

## **РЕЦЕНЗІЯ**

доктора технічних наук, доцента,  
доцента кафедри комп'ютерних систем та мереж  
навчально-наукового інституту фізико-технічних та комп'ютерних наук  
Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича  
Баловсяка Сергія Васильовича  
на дисертаційну роботу аспіранта Кириченка Олександра Олексійовича  
«Оптимізація безсерверних обчислень у хмарних середовищах»,  
подану на здобуття наукового ступеня доктора філософії  
з галузі знань 12 – «Інформаційні технології»  
за спеціальністю 121 – «Інженерія програмного забезпечення»

### **Актуальність дисертаційного дослідження**

На даний час важливим завданням є оптимізація безсерверних обчислень у хмарних середовищах, особливо в умовах нерівномірного навантаження. У випадку автоматичного масштабування обчислювальних ресурсів часто виникають проблеми холодного старту, неефективного використання ресурсів та збільшення затримок у чергах. З метою раціонального використання ресурсів виконується прогнозування навантаження з використанням методів машинного навчання, зокрема, штучних нейронних мереж. Проте, такий підхід потребує складного навчання нейронних мереж та не забезпечує аналітичних гарантій якості обслуговування. Ефективним підходом до оптимізації безсерверних обчислень у хмарних середовищах є побудова математичних моделей на основі теорії систем масового обслуговування неоднорідної структури та їх програмна розробка. Такий підхід реалізовано у дисертаційній роботі Кириченка Олександра Олексійовича, тому розглянута робота є актуальною і відповідає сучасним тенденціям у розвитку хмарних технологій.

### **Зв'язок роботи з державними програмами, планами, темами**

Дисертаційне дослідження Кириченко О.О. виконано на кафедрі програмного забезпечення комп'ютерних систем навчально-наукового інституту фізико-технічних та комп'ютерних наук Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича за держбюджетною тематикою: «Дослідження, моделювання та розробка програмного

забезпечення складних динамічних систем» (Державний реєстраційний номер 0121U109232) та на кафедрі математичних проблем управління і кібернетики Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича за держбюджетною тематикою: «Інформаційні технології в аспекті сучасних задач прийняття рішень» (Державний реєстраційний номер 0121U109159). Дослідження, викладені в дисертаційній роботі Кириченка Олександра Олексійовича, відповідають напрямам науково-дослідних робіт кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем та кафедри математичних проблем управління і кібернетики.

**Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків, рекомендацій, сформульованих у дисертації**

Наукові положення, висновки та результати дисертації Кириченка Олександра Олексійовича обґрунтовані за допомогою загальноприйнятих методів теорії черг для побудови математичних моделей безсерверних обчислювальних систем, теорії випадкових процесів та стохастичного аналізу, математичної статистики для оцінки параметрів моделей на основі метрик хмарних сервісів (AWS CloudWatch, Amazon SQS), оптимізації для визначення оптимальної конфігурації обчислювальних ресурсів. Застосовано новітні хмарні технології для створення та тестування прототипів безсерверного додатку. Аналіз дисертації показує, що автор володіє сучасними методами наукового дослідження та цілеспрямовано їх застосовує. Результати дисертаційної роботи подані логічно та аргументовано. У роботі здійснено ґрунтовний огляд літературних джерел, які є відповідними до тематики дослідження.

Результати, отримані у під час виконання дисертаційного дослідження, опубліковано у 11 наукових роботах. Основні результати опубліковані у чотирьох наукових статтях (2 статті – в журналах, які індексуються у наукометричній базі SCOPUS, 2 статті – в українських фахових виданнях), а також у матеріалах 7 міжнародних наукових конференцій (одна з них індексована в наукометричній базі Scopus).

## Структура дисертації

Дисертація складається зі анотації, вступу, чотирьох розділів та висновків до них, загальних висновків, переліку використаних джерел (194 джерела), чотирьох додатків та списку публікацій автора за темою дисертації (11 наукових робіт). Робота викладена на 245 сторінках. Основні результати дисертації у повній мірі відображені у публікаціях автора.

У *вступі* обґрунтовано актуальність задачі дослідження, описано мету, завдання, предмет, об'єкт та методи дослідження, висвітлено наукову новизну, теоретичне та практичне значення отриманих результатів, наведено структуру дисертаційної роботи.

У *першому розділі* дисертації розглянуто теоретичні основи та огляд літератури у галузі безсерверних обчислень на хмарних платформах, описано ключові концепції безсерверних обчислень, зокрема моделі Function-as-a-Service та Backend-as-a-Service, архітектурні особливості подійно-орієнтованих систем, механізми автоматичного масштабування обчислювальних ресурсів. Проведено аналіз переваг та недоліків безсерверних обчислень, як найбільш критичні визначено проблему холодного старту, залежність від постачальника хмарних послуг та складність моніторингу розподілених систем. Систематизовано метрики оцінювання ефективності безсерверних інформаційних систем, визначено напрями подальших досліджень.

*Другий розділ* присвячений аналізу архітектурних рішень для безсерверних обчислень та розробці архітектури фреймворку для розподіленої обробки даних. Розглянуто роль подієво-орієнтованих архітектур у побудові інтелектуальних систем на хмарних платформах. Показано, що як базовий компонент архітектури для задач асинхронної розподіленої обробки даних доцільно застосовувати системи черг повідомлень. Проведено порівняльний аналіз підходів до реалізації комунікації в реальному часі. Проаналізовано обмеження реактивного масштабування, зокрема холодні старту та непередбачувані затримки. Обґрунтовано актуальність розробки проактивних алгоритмів масштабування на основі прогнозування навантаження.

У *третьому розділі* дисертаційної роботи побудовано математичну модель безсерверної інформаційної системи як неоднорідної системи масового обслуговування зі змішаними режимами роботи. Проведено дослідження властивостей моделі суміші потоків завдань, які формуються як поєднання незалежних неоднорідних пуассонівських процесів. Доведено необхідну та достатню умову обмеженості системи черг та граничні еволюції процесу довжини черги у схемі усереднення та схемі дифузійної апроксимації. Розроблено метод оцінки параметрів суміші вхідного процесу з використанням метрик хмарної платформи AWS. Розроблено алгоритм параметричної оцінки та оптимізації конфігурації безсерверної системи.

*Четвертий розділ* присвячений практичній верифікації теоретичних результатів дослідження та розробці програмного забезпечення інформаційної технології оптимізації безсерверних обчислень на хмарній платформі AWS. У ході першого експерименту досліджено прогнозне автомасштабування на основі нейронних мереж DeepAR. Під час другого експерименту досліджено прогнозне автомасштабування на основі аналітичної моделі з напівмарковськими процесами. У третьому експерименті проведено імітаційне моделювання інтелектуальної системи методом Монте-Карло, що підтвердило переваги моделі суміші потоків. Результати аналізу даних показали переваги аналітичної моделі.

У *висновках* наведено основні результати дисертаційного дослідження.

*Додатки* містять список публікацій автора, відомості про апробацію результатів дисертації, лістинг частини коду програми.

### **Наукова новизна**

У результаті виконання дисертації отримано результати, які містять такі основні пункти наукової новизни:

1. Вперше доведено граничні еволюції для процесу довжини черги у схемі усереднення та схемі дифузійної апроксимації з використанням апарату напівмарковських випадкових еволюцій. Схема усереднення визначає детерміновану траєкторію середнього навантаження Lambda-функції, а схема

дифузійної апроксимації описує випадкові відхилення від цієї траєкторії через стохастичне диференціальне рівняння Іто. Встановлено необхідну та достатню умову обмеженості черги для неоднорідної СМО.

2. Набула подальшого розвитку математична модель безсерверної обчислювальної системи на прикладі AWS Lambda як неоднорідної системи масового обслуговування зі змішаними режимами роботи, у якій вхідний процес визначається сумішшю незалежних неоднорідних пуассонівських процесів з різних джерел подій.

Удосконалено:

- 1) підхід до оцінки кількості відхилених завдань у безсерверних системах з обмеженою чергою на основі нормального наближення, що є узагальненням існуючих результатів з марковською модуляцією на випадок неоднорідного вхідного процесу зі змішаними режимами роботи та неперервним часом;
- 2) алгоритм параметричної оцінки та оптимізації конфігурації безсерверної системи, який на відміну від існуючих підходів на основі машинного навчання використовує аналітичні оцінки теорії масового обслуговування.

### **Практичне значення одержаних результатів**

Практичне значення результатів дослідження полягає у реалізації інформаційної технології оптимізації безсерверних обчислень та програмного забезпечення, що забезпечує прогнозування навантаження та проактивне масштабування ресурсів на хмарній платформі. Експериментальна апробація на реальних наборах даних продемонструвала, що аналітична модель на основі Марковських ланцюгів та напівмарковських процесів забезпечила прискорення обробки даних на 25,8%, зростання пропускної здатності на 21,3% та зменшення холодних стартів до 3% порівняно з класичним реактивним масштабуванням.

Результати дисертаційного дослідження впроваджені в освітній процес Чернівецького національного університету, а також в діяльність компанії Finker Finance B.V. та ФОП Вербицької С.І., що підтверджується актами впровадження.

## **Дискусійні положення та зауваження до змісту дисертаційного дослідження**

1. На рис. 3.5 наведено оцінку параметрів суміші при кількості кластерів  $k=2$ , проте не обґрунтовано вибір кількості кластерів.

2. У підпункті 3.3.5 розглянуто алгоритм параметричної оцінки конфігурації безсерверної системи, відмінністю якого від підходів машинного навчання є можливість отримати явні формули для оптимальних параметрів. Проте не вказано, як в розробленому алгоритмі забезпечується адаптивність до зміни режимів роботи системи, що у випадку машинного навчання вирішується шляхом донавчання на нових наборах даних.

3. У підрозділі 4.1 не наведено графік похибок, які отримуються у результаті навчання моделі DeepAR, що було би корисним для оцінки можливостей моделі.

4. Стовпці на діаграмах (рис. 4.5, рис. 4.6) було б доцільно доповнити числовими підписами значень.

5. На рисунку 4.13 та в таблиці 4.3 ті самі параметри вказано різними мовами.

Вказані зауваження не применшують наукового значення дисертаційного дослідження Кириченка Олександра Олексійовича та не впливають на його загальну позитивну оцінку як самостійного і завершеного.

### **Загальний висновок**

Дисертаційна робота Кириченка Олександра Олексійовича є актуальною, має високу теоретичну та практичну цінність. Висновки й основні положення дисертації є обґрунтованими і мають наукову новизну. Розглянута дисертаційна робота є завершеним науковим дослідженням, у якому зроблено значний внесок у розвиток безсерверних обчислень у хмарних середовищах. Дисертаційна робота Кириченка Олександра Олексійовича «Оптимізація безсерверних обчислень у хмарних середовищах», подана на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 121 – «Інженерія програмного забезпечення» в галузі знань 12 – «Інформаційні технології» за її актуальністю, науково-теоретичним рівнем, новизною розв'язання поставлених завдань, практичним значенням отриманих

результатів цілком відповідає пунктам 6, 7, 8, 9 «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого постановами Кабінету Міністрів України № 44 від 12.01.2022 р. (зі змінами, внесеними згідно з Постановою Кабінету Міністрів України № 341 від 21.03.2022 р., № 502 від 19.05.2023 р., № 507 від 03.05.2024 р.), а також «Вимогам до оформлення дисертації», затверджених Наказом Міністерства освіти і науки України №40 від 12.01.2017 р.

Вважаю, що Кириченко Олександр Олексійович заслуговує на присудження йому наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 121 – «Інженерія програмного забезпечення» в галузі знань 12 – «Інформаційні технології».

Рецензент

доктор технічних наук, доцент,  
доцент кафедри комп'ютерних систем та мереж  
навчально-наукового інституту фізико-технічних  
та комп'ютерних наук  
Чернівецького національного університету  
імені Юрія Федьковича

  
Сергій БАЛОВСЯК

