

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

РЕЦЕНЗІЯ

**доцента кафедри інформаційно-комунікаційних технологій
Навчально-наукового інституту інформаційно-комунікаційних
технологій та електронної інженерії
Національного університету «Львівська політехніка»
д.т.н., доц. Максимюка Тараса Андрійовича 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 період стрімкого розвитку цифрових технологій, впровадження сервісно-орієнтованих архітектур, масштабної інтеграції пристроїв Інтернету речей, а також розбудови хмарної та периферійної інфраструктури, розподілені сервісні системи набувають статусу ключових складових сучасного інформаційного середовища. Забезпечення їх безперервного функціонування, узгодженості станів і високої надійності в умовах гетерогенного, динамічного та потенційно нестабільного середовища є одним із пріоритетних завдань сучасної телекомунікаційної та обчислювальної інфраструктури.

Однією з найкритичніших проблем у функціонуванні розподілених систем виступає своєчасне та достовірне виявлення відмов у вузлах системи, що є необхідною передумовою для підтримання стабільності сервісів і запобігання каскадним деградаціям. У сучасних середовищах з розподіленим керуванням, таких як граничні обчислювальні платформи, постає потреба в адаптивних і самоконфігурованих рішеннях, здатних до функціонування в режимі реального часу. Враховуючи зростання складності та масштабів таких систем, значного поширення набувають підходи, що ґрунтуються на методах машинного навчання, ймовірнісного моделювання та статистичного аналізу. У системах, де вартість хибного реагування є співставною з реальною вартістю деградації сервісу, критично важливим є досягнення балансу між чутливістю та специфічністю механізмів виявлення відмов.

Саме тому, актуальним є поставлене в дисертаційній роботі Журавля Станіслава Сергійовича наукове завдання – розроблення нових методів та моделей підвищення ефективності функціонування розподілених сервісних систем з прогнозованим адаптивним виявленням відмов, які враховуватимуть поточні характеристики мережевого середовища, динаміку затримок і поведінку вузлів у кластері та визначати їх порогові значення.

Ступінь обґрунтованості та достовірності основних наукових положень, висновків і рекомендацій

Основні наукові положення, сформульовані у дисертаційній роботі, є теоретично обґрунтованими та узгоджуються з фундаментальними засадами теорії систем зв'язку й концептуальними принципами побудови розподілених інформаційних систем. Запропоновані автором моделі, алгоритми та методи забезпечені належним рівнем формалізації із використанням сучасного математичного апарату, зокрема засобів теорії ймовірностей, математичної статистики та елементів машинного навчання.

Наукові результати, отримані у ході дослідження, пройшли апробацію на міжнародних науково-практичних конференціях, які проводились під егідою IEEE, де отримали позитивну оцінку з боку незалежних експертів галузі та перевірені на практиці, що підтверджено відповідними актами впровадження. Нові наукові результати, які отримані автором доповнюють попередньо відомі наукові дослідження за напрямком дисертаційної роботи.

Наукова новизна дисертаційної роботи

1. 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.

2. 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

3. 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.

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 наукометричних 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, отримані в дисертаційній роботі, мають вагоме практичне значення для проектування сучасних розподілених сервісних систем, здатних забезпечувати високий рівень надійності, адаптивності та відмовостійкості в умовах нестабільного або динамічного мережевого середовища. Запропоновані методи виявлення збоїв, механізми адаптивного керування порогами тайм-аутів та алгоритми автономного вибору лідера суттєво підвищують ефективність реалізації консенсусних протоколів, що є базовим інструментом забезпечення узгодженості в розподілених обчисленнях. У поєднанні ці рішення дають змогу формувати самовідновлювані обчислювальні середовища з мінімальними втратами продуктивності в умовах часткової недоступності вузлів.

З наукової точки зору, виконане дослідження становить значущий внесок у розвиток теорії відмовостійких обчислень, методів динамічного управління сервісними системами, а також в напрямки інтелектуального аналізу часових мережевих характеристик та прогнозування поведінки технічних систем. Особливе значення мають обґрунтовані в роботі підходи до моделювання ймовірності відмов із використанням байєсівських схем прийняття рішень, а також інтеграція статистичної моделі SARIMA у процес динамічного налаштування тайм-аутів у протоколах взаємодії.

Таким чином, результати роботи створюють науково-прикладне підґрунтя для подальшого розвитку автономних розподілених систем, орієнтованих на функціонування у складних, гетерогенних середовищах наступного покоління. Зокрема:

1. З використанням алгоритму розрахунку апостеріорної ймовірності відбою вузла, що є складовою методу виявлення відмов з використанням

ймовірнісного байєсівського підходу вдалося зменшити кількість хибнопозитивних спрацьовувань на 4,5% за рахунок більш гнучкого визначення порогу відмови та оцінки стану функціонування системи.

2. За рахунок впровадження моделі машинного навчання SARIMA, яка забезпечує прогнозування відмов на основі аналізу тайма-ауту між вузлами системи та чітко розмежовує пікові моменти функціонування системи та відмови в обслуговуванні вдалося підвищити точність виявлення збоїв на 20%

3. На основі інтеграції автономного адаптивного методу підвищення ефективності функціонування розподілених сервісних систем у модель кластеру зменшено 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

4. Розроблено алгоритм коригування порогу тайм-ауту, що дало змогу зменшити стандартне відхилення затримки на 44% за рахунок оцінки потенційної придатності до виконання ролі лідера та адаптації значення часу очікування на повідомлення перевірки працездатності.

5. Розроблення програмно-апаратний комплексу на основі автономного адаптивного підходу для управління функціонування розподіленої системи, забезпечило зменшення ймовірності реконфігурації кластеру на 5%

Наукові та практичні результати виконаних досліджень використані в навчальному процесі кафедри інформаційно-комунікаційних технологій Національного університету «Львівська політехніка» для модернізації курсу лекцій для здобувачів другого (магістерського) рівня вищої освіти спеціальності 172 Електронні комунікації та радіотехніка ОНП «Телекомунікації та радіотехніка» з дисципліни «Розподілені сервісні системи та Cloud-технології» та лабораторних робіт з дисциплін «Розподілені інформаційно-комунікаційні мережі» для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти ОПП «Інформаційно-комунікаційні системи». Основні результати дисертаційної роботи використано і впроваджено з метою підвищення ефективності функціонування розподілених сервісних систем при їх інтеграції у сучасні інформаційно-комунікаційні сервісно-орієнтовані мережі, зокрема ТзОВ «Вітертек» та ТзОВ ВТФ «Контех», що підтверджено актами впровадження.

Загальна характеристика дисертаційної роботи

В результаті виконання дисертаційних досліджень розв'язано науково-практичне завдання – розроблення нових методів та моделей підвищення

ефективності функціонування розподілених сервісних систем з прогнозованим адаптивним виявленням відмов, які враховуватимуть поточні характеристики мережевого середовища, динаміку затримок і поведінку вузлів у кластері та визначати їх порогові значення.

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 подано загальну характеристику дисертаційної роботи, обґрунтовано всі процедурні положення та подано зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

У першому розділі здійснено системний аналіз методів і моделей підтримання узгодженості в розподілених сервісних системах. Встановлено, що основним механізмом координації є алгоритми консенсусу, які гарантують цілісність даних між вузлами навіть за наявності відмов. Показано, що критичним чинником їх стійкого функціонування виступає своєчасне виявлення збоїв, реалізоване як класичними схемами моніторингу (heartbeat-сигнали, контроль часу відповіді), так і сучасними статистичними та машинними підходами. Продемонстровано переваги ймовірнісних методів, здатних оцінювати ступінь відмови на основі поведінкових і мережевих метрик, що знижує частоту помилкових спрацювань. Окреслено невирішені проблеми балансування між швидкістю реагування й точністю модулів детектування відмов у середовищах із непередбачуваними затримками та частими реконфігураціями.

Другий розділ присвячено розробленню моделей і методів підвищення ефективності консенсусу. Запропоновано байєсівський метод виявлення відмов, який, на відміну від відомих рішень, корелює ймовірність збою зі стохастично оціненим станом мережі, мінімізуючи кількість хибнопозитивних рішень. Для зменшення частоти непотрібних реконфігурацій удосконалено адаптивне визначення порогового тайм-ауту шляхом прогнозування часу доставки повідомлень за допомогою моделі SARIMA. Це, в свою чергу, дає змогу динамічно підлаштовувати межу спрацювання механізму детектування відмов до поточних мережевих умов. Додатково запропоновано автономний метод вибору лідера, який використовує мережеву затримку як пріоритетну метрику та вводить стохастичну компоненту тайм-ауту, що зменшує ймовірність одночасного переобрання у різних вузлах, що є критичним недоліком базових реалізацій.

У третьому розділі наведено результати чисельного експерименту на моделі кластера розподіленої системи. Використання прогнозованого тайм-ауту на основі SARIMA забезпечило підвищення точності виявлення відмов приблизно на 20 % за збереження низької затримки реакції в умовах

нестабільного каналу. Моделювання процесу вибору лідера в динамічному середовищі підтвердило здатність запропонованого алгоритму підтримувати стабільну топологію кластера та скорочувати кількість непотрібних реконфігурацій.

У четвертому розділі результати інтегровано в імітаційний стенд і програмно-апаратний комплекс. У стандартному режимі ймовірність передчасної реконфігурації знижено утричі, а в періоди пікового навантаження завдяки своєчасному переобранню лідера отримано додаткові 5,6 % підвищення готовності кластера. Реалізація автономного методу дала змогу скоротити стандартне відхилення мережевої затримки на 44 % і зменшити кількість реконфігурацій на 4,5 %, що забезпечило безперервне обслуговування запитів під час навантаження. Інтеграція виявлення відмов і адаптивного тайм-ауту підвищила пропускну здатність системи на ≈ 19.5 %, підтверджуючи здатність запропонованих підходів підвищувати ефективність і передбачуваність роботи розподілених сервісних платформ.

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

Зауваження та рекомендації до дисертаційної роботи

1. Значна частина першого розділу присвячена поясненню теоретичних аспектів функціонування алгоритмів консенсусу розподілених сервісних систем. Доцільніше було проілюструвати принципи функціонування алгоритмів консенсусу розподілених сервісних систем саме у тих аспектах, у яких автором запропоновані вдосконалення.

2. При описі запропонованого методу виявлення відмов у роботі розподілених сервісних систем на основі ймовірнісного байєсівського підходу недостатньо зрозумілим залишається фізичний зміст описаних параметрів відмови вузла, а також тривалість та періодичність моніторингу цих параметрів.

3. При адаптивному визначенні порогу відмов за рахунок впровадження моделі машинного навчання SARIMA не зрозумілим залишається спосіб оцінки якості прогнозу, оскільки елементи розподіленої сервісної системи можуть динамічно змінювати своє розташування в мережі.

4. З тексту четвертого розділу не зовсім зрозуміло, яким чином автор реалізовано модель машинного навчання SARIMA для аналізу та управління доступних мережевих параметрів функціонування розподіленої системи у розробленому програмно-апаратному комплексі, оскільки не наведено відповідних даних про навчальні вибірки та тренування.

5. В дисертаційній роботі не розглянуто альтернативні методи машинного навчання, які могли б враховувати більшу кількість параметрів, наприклад глибокі нейронні мережі або трансформери.

Загальний висновок

Дисертація Журавля Станіслава Сергійовича на тему «Методи та моделі підвищення ефективності функціонування розподілених сервісних систем» є завершеною, самостійно виконаною науковою працею, що має теоретичну і практичну цінність. Наведені зауваження мають уточнювальний характер та не зменшують цінність результатів дисертаційної роботи.

У дисертації розв'язано наукове завдання розроблення нових методів та моделей підвищення ефективності функціонування розподілених сервісних систем з прогнозованим адаптивним виявленням відмов, які враховують поточні характеристики мережевого середовища, динаміку затримок і поведінку вузлів у кластері та визначають їх порогові значення, що має важливе значення для 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 вказаною спеціальністю.

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



Тарас МАКСИМЮК

Підпис д.т.н., доцента Тараса МАКСИМЮКА засвідчую

Проректор
Національного університету
«Львівська політехніка»
д.т.н., доцент



Роман ФЕДОРИШИН