та моделі адаптивного виявлення відмов і вдосконалення механізмів консенсусу можуть бути використані як наукове підґрунтя для створення прикладних рішень у сфері управління надійністю розподілених сервісних систем. Зокрема, 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.

Матеріали дисертації пройшли необхідну апробацію, обговорювалися на міжнародних та всеукраїнських наукових конференціях. Основні результати дослідження достатньо повно висвітлені у 9 наукових працях, серед яких 3 статті у наукових фахових виданнях України, 1 стаття у наукових фахових виданнях України, що входять до міжнародних науково-метричних баз даних та 1 стаття у науковому періодичному виданні інших держав, що входять до міжнародних науково-метричних баз даних, 1 стаття у науковому періодичному виданні інших держав; 3 публікацій у збірниках тез наукових конференцій (зокрема 2 – у виданнях, які входять до наукометричних баз даних Scopus та Web of Science). Опубліковані праці повністю висвітлюють матеріали дисертаційної роботи.

Дисертація Станіслава Журавля повністю відповідає спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка».

Підстав для сумнівів у науковій доброчесності здобувача під час детального ознайомлення з дисертаційною роботою не виявлено. Узгодженість тексту дисертації з науковими працями дисертанта свідчить про відсутність ознак фальсифікації. Проведений аналіз основних ідей та методів дотичних до

тематики інших робіт містить відповідні посилання.

Подана дисертаційна робота свідчить про наукову зрілість дисертанта, його вміння бачити актуальні проблеми в галузі електронних комунікацій та радіотехніки, готовність розв'язувати їх на достатньому науковому рівні. В цілому дисертаційна робота Журавля С.С. за своїм змістом і формою є завершеним самостійним дослідженням. Високо і позитивно оцінюючи наукове і практичне значення дисертаційної роботи, мають місце деякі зауваження та побажання дискусійного характеру:

1. Перший розділ дисертаційної роботи містить надмірний обсяг загальновідомої теоретичної інформації. Доцільним було б зосередити більшу увагу на аналізі сучасних наукових і практичних підходів та методів, спрямованих на підвищення ефективності функціонування розподілених сервісних систем.

2. З п. 2.1 у другому розділі не зовсім зрозуміло, у чому полягає модифікація байєсівського підходу до оцінки ймовірності виявлення збоїв: як саме розраховується апостеріорна ймовірність з урахуванням як початкового припущення (апріорного), так і нових подій.

3. Запропонований метод адаптивного виявлення відмов орієнтований на середовище з відносно стабільною топологією кластера, тому його ефективність у високо динамічних або мобільних розподілених системах потребує додаткової перевірки та адаптації.

4. Підхід до мінімізації тайм-аутів у п. 2.2 другого розділу базується переважно на аналізі затримок та частоти “серцебиття” вузлів, що, хоча й дозволяє досягнути високої точності, проте не враховує додаткові фактори, такі як пропускна здатність каналу, фонове навантаження або енергетичні обмеження пристроїв.

5. Розроблений програмно-апаратний комплекс на основі автономного адаптивного підходу для управління функціонуванням розподіленої системи та симуляційні експерименти, які виконані за допомогою нього, виконано для обмеженого набору сценаріїв і топологій, які відповідають характерним умовам хмарних та edge-інфраструктур, але не повною мірою охоплюють специфіку гетерогенних середовищ з високим ступенем нестабільності.

6. Присутні незначні стилістичні та граматичні помилки.

Проте висловлені зауваження і побажання не знижують загальної високої оцінки проведеного дослідження.

Аналіз дисертації та опублікованих праць дає підстави для висновку про те, що дисертація Журавля Станіслава Сергійовича на тему «Методи та моделі підвищення ефективності функціонування розподілених сервісних систем» є завершеною, самостійно виконаною науковою працею, що має вагоме теоретичне і прикладне значення, у якій розв'язано конкретне наукове 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 визначати їх порогові значення, що має важливе значення для галузі знань 17 Електроніка та телекомунікації.

Дисертація відповідає вимогам наказу МОН України № 40 від 12.01.2017р. «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 від 12 січня 2022 р. № 44), і може бути подана до розгляду спеціалізованої вченої ради на предмет допуску до захисту на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 172 «Телекомунікації та радіотехніка».

кандидат технічних наук,
доцент кафедри
інформаційно-комунікаційних технологій
Національного університету
"Львівська політехніка",



Андрій МАСЮК

Підпис PhD, доцента Андрія МАСЮКА засвідчую
Вчений секретар
Національного університету
«Львівська політехніка»
к.т.н., доцент



Роман БРИЛИНСЬКИЙ