

Голові разової спеціалізованої вченої ради  
Київського національного університету  
будівництва і архітектури  
доктору технічних наук, професору  
Веренич Олені Володимирівні

## **ВІДГУК ОФІЦІЙНОГО ОПОНЕНТА**

доктора технічних наук, професора, завідувача кафедри інформаційних технологій і систем Дніпровського металургійного інституту Українського державного університету науки і технологій **Гнатушенко Вікторії Володимирівни** на дисертаційну роботу **Бугрова Анатолія Анатолійовича** «**Моделі і методи вдосконалення високонавантажених розподілених систем**», що представлена на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 126 «Інформаційні системи та технології» галузі знань 12 «Інформаційні технології»

### **Актуальність теми дисертації.**

Необхідність оперативного реагування на динамічні і непередбачувані зміни навантаження є важливим завданням для багатьох сучасних високонавантажених розподілених систем, зокрема хмарних платформ, мікросервісних архітектур і потокових сервісів. Вирішення цього завдання можливе шляхом вдосконалення адаптивних моделей і методів автоматичного масштабування, що дозволяють забезпечити високий рівень продуктивності та оптимального використання ресурсів, забезпечуючи здатність таких систем ефективно реагувати на непередбачувані коливання навантаження. Дисертаційне дослідження Бугрова Анатолія Анатолійовича, що спрямоване на розробку адаптивних моделей і методів динамічного керування ресурсами сучасних високонавантажених систем, є надзвичайно актуальним в умовах перманентного зростання їх масштабів і складності та вимоги до балансування між продуктивністю, масштабованістю й економічною ефективністю за різних типів навантаження.

### **Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації.**

Наукові положення, висновки і рекомендації дисертації мають високий ступінь обґрунтованості, що ґрунтується на використанні сучасних інструментарію та методів автоматичного масштабування і адаптивного управління ресурсами високонавантажених систем в умовах аномальних і непередбачуваних навантажень, про що свідчить критичний аналіз існуючої

наукової літератури. Мета, що полягає в розробці адаптивної нечіткої регресивної моделі та методу динамічного масштабування ресурсів для високонавантажених розподілених систем, що здатні підтримувати стабільну продуктивність, зменшити витрати обчислювальних ресурсів і оперативно адаптуватися до змін навантаження, визначена чітко і коректно. Об'єкт (високонавантажені розподілені системи, які працюють із великими обсягами даних в умовах змінного навантаження) і предмет (моделі та методи адаптивного масштабування обчислювальних ресурсів у високонавантажених розподілених системах) повністю відповідають темі дослідження. Завдання дослідження повністю відповідають темі роботи і логічно узгоджені з метою роботи, а сформульовані в дисертації наукові положення, висновки і рекомендації відповідають сучасним стандартам галузі інформаційних технологій, підкріплені відповідними публікаціями і заслуговують на визнання та подальше впровадження у високонавантажені системи різного призначення.

### **Наукова новизна отриманих автором результатів.**

Аналіз викладених у дисертаційній роботі «Моделі і методи вдосконалення високонавантажених розподілених систем» наукових положень дає змогу стверджувати, що робота містить низку нових теоретичних і науково прикладних результатів, найбільш суттєвими з яких, на мій погляд, є такі:

1. Вперше розроблено математичну модель динамічного масштабування ресурсів, яка дозволяє скоротити час реакції системи шляхом уникнення жорстких фіксованих порогів через інтеграцію експоненційного згладжування для прогнозування навантаження з нечітким агрегуванням лінгвістичних оцінок.

2. Удосконалено метод оцінювання ефективності масштабування ресурсів, який включає багатокритеріальний аналіз технічних і економічних показників, що дає змогу всебічно оцінити ефективність управління ресурсами.

3. Набули подальшого розвитку концепція комбінованих стратегій управління ресурсами, що інтегрує прогнозні процедури експоненційного згладжування з нечіткими реактивними механізмами автоматичного масштабування систем, і методи аналізу впливу динаміки навантаження на ефективність масштабування, які уточнюють критерії ініціювання процесу залежно від швидкості та амплітуди зміни навантаження і, таким чином, підвищують адаптивність і своєчасність реакції системи на зміни навантаження.

### **Теоретичне та практичне значення одержаних результатів.**

Результати дисертаційного дослідження мають суттєве теоретичне та практичне значення в сфері інформаційних технологій і можуть бути основою для подальшого розвитку адаптивних систем керування ресурсами у високонавантажених розподілених системах. Це засвідчується довідкою про впровадження новітніх теоретичних знань і практичних застосувань у

навчальний процес фахівців галузі інформаційних технологій Київського національного університету будівництва і архітектури та підтверджується потребою автоматичної обробки різномірної інформації, що надходить у різних обсягах із засобів масової інформації, свідчень очевидців, а також отримується від геоінформаційних систем, систем супутникового спостереження і безпілотних літальних апаратів, що також підтверджено Відділом дослідження обсягів, якості та вартості будівельних робіт Лабораторії інженерно-технічних досліджень Київського науково-дослідного інституту судових експертиз Міністерства юстиції України.

### **Повнота викладення основних результатів дисертації в опублікованих працях.**

Ознайомлення з дисертацією та науковими публікаціями Бугрова А. А. дозволяє зробити висновок, що основні положення та результати дисертації представлені в 7 наукових публікаціях, а саме: в 3 наукових статтях у фахових виданнях України категорії «Б», що входять до переліку МОН України; 1 статті в науковому періодичному виданні інших держав, що індексуються в наукометричній базі даних SCOPUS, 2 праці у збірниках матеріалів міжнародних конференцій, що індексуються в наукометричній базі даних Scopus, та 1 публікації тез доповідей на міжнародних науково-практичних конференціях, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації.

В опублікованих роботах висвітлено основні результати дисертаційного дослідження, серед яких: модель інформаційно-комунікаційної системи підтримки процесу відновлення будівель, споруд і об'єктів інфраструктури, модель інтелектуальної системи керування трафіком великого міста, аналіз принципів і методів автоматичного масштабування високонавантажених систем та універсальна схема мікросервісної архітектури модуля обробки і збереження даних, що уніфікує підхід до маніпуляції даними, забезпечуючи ефективну інтеграцію різномірних даних із різних джерел інформації. Кількість і якість публікацій здобувача відповідають вимогам МОН України щодо висвітлення результатів дисертаційних досліджень на здобуття ступеня доктора філософії.

### **Зміст дисертації.**

Дисертаційна робота загальним обсягом 152 сторінки складається з анотації двома мовами, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків.

В *анотації* представлено тему, наукову новизну, основний зміст і ключові слова, що у повній мірі відображають зміст дисертаційної роботи.

У *вступі* автором обґрунтовано актуальність теми дослідження адаптивного керування ресурсами у високонавантажених розподілених системах, показано її зв'язок з науковими програмами, планами, темами та впровадження результатів

роботи в навчальний процес в межах Київського національного університету будівництва і архітектури, сформульовано мету і завдання дослідження, визначено об'єкт, предмет, методи дослідження, аргументовано представлено наукову новизну та практичне значення одержаних результатів, наведено дані щодо апробації результатів дисертації та її структури і обсягу.

У *першому розділі* на основі аналізу інноваційних технологій, архітектурних рішень і підходів, які використовують передові компанії-розробники сучасних високонавантажених розподілених систем визначено, що їх ефективність і стійкість залежить від архітектурних рішень, механізмів керування ресурсами і технологічного стеку. Також на основі критичного аналізу критеріїв надійності та ефективності високонавантажених систем і аналізу співвідношення метрик роботи сучасних розподілених систем автором показано, що масштабованість є одним із ключових показників ефективності, що впливає на її здатність адаптуватися до змін навантаження, гібридне масштабування є найбільш універсальним, а вибір принципів і методів масштабування системи залежить від специфіки застосунку. При цьому визначено, що цю дисертаційну роботу доцільно зосередити на розробці математичної моделі динамічного масштабування ресурсів і методів прогнозування навантаження та масштабування, які стануть теоретичною базою для подальшого підвищення продуктивності і надійності високонавантажених систем спеціального призначення.

У *другому розділі* представлено існуючі моделі та методи автоматичного масштабування і визначено потребу в адаптивних підходах до ефективного керування ресурсами при аномальних і непередбачуваних змінах навантаження. Автором показано, що такі реактивні методи автоматичного масштабування, як метод порогових правил, автоматичне масштабування на основі теорії черг та адаптивні реактивні методи, ефективні у випадках різких змін навантаження, однак мають низку обмежень, що пов'язані з запізненням у реакції на зміну системних параметрів. Також автором з'ясовано, що використання таких проактивних методів автоматичного масштабування, як машинне навчання, розширене навчання з підкріпленням, нечітка логіка і аналіз часових рядів дозволяє передбачати навантаження і завчасно ініціювати масштабування, що зменшує ризик перевантаження системи, проте використання машинного навчання потребує додаткових обчислювальних ресурсів для тренування та оновлення моделей. Таким чином обґрунтовано необхідність розробки і використання комбінованих стратегій, що поєднують прогнозні підходи з механізмами негайного реагування на зміну навантаження.

У *третьому розділі* автором запропоновано адаптивну нечітку регресивну модель для динамічного масштабування ресурсів, яка базується на нечіткій логіці та експоненційному згладжуванні з подвійною корекцією, та адаптивний нечіткий регресивний метод, що на основі зазначеної моделі забезпечує

безперервне формування керуючих впливів шляхом нечіткої регресивної оцінки параметрів масштабування ресурсів. Також розроблено систему нечіткого виведення і сформовано матрицю ваг нечітких термів ступеня завантаженості процесора та оперативної пам'яті. Розроблено рекомендації щодо вибору значень коефіцієнтів, які визначають поведінку механізму прогнозування в системах різних типів, і метод коригування часу масштабування, що визначає оптимальний час для зміни конфігурації ресурсів, забезпечуючи баланс між продуктивністю та витратами на експлуатацію. Описано переваги адаптивної нечіткої регресивної моделі, що не тільки дозволяє оптимізувати баланс між вартістю та продуктивністю, але й дає користувачам повний контроль над вибором інфраструктури, що робить її більш адаптивною і економічно вигідною порівняно з комерційними рішеннями, що прив'язані до конкретних платформ.

У четвертому розділі описано результати експериментальних досліджень адаптивного нечіткого регресивного методу масштабування ресурсів і методу коригування моменту масштабування, які підтверджують їхню ефективність на прикладах таких високонавантажених систем, як геоінформаційні сервіси, транспортні системи та платформи аналізу соціальних мереж. Показано, що запропоновані методи забезпечують своєчасний та економічно ефективний розподіл ресурсів і можуть бути інтегровані у високонавантажені системи різного призначення, типово навантаження яких характеризується різкими піковими навантаження на процесор, періодичними піками та динамічним перерозподілом ліміту використання оперативної пам'яті, забезпечуючи гнучкий і своєчасний розподіл обчислювальних потужностей.

У висновках узагальнено основні результати дисертаційного дослідження, що відповідають поставленій меті та визначають можливі напрямки продовження дослідження.

Список використаних джерел містить 125 найменувань, що свідчить про ґрунтовне опрацювання теми дослідження.

### **Зауваження.**

У цілому, позитивно оцінюючи подану до захисту дисертаційну роботу, водночас, варто звернути увагу на деякі дискусійні положення дисертаційної роботи:

1. Матеріали дисертації переобтяжені необов'язковою англomовною термінологією, яку можна було вилучити або винести у глосарій.

2. У першому розділі простежується нечітке використання окремих термінів автором, що можливо пов'язане з перекладом. Ця нечіткість ускладнює розуміння логіки формування мети дослідження і, хоча чітка постановка задачі в кінці розділу знімає більшість питань, автору слід коректніше оперувати термінологією. Це зауваження стосується назв і змісту другого та третього

розділів, в яких автору слід чіткіше розмежувати існуючі і розроблені моделі і методи масштабування.

3. В третьому розділі бракує аналізу обчислювальної складності адаптивної нечіткої регресивної моделі та методу коригування моменту масштабування. Також відсутні рекомендації щодо апаратних вимог в режимі експлуатації.

4. Четвертий розділ слід було б доповнити інформацією щодо систем, в які планується інтегрувати чи уже інтегровано запропоновані автором адаптивні нечіткі регресивні модель і метод.

5. Є зауваження і питання до рисунків, так: на рис. 3.6 не зрозуміло, яким чином оцінюється ефективність Google Autoscaler (необхідно додати відповідні джерела або власні розрахунки ефективності роботи існуючого рішення).

6. У висновках викладено не всі важливі наукові та практичні результати, а саме: не акцентовано увагу на тому, що запропонована математична модель динамічного масштабування ресурсів і адаптивний нечіткий регресивний метод фактично вирішують прикладну задачу проактивного розподілу ресурсів у хмарній мікросервісній інфраструктурі з нерегулярними піковими навантаженнями. Доцільно чітко сформулювати це як основний практичний результат. При цьому автором розроблено, але не зазначено ані в розділі наукової новизни, ані в описі практичного значення, нечітку систему прийняття рішень, яка враховує поточний стан навантаження та дозволяє уникати недоліків традиційного порогового масштабування. Рекомендую автору переглянути представлені наукову новизну та практичне значення одержаних результатів.

Крім того, в роботі присутні стилістичні, синтаксичні та пунктуаційні помилки і описки.

Вважаю, що висловлені зауваження не є визначальними і не зменшують загальну наукову новизну та практичну значимість результатів та не впливають на позитивну оцінку дисертаційної роботи.

### **Загальна оцінка дисертаційної роботи**

На підставі аналізу дисертаційної роботи Бугрова Анатолія Анатолійовича «Моделі і методи вдосконалення високонавантажених розподілених систем» можна зробити висновок, що вона є завершеним науковим дослідженням, яка містить нові науково обґрунтовані результати у галузі інформаційних технологій. Отримані результати мають суттєве значення для розвитку теорії і практики створення гнучких, економічно ефективних і високопродуктивних розподілених систем.

Дисертація відповідає вимогам, які висуваються до дисертаційних робіт, зокрема зміст дисертації загалом відповідає галузі знань 12 «Інформаційні технології», спеціальності 126 «Інформаційні системи та технології», та «Вимогам до оформлення дисертації», затвердженим Наказом Міністерства освіти і науки

України від 12.01.2017 р. № 40 (із змінами, внесеними згідно з Наказом Міністерства освіти і науки України від 31.05.2019 № 759) та «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженому Постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44 (в редакції постанови Кабінету Міністрів України від 19 травня 2023 р. № 502), а її автор Бугров Анатолій Анатолійович заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії в галузі знань 12 "Інформаційні технології" зі спеціальності 126 «Інформаційні системи та технології».

**Офіційний опонент:**

Професорка кафедри  
інформаційних технологій і систем  
Дніпровського металургійного інституту  
Українського державного університету  
науки і технологій  
доктор технічних наук, професор



Вікторія ГНАТУШЕНКО

Підпис професорки Гнатушенко Вік. В. підтверджую.

Проректор з наукової роботи  
Українського державного  
університету науки і технологій,  
д.т.н, професор



Юрій ПРОЙДАК