

ВІДГУК
ОФІЦІЙНОГО ОПОНЕНТА

доктора філософії, доцента

Коппа Андрія Михайловича

на дисертаційну роботу Маковецького Сергія Олександровича на тему
**«Моделі та методи розробки програмного забезпечення для обробки та
передачі інформації у розподілених системах визначення руху об'єктів»,**

подану на здобуття ступеня доктора філософії

за спеціальністю 121 – Інженерія програмного забезпечення

галузі знань 12 – Інформаційні технології

1. Актуальність теми дисертації

Розподілені сенсорні системи сьогодні широко використовуються для розв'язання задач моніторингу та виявлення подій у критично важливих сферах, серед яких охорона об'єктів інфраструктури, екологічний контроль, промислова автоматизація, транспортні системи та оборонні застосування. Постійне збільшення кількості сенсорних вузлів і вимог до оперативності реагування суттєво ускладнює побудову таких систем, особливо в умовах обмежених обчислювальних ресурсів, нестабільних каналів зв'язку та необхідності забезпечення високої надійності функціонування.

Більшість сучасних програмних рішень для оброблення даних бездротових сенсорних мереж побудовані за централізованим або частково децентралізованим принципом, коли остаточне прийняття рішень виконується на координаторі або серверній платформі. Такий підхід зумовлює низку відомих обмежень: збільшення мережевого трафіку зі зростанням кількості вузлів, виникнення додаткових затримок під час передавання даних, залежність від працездатності центрального вузла та підвищення ризиків компрометації інформації через необхідність передавання необроблених даних каналами зв'язку. Для систем реального

часу, що використовуються у критичних застосуваннях, зазначені фактори безпосередньо впливають на своєчасність і достовірність виявлення подій.

Особливий науковий інтерес становить запропонований у дисертації підхід, який розглядає проблему на рівні інженерії програмного забезпечення шляхом перенесення процесу аналізу даних безпосередньо на периферійні вузли сенсорної мережі. Використання автономного прийняття рішень на граничних пристроях дозволяє мінімізувати обсяг передаваних даних, зменшити навантаження на мережеву інфраструктуру, підвищити відмовостійкість програмної системи та забезпечити її функціонування навіть за часткової втрати зв'язку між окремими компонентами. Такий підхід відповідає сучасним тенденціям розвитку edge computing, розподілених обчислень та інтелектуальних кіберфізичних систем.

Отже, дисертаційна робота присвячена розв'язанню актуальної науково-практичної задачі розроблення моделей і методів програмного забезпечення для автономного визначення руху об'єктів у розподілених сенсорних мережах. Запропоновані рішення спрямовані на підвищення ефективності, масштабованості та надійності функціонування таких систем, що визначає актуальність дослідження як для розвитку інженерії програмного забезпечення, так і для практичного впровадження сучасних інформаційних технологій.

2. Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни

Наукова новизна результатів дисертаційного дослідження полягає у наступному:

1. *Вперше* запропоновано модель програмного забезпечення розподіленої системи визначення руху об'єктів у бездротовій сітчастій мережі, яка передбачає виконання на кожному вузлі повного циклу локальної обробки сенсорних сигналів, формування тригерних повідомлень та

прийняття рішень без передавання необроблених даних на центральний вузол, що дає можливість зменшення мережевого навантаження, підвищення автономності вузлів та збереження цілісності подій руху в умовах нестабільного зв'язку.

2. *Вперше* запропоновано метод побудови програмного компонента автономного локального виявлення подій руху на граничному вузлі, який характеризується інтеграцією спектрального виділення інформативних ознак, часової фільтрації та адаптивного оновлення оцінки шумового середовища у самодостатній компонент вузла, придатний до формальної специфікації та повторного використання, що дозволяє автономно приймати рішення з підвищеною достовірністю на ресурсообмежених платформах із самоадаптацією порога.

3. *Удосконалено* метод формальної специфікації та верифікації протоколів інформаційної взаємодії у розподілених системах визначення руху об'єктів, який, на відміну від існуючих підходів, орієнтованих на перевірку окремих сценаріїв обміну або наявності координатного центру, ґрунтується на формалізації станів і переходів взаємодії вузлів у поєднанні з механізмами надлишкової маршрутизації тригерних повідомлень, що дає змогу перевіряти коректність інформаційного обміну, підвищення надійності передавання повідомлень та підтримання стійкого функціонування мережі в автономному режимі.

4. *Удосконалено* метод адаптації алгоритмів цифрового оброблення сигналів до мікроконтролерних платформ з обмеженими ресурсами, який, на відміну від існуючих, передбачає комплексне використання арифметики з фіксованою комою, багаторівневого оброблення сигналів і перерозподілу обчислювальних операцій між етапами локального аналізу, забезпечує зниження обчислювального та енергетичного навантаження на вузол і реалізації децентралізованої обробки сенсорних даних у розподілених системах визначення руху об'єктів.

Таким чином, в дисертаційній роботі поставлене наукове завдання виконано повністю, здобувач повною мірою оволодів методологією наукової діяльності.

3. Оцінка змісту дисертації, її завершеність та дотримання принципів академічної доброчесності

За своїм змістом дисертаційна робота здобувача Маковецького С.О. повністю відповідає Стандарту вищої освіти зі спеціальності 121 – Інженерія програмного забезпечення та напрямкам досліджень відповідно до освітньо-наукової програми «Інженерія програмного забезпечення».

Дисертаційна робота Маковецького С.О. є завершеною науковою працею і свідчить про наявність особистого внеску здобувача у науковий напрям інженерії програмного забезпечення.

Розглянувши звіт подібності за результатами перевірки дисертаційної роботи на текстові співпадіння, можна зробити висновок, що дисертаційна робота Маковецького С.О. є результатом самостійних досліджень здобувача і не містить елементів фальсифікації, компіляції, фабрикації, плагіату та запозичень. Наявні співпадіння є збігами з власними науковими працями здобувача, опублікованими раніше для висвітлення основних результатів дисертації. Використані ідеї, результати і тексти інших авторів мають належні посилання на відповідні джерела.

Отже, дисертаційна робота Маковецького Сергія Олександровича є оригінальною і не містить елементів фальсифікації, компіляції, фабрикації, плагіату та запозичень.

4. Мова та стиль викладення результатів

Дисертаційна робота Маковецького С.О. написана українською мовою. Результати дослідження викладені чітко і послідовно. Стиль викладення

відповідає академічним стандартам, коректно використана спеціалізована термінологія, яка відображає сутність досліджуваної проблематики. Мова роботи є грамотною та коректною, що сприяє ясності і зрозумілості тексту.

Дисертаційна робота складається з анотацій двома мовами, змісту, вступу, п'яти розділів, висновків, переліку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг дисертації складає 241 сторінку.

У першому розділі проведено аналіз сучасного стану розроблення програмного забезпечення для розподілених систем визначення руху об'єктів. Досліджено класи рухомих об'єктів, особливості шумових середовищ, існуючі архітектури бездротових сенсорних мереж, методи цифрового оброблення сигналів та програмні засоби для вбудованих систем. Визначено обмеження існуючих підходів, сформульовано вимоги до програмного забезпечення, наукову проблему, гіпотезу та постановку задачі дослідження.

У другому розділі запропоновано моделі та методи проєктування програмного забезпечення розподіленої системи визначення руху об'єктів. Розроблено дворівневу архітектурну модель Edge-Fog, формалізовано інформаційні потоки, запропоновано метод семантичного стиснення даних, виконано специфікацію та формальну верифікацію протоколів обміну, побудовано модель енергоспоживання програмного забезпечення та метод локального оброблення даних на граничному вузлі.

У третьому розділі розроблено методи адаптації й оптимізації алгоритмічного програмного забезпечення для вбудованих систем. Запропоновано підхід до реалізації алгоритмів цифрового оброблення сигналів на ресурсообмежених платформах, метод часово-спектральної адаптації шумового фону, виконано аналіз обчислювальної складності та досліджено ефективність запропонованих алгоритмів у порівнянні з існуючими рішеннями.

У четвертому розділі наведено результати експериментального дослідження та валідації розроблених моделей і методів. Виконано натурні та імітаційні експерименти, проведено інтеграційне оцінювання розподіленої

архітектури, досліджено продуктивність програмної реалізації, її часові характеристики, обчислювальну ефективність, масштабованість і стійкість до завад, а також проаналізовано загрози валідності отриманих результатів.

У п'ятому розділі запропоновано методи підвищення ефективності визначення рухомих об'єктів у розподілених системах. Узагальнено підходи до підвищення достовірності виявлення подій, оптимізації програмної реалізації на мікроконтролерах, підвищення ефективності передавання даних у mesh-мережах та забезпечення завадостійкості системи, а також сформульовано практичні рекомендації щодо комплексної інтеграції запропонованих методів.

Дисертаційна робота оформлена відповідно до вимог наказу МОН України від 12 січня 2017 р. № 40 «Про затвердження вимог до оформлення дисертації».

5. Оприлюднення результатів дисертаційної роботи

Наукові результати дисертації висвітлені у 12 наукових працях, серед яких: 1 стаття у виданні, що індексується в наукометричних базах Scopus та Web of Science; 2 статті у наукових виданнях, включених на дату опублікування до переліку наукових фахових видань України; 5 праць, що додатково відображають результати дисертації, препринти; 4 праці, що засвідчують апробацію матеріалів дисертації.

У наукових публікаціях здобувача якісно та на високому рівні висвітлені результати його дисертаційного дослідження. В усіх наукових публікаціях здобувача дотримано принципи академічної доброчесності, що виражається у відповідному цитуванні використаних джерел та відсутності будь-яких форм плагіату.

Отже, наукові результати описані в дисертаційній роботі повністю висвітлені у наукових публікаціях здобувача.

6. Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи

1. У розділі 2 запропоновано дворівневу архітектуру програмного забезпечення розподіленої системи Edge-Fog, проте для її представлення варто було б використати одну з формальних нотацій у галузі інженерії програмного забезпечення, наприклад діаграми компонентів і розгортання мови UML.

2. На рисунку 2.2 здобувачем наведено компонентну структура програмного забезпечення граничного вузла, проте недостатньо пояснено, яким чином зв'язані та взаємодіють між собою компоненти цієї структури. Доцільним було б використати формальну нотацію, наприклад, діаграму компонентів мови UML, показавши зв'язки між компонентами на основі різних типів з'єднань та інтерфейсів.

3. У розділі 3 на рисунку 3.3 представлено об'єктно-функціональну структуру алгоритмічного програмного забезпечення граничного вузла, яку доцільно було б описати за допомогою окремих діаграм UML (класів – для подання об'єктно-орієнтованої структури, діяльності – для подання операцій), що було б більш коректним з формальної точки зору для сфери інженерії програмного забезпечення.

4. З точки зору інженерії програмного забезпечення, у дисертації було б доцільним представляти запропоновані алгоритми (наприклад, алгоритм методу часово-спектральної адаптації шумового поверху в підрозділі 3.3) формалізовано, за допомогою діаграм діяльності мови UML.

5. У розділі 4 запропоновано архітектуру фреймворку імітаційного моделювання методом Монте-Карло, хоча фактично на рисунку 4.5 наведено етапи виконання експерименту та оброблення даних. З точки зору інженерії програмного забезпечення, архітектура є описом компонентів системи, їх інтерфейсів і взаємодії, тоді як наведена структура більш схожа на схему послідовності виконання експерименту.

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

7. Висновок про дисертаційну роботу

Вважаю, що дисертаційна робота здобувача ступеня доктора філософії Маковецького Сергія Олександровича на тему «Моделі та методи розробки програмного забезпечення для обробки та передачі інформації у розподілених системах визначення руху об'єктів» виконана на високому науковому рівні, не порушує принципів академічної доброчесності та є закінченим науковим дослідженням, сукупність теоретичних та практичних результатів якого розв'язує наукове завдання, що має істотне значення для галузі знань 12 – Інформаційні технології. Дисертаційна робота за актуальністю, практичною цінністю та науковою новизною повністю відповідає вимогам чинного законодавства України, що передбачені в п. 6–9 «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 від 12 січня 2022 р. № 44.

Здобувач Маковецький Сергій Олександрович заслуговує на присудження ступеня доктора філософії в галузі знань 12 – Інформаційні технології за спеціальністю 121 – Інженерія програмного забезпечення.

Офіційний опонент:
доктор філософії, доцент,
завідувач кафедри програмної інженерії
та інтелектуальних технологій управління
Національного технічного університету
«Харківський політехнічний інститут»



Андрій КОПП

Особистий
засвідчує
6.0. Професор
з кафедри
Копія АМ.
Алексей Перін

