

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

Відгук

**Професора кафедри інформаційних радіоелектронних технологій і
систем Вінницького національного технічного університету, д.т.н.,
проф., Семенова Андрія Олександровича 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»**

Надійня робота розподілених сервісних систем (РСС) вимагає вирішення ряду складних технічних задач, зокрема – ефективного виявлення та локалізації відмов, координації дій вузлів, а також підтримки узгодженості та консистентної взаємодії. У цьому контексті особливо актуальною стає потреба у створенні таких методів і моделей, які здатні не лише реагувати на поточний стан системи, а й прогнозувати її поведінку в умовах невизначеності. Це важливо з огляду на стрімке зростання обсягів даних і критичну залежність багатьох бізнес-процесів від стабільної роботи РСС.

Для досягнення цієї мети необхідне застосування інтелектуальних підходів до аналізу системного стану, що дозволяють виявляти відмови та швидко приймати рішення щодо відновлення функціонування сервісів.

Попри помітні наукові напрацювання, спрямовані на оптимізацію управління ресурсами в розподілених системах, питання адаптивного та прогнозованого виявлення відмов із урахуванням поточного стану системи залишається недостатньо дослідженим. Це породжує ключове протиріччя: з одного боку – потреба у швидкому реагуванні на відмови, а з іншого – ризик зростання частоти хибно-позитивних спрацювань. Такі помилки можуть призводити до зайвих реконфігурацій, порушення цілісності даних і, як наслідок, зниження загальної продуктивності системи.

Таким чином, виникає нагальна потреба у розробці нових підходів, що дозволяють досягти балансу між швидкістю реагування та точністю виявлення відмов. Це підкреслює актуальність наукового завдання – створення методів і

моделей, які забезпечують підвищення ефективності функціонування РСС за рахунок адаптивного прогнозованого виявлення відмов з урахуванням мережевого середовища, динаміки затримок і поведінкових характеристик вузлів у кластері.

Ступінь обґрунтованості та достовірності основних наукових положень, висновків і рекомендацій

Рівень обґрунтованості та достовірності основних наукових положень, висновків і рекомендацій дисертаційної роботи є високим. Це підтверджується як послідовним використанням наукових підходів, так і отриманими кількісними результатами, що пройшли успішну апробацію в практичних умовах. У дослідженні аргументовано та доцільно застосовано інструментарій теорії ймовірностей, математичної статистики та суміжних математичних дисциплін. Отримані результати узгоджуються з основоположними принципами побудови інформаційних розподілених систем та відповідають чинним галузевим стандартам.

Практичну цінність роботи засвідчують відповідні акти впровадження. Зокрема, результати дослідження були використані у виробничій діяльності ТзОВ «Вітертек» та ТзОВ ВТФ «Контех» для підвищення ефективності функціонування розподілених сервісних систем.

Наукова новизна дисертаційної роботи

Метод виявлення відмов у розподілених сервісних системах отримав подальший розвиток. На відміну від традиційних підходів, запропоноване рішення дозволяє точніше оцінювати поточний стан системи та суттєво знижує кількість хибно-позитивних спрацювань, які можуть виникати через короткочасні перебої в мережі. Це стало можливим завдяки впровадженню ймовірнісного байєсівського підходу в механізми прийняття рішень. Такий підхід дає змогу системі оновлювати оцінки ймовірностей та приймати більш зважені рішення щодо працездатності вузлів. У результаті кількість помилкових спрацювань вдалося скоротити приблизно на 4–5%, що досягнуто завдяки гнучкому накопичувальному аналізу подій і використанню адаптивного порогу, який враховує як історичну поведінку вузла, так і додаткові ознаки можливих відмов.

Удосконалено метод адаптивного встановлення порогу відмов шляхом впровадження прогнозової моделі SARIMA. Застосування цієї моделі дає змогу прогнозувати час надходження повідомлень від потенційно непрацездатних вузлів на основі аналізу попередніх значень мережевих затримок. Такий підхід дозволяє більш точно визначати очікувані значення тайм-аутів, зменшуючи чутливість системи до короткочасних мережевих коливань. У результаті

підвищується стабільність функціонування алгоритмів консенсусу та загальна надійність роботи розподіленої сервісної системи.

Запропоновано автономний адаптивний метод підвищення продуктивності розподілених сервісних систем, що бере до уваги структуру лідер-орієнтованих алгоритмів консенсусу. Суть методу полягає в динамічному регулюванні затримок між вузлами кластера та виборі лідера з урахуванням поточних параметрів мережевого середовища. Ключова ідея полягає в тому, що вузли з менш надійними мережевими характеристиками штучно затримують запуск процедури виборів, надаючи пріоритет вузлам зі стабільнішими з'єднаннями. Такий механізм дозволяє зменшити ймовірність передчасних реконфігурацій і загалом сприяє більш стабільній та ефективній роботі системи.

Повнота викладу результатів дисертаційної роботи у наукових публікаціях

У межах дослідження, результати якого викладено в дисертаційній роботі, було опубліковано 9 наукових праць. Зокрема, серед них – одна стаття у науковому виданні зарубіжної держави, що входить до міжнародних наукометричних баз даних, одна публікація у фаховому українському журналі, який також індексується міжнародними базами, ще одна стаття – у періодичному виданні іншої країни. Крім того, опубліковано три статті у фахових виданнях України та три тези доповідей, представлених на наукових конференціях, дві з яких були надруковані у збірниках, що входять до науко-метричних баз Scopus і Web of Science.

Опубліковані матеріали повною мірою відображають основні результати дисертаційного дослідження.

Важливість одержаних результатів для науки і техніки та перспективи їх використання

Результати дисертаційної роботи Журавля С.С. вирізняються високим рівнем наукової новизни та вагомим практичним значенням. Основним науково-прикладним завданням, яке було успішно вирішено у дослідженні, є створення нових методів і моделей для підвищення ефективності роботи розподілених сервісних систем (РСС). Запропоновані підходи забезпечують прогнозоване й адаптивне виявлення відмов з урахуванням актуального стану мережевого середовища, змін у затримках та поведінкових характеристик вузлів у кластері, а також передбачають визначення відповідних порогових значень для прийняття рішень.

Зокрема наукова цінність результатів:

Розроблено новий варіант підходу до виявлення відмов у розподілених

сервісних системах, що дозволяє ефективніше враховувати їхній поточний стан. На відміну від раніше запропонованих рішень, цей підхід зменшує вплив короткотермінових порушень у мережевому з'єднанні на прийняття рішень про відмову. Його основу становить інтеграція байєсівських імовірнісних моделей, що дало змогу підвищити точність детектування проблем і скоротити частоту помилкових спрацьовувань приблизно на 4–5%, завдяки адаптивному пороговому механізму, який бере до уваги динаміку поведінки вузлів.

Покращено підхід до адаптивного визначення порогових значень відмов шляхом використання моделі SARIMA для прогнозування часу отримання повідомлень від вузлів, які можуть вийти з ладу. Такий прогнозний механізм дозволяє компенсувати вплив мережевої нестабільності на роботу алгоритмів консенсусу, що, у підсумку, позитивно позначається на загальній стійкості розподіленої сервісної системи. Запроваджене рішення забезпечило зростання точності виявлення відмов на 20%.

Уперше розроблено автономний адаптивний метод, спрямований на підвищення продуктивності розподілених сервісних систем. Метод враховує принципи побудови лідер-орієнтованих консенсус алгоритмів, і передбачає динамічне налаштування затримок між вузлами кластеру з урахуванням їхніх поточних мережевих характеристик. Це дає змогу обирати лідера системи так, щоб забезпечити її максимально стабільне та ефективне функціонування РСС. Введення запропонованого методу в роботу РСС показало значне зниження частоти передчасних реконфігурацій – майже втричі у стандартних умовах роботи. Водночас у моменти пікового навантаження метод, навпаки, демонструє зростання ймовірності своєчасної реконфігурації на 5,6%, що свідчить про гнучку адаптацію системи до змін мережевої топології. Це підтверджує здатність методу підтримувати стабільну й узгоджену роботу кластеру незалежно від змін у зовнішньому середовищі.

Практичне значення:

Запропоновані в дисертації методи адаптивного виявлення відмов і вдосконалені алгоритми консенсусу мають прикладну спрямованість і можуть слугувати науковою основою для створення реальних інженерних рішень у сфері розподілених сервісних систем. Вони дозволяють підвищити надійність і гнучкість таких систем у широкому спектрі застосувань – від обчислювальних кластерів до інфраструктурних платформ.

Результати дослідження можуть бути використані для розробки практичних рекомендацій і технічних регламентів щодо впровадження адаптивних механізмів керування відмовами в хмарних середовищах та сервіс-орієнтованих інформаційно-комунікаційних системах. Це особливо актуально для телекомунікаційних операторів, які працюють в умовах постійно змінного навантаження, нестабільних мережевих характеристик та потреби в безперебійному сервісному забезпеченні.

Ефективність запропонованих підходів підтверджено не лише теоретичними результатами, а й практично – шляхом створення програмно-апаратного комплексу, що реалізує автономний адаптивний підхід до керування розподіленою системою. Впровадження цього комплексу дозволило на практиці продемонструвати реальне зниження чутливості до відмов і покращення стабільності системи, що засвідчує готовність запропонованих рішень до використання в промислових умовах.

У результаті впровадження розробленого програмно-апаратного комплексу вдалося досягти зниження стандартного відхилення мережеских затримок на 44%, що свідчить про істотне підвищення стабільності та передбачуваності функціонування системи.

Крім того, ймовірність реконфігурації кластеру в умовах пікового навантаження зменшилась на 4,5%, що забезпечує безперервну обробку запитів без потреби у частих процедурах переобрання лідера, навіть за динамічно змінних мережеских умов.

Практична значущість та наукова новизна отриманих результатів підтверджуються також їх інтеграцією в навчальний процес кафедри інформаційно-комунікаційних технологій Національного університету «Львівська політехніка», де вони використовуються для підготовки студентів за напрямками телекомунікацій і комп'ютерних систем.

Основні положення дисертаційної роботи були успішно впроваджені в практичну діяльність ТЗОВ «Вітертек» та ТЗОВ ВТФ «Контек», що підтверджено відповідними актами впровадження.

У підсумку, дисертація Журавля С.С. пропонує ефективні та актуальні рішення, спрямовані на підвищення надійності, стабільності та продуктивності розподілених сервісних систем – аспектів, що мають вирішальне значення для функціонування сучасних розподілених систем.

Загальна характеристика дисертаційної роботи

Дисертаційна робота спрямована на розв'язання актуального науково-практичного завдання – створення нових методів і моделей, що підвищують ефективність функціонування розподілених сервісних систем (РСС). Запропоновані підходи враховують поточні характеристики мережевого середовища, динаміку мережеских затримок, а також особливості поведінки вузлів у кластері. На основі цього забезпечується формування адаптивних порогових значень для точнішої оцінки стану системи.

Дисертаційна робота включає список умовних скорочень, вступ, чотири основні розділи, висновки, список використаних джерел і два додатки. Загальний обсяг становить 186 сторінок машинописного тексту. Вступ займає 7 сторінок і містить обґрунтування актуальності тематики, формулювання мети, завдань, об'єкта та предмета дослідження, а також виклад наукової новизни,

практичного значення та структури роботи. Основна частина охоплює 151 сторінку, на яких послідовно викладено теоретичні засади, методологію дослідження, результати експериментів і їх аналітичне опрацювання. Для кращого засвоєння матеріалу у тексті наведено 63 рисунки та 6 таблиць. Бібліографія включає 149 джерел, що свідчить про глибоку опору на наукову літературу й практичний досвід у відповідній галузі. У додатках, обсягом 5 сторінок, представлено акти впровадження результатів дослідження, а також повний перелік публікацій автора за темою дисертації.

У вступі дисертації обґрунтовано актуальність теми дослідження в умовах стрімкого розвитку розподілених сервісних систем (РСС), їхнього широкого впровадження в сферу інформаційних технологій, а також зростання вимог до їх надійності та стійкості до відмов. Висвітлено зв'язок обраної тематики з існуючими науковими розробками у суміжних напрямках. У вступі також визначено мету, завдання, об'єкт і предмет дослідження, окреслено методологічну базу, сформульовано наукову новизну та практичне значення отриманих результатів. Окрему увагу приділено даним про апробацію наукових положень, публікаціям автора за темою дисертації, особистому внеску здобувача, а також фактам впровадження розроблених методів у практичну діяльність.

У розділі 1 проведено ґрунтовний аналіз сучасних методів і моделей функціонування розподілених сервісних систем (РСС). Встановлено, що ключовим елементом забезпечення узгодженості даних у таких системах є алгоритми досягнення консенсусу, які дозволяють підтримувати цілісність і послідовність інформації між вузлами навіть у разі часткових або повних відмов окремих компонентів. Наголошено, що забезпечення надійної роботи РСС є складним завданням через динамічну змінність мережевої топології, високу масштабованість і неоднорідність сучасних систем. Це зумовлює необхідність застосування інтелектуальних механізмів адаптації та автоматизованого відновлення працездатності систем. Особливу увагу приділено аналізу підходів до виявлення відмов, серед яких виділяються традиційні евристичні алгоритми, статистичні методи та техніки машинного навчання. У результаті аналізу виокремлено низку актуальних науково-практичних проблем, серед яких – конфлікт між оперативністю реагування на можливу відмову та точністю її діагностики. Це, у свою чергу, підкреслює необхідність створення нових адаптивних методів виявлення відмов з урахуванням прогнозованої складової.

У розділі 2 представлено розробку інноваційних адаптивних методів, спрямованих на підвищення ефективності роботи алгоритмів консенсусу в умовах нестабільного та динамічного мережевого середовища.

Зокрема, запропоновано метод виявлення відмов, який базується на ймовірнісному байесівському підході. Цей підхід дозволяє оцінювати стан

вузлів системи з урахуванням невизначеності мережеских затримок, що значно зменшує ризик хибних рішень у випадках короточасних відмов. Завдяки цьому підвищується точність функціонування консенсусних механізмів.

Крім того, удосконалено метод адаптивного визначення порогу тайм-ауту шляхом прогнозування часу отримання повідомлень від потенційно непрацездатних вузлів. Для цього використано модель SARIMA (Seasonal Autoregressive Integrated Moving Average), яка на основі аналізу історичних мережеских затримок дозволяє динамічно налаштовувати параметри тайм-ауту, адаптуючи систему до поточних умов.

Вперше розроблено автономний адаптивний метод підвищення продуктивності розподілених сервісних систем, що враховує специфіку лідер-орієнтованих алгоритмів консенсусу. Запропонований метод передбачає автоматичну зміну параметрів затримки між вузлами кластера та пріоритетний вибір лідера на основі поточних мережеских характеристик. Додатково вбудована стохастична складова у формування тайм-аутів дозволяє уникнути одночасного запуску процесів виборів, що підвищує стабільність роботи системи загалом.

У розділі 3 здійснено математичне моделювання та аналіз ефективності запропонованих методів, що дозволило оцінити їх практичну придатність у різних сценаріях роботи розподілених сервісних систем.

Застосування ймовірнісного байєсівського підходу дало змогу розраховувати апостеріорну ймовірність відмови вузла, що дозволило зменшити кількість хибно-позитивних спрацювань приблизно на 4–5% у порівнянні з традиційними евристичними методами.

Імітаційна модель кластеру IoT була використана для перевірки роботи методу адаптивного визначення порогу з застосуванням SARIMA-моделі. Моделювання підтвердило, що точне прогнозування часу відповіді дозволяє динамічно налаштовувати тайм-аут і з підвищеною точністю (до 20%) виявляти відмови, чітко розрізняючи нормальні й аномальні стани вузлів системи.

Також за допомогою моделювання підтверджено ефективність автономного методу вибору лідера в умовах нестабільних мережеских характеристик. Отримані результати демонструють його здатність забезпечувати стійке лідерство та стабільність роботи системи навіть при високому рівні коливань затримок.

У розділі 4 розглянуто практичну реалізацію запропонованих рішень та оцінено їхню ефективність в умовах реального імітаційного середовища.

Інтеграція автономного адаптивного методу в імітаційну модель кластерної системи продемонструвала значне зниження ймовірності передчасної реконфігурації – у три рази при стандартному режимі навантаження. У періоди пікової активності, навпаки, зафіксовано додаткове зростання ймовірності своєчасної реконфігурації на 5,6%, що свідчить про

ефективну реакцію системи на зміни у статусі вузлів.

На основі запропонованих підходів створено повноцінний програмно-апаратний комплекс, здатний у режимі реального часу керувати функціонуванням розподіленої сервісної системи. Комплекс реалізує автономне адаптивне управління, що дозволяє не лише підтримувати стабільність, а й підвищувати загальну продуктивність кластера.

Результати впровадження показали зменшення стандартного відхилення мережевої затримки на 44%, а також скорочення ймовірності небажаних реконфігурацій на 4,5%, що є суттєвим внеском у підвищення надійності та передбачуваності роботи РСС.

Основні результати дисертаційного дослідження були успішно апробовані під час трьох міжнародних науково-технічних конференцій і семінарів, де отримали схвальні відгуки від фахівців у сфері інформаційних технологій та телекомунікацій. За темою дисертації опубліковано 9 наукових праць. Серед них – статті у виданнях, що індексуються у провідних науко-метричних базах, зокрема Scopus та Web of Science, що підтверджує наукову новизну та актуальність дослідження на міжнародному рівні. Надійність і прикладна цінність отриманих результатів засвідчені відповідними актами впровадження, що підтверджують готовність запропонованих рішень до практичного використання в сучасних інфокомунікаційних системах.

Зауваження та рекомендації до дисертаційної роботи

1. У першому розділі «Аналіз методів та алгоритмів консенсусу розподілених сервісних систем» варто розширити зміст за рахунок узагальненого аналізу типових сценаріїв відмов у розподілених сервісних системах. Зокрема, структуроване подання основних класів відмов – таких як мережеві затримки, часткова недоступність вузлів, програмні або логічні помилки, часові розсинхронізації тощо – могло б значно поглибити розуміння контексту дослідження. Такий огляд не лише підвищив би прикладну цінність теоретичної частини, але й заклав би міцне підґрунтя для подальшого обґрунтування вибору розроблених методів адаптації та виявлення відмов.

2. Розділ 3 «Моделювання та дослідження продуктивності методів підвищення ефективності розподілених систем», оскільки він, разом із попередніми розділами, охоплює аспекти оцінки ефективності та моделювання в різних умовах, доцільно доповнити коротким аналізом масштабованості розроблених методів виявлення відмов. Зокрема, оцінка їх ефективності в умовах збільшення кількості вузлів або зростання навантаження на систему могла б надати цінну інформацію про їхню поведінку в реальних сценаріях. Такий аспект є особливо важливим під час розгортання РСС у середовищах з обмеженими обчислювальними ресурсами, де оптимальне використання апаратного забезпечення має принципове значення.

3. У підрозділі 2.1 «Метод виявлення відмов у роботі розподілених сервісних систем на основі ймовірнісного баєсівського підходу» доцільно розглянути порівняльний аналіз з альтернативними ймовірнісними моделями. Зокрема, додаткову наукову цінність могло б мати зіставлення баєсівського підходу з іншими концептуально подібними методами, такими як марковські процеси. Такий аналіз не лише розширив би уявлення про спектр можливих підходів до виявлення відмов, а й дозволив би більш аргументовано обґрунтувати вибір саме баєсівської парадигми в умовах нестабільності та неповноти інформації, що характерні для розподілених сервісних систем.

4. У підрозділі 2.2.1 «Адаптивне визначення порогу відмов за рахунок впровадження моделі машинного навчання SARIMA» доцільно надати більш розгорнуте обґрунтування вибору саме моделі SARIMA для прогнозування часових затримок у контексті адаптивного визначення порогу відмов. Це особливо актуально з огляду на наявність широкого спектра сучасних методів аналізу часових рядів, включно з алгоритмами машинного навчання нового покоління. Такий аналіз дозволив би чіткіше продемонструвати переваги SARIMA в умовах, характерних для розподілених сервісних систем.

5. У розділі 4 «Практична реалізація та функціонування розроблених методів підвищення ефективності розподілених сервісних систем» варто доповнити аналіз автономного адаптивного методу розглядом сценаріїв із нерівномірною зміною мережових характеристик вузлів або їхньою гетерогенністю. Зокрема, доцільно оцінити вплив запропонованого механізму на стабільність та справедливість процесу вибору лідера.

6. У деяких випадках ілюстрації містять надмірну кількість дрібних елементів (наприклад, рис. 3.15, рис. 2.3), що ускладнює сприйняття матеріалу. Уніфікація стилю візуального подання сприяла б цілісності викладу та полегшила орієнтацію читача в представлених схемах і процесах.

Загальний висновок

Дисертація Журавля Станіслава Сергійовича на тему «Методи та моделі підвищення ефективності функціонування розподілених сервісних систем» є завершеним самостійним науковим дослідженням, що поєднує глибоку теоретичну базу з високим прикладним потенціалом. Подані зауваження не впливають на загальну якість виконаної роботи та не знижують її наукової або практичної значущості.

У межах дисертації успішно вирішено актуальне науково-практичне завдання – створення нових методів і моделей для підвищення ефективності функціонування РСС на основі адаптивного виявлення відмов з урахуванням динаміки змін мережевої працездатності. Запропоновані підходи передбачають оцінку поточних характеристик мережевого середовища, аналіз затримок та поведінки вузлів у кластері, а також визначення адаптивних порогових значень.

Отримані Журавлем С.С. у дисертаційній роботі наукові та практичні результати є значущими для галузі знань 17 «Електроніка та телекомунікації». Тема і зміст дисертації повністю відповідають спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка».

За науковим рівнем, практичною цінністю, апробацією та публікаціями, повнотою висновків і рекомендацій, дисертаційна робота відповідає вимогам «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України № 44 від 12.01.2022 р. (зі змінами, внесеними згідно з Постановами КМУ № 341 від 21.03.2022 р., № 502 від 19.05.2023 р., № 507 від 03.05.2024 р.), а її автор Журавель Станіслав Сергійович, заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії у галузі знань 17 «Електроніка та телекомунікації» за спеціальністю 172 «Телекомунікації та радіотехніка».

Доктор технічних наук, професор,
професор кафедри інформаційних
радіоелектронних технологій і систем
Вінницького національного
технічного університету



Андрій СЕМЕНОВ

Учений секретар
Вченої ради ВНТУ

к. т. н., доцент, доцент кафедри
безпеки життєдіяльності та
педагогіки безпеки



Інна ВІШТАК