

## РЕЦЕНЗІЯ

доктора технічних наук, професора, професора кафедри телекомунікаційних та радіоелектронних систем Національного авіаційного університету

**Заліського Максима Юрійовича**

на дисертацію **Закутинського Ігоря Володимировича**

«Система Інтернету речей для моніторингу та управління громадським транспортом», представлену на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

### **Актуальність теми дисертаційної роботи**

Сьогодні спостерігаються безперервні процеси урбанізації, які в свою чергу створюють нові виклики та завдання для інфраструктури сучасного міста. Однією зі сфер, що зазнає найбільшого впливу, є громадський транспорт. Загальний стан і якість громадського транспорту стають критичними для забезпечення міської мобільності, зменшення заторів на дорогах та вирішення екологічних проблем. У зв'язку з цим побудова транспортних систем на основі концепції Інтернету речей (IoT) є перспективним підходом. Застосування цієї концепції дозволяє побудувати інтелектуальні мережі, де різні компоненти транспортної інфраструктури можуть обмінюватися даними в режимі реального часу, що забезпечує можливості для моніторингу, подальшого аналізу та оптимізації роботи системи загалом.

Отже, розробка та наукове обґрунтування методів побудови інтелектуальних транспортних систем на основі концепції Інтернету речей є актуальною задачею.

### **Зв'язок з науковими програмами, планами, темами**

Тема дисертаційної роботи відповідає Національній транспортній стратегії України на період до 2030 року (Розпорядження Кабінету Міністрів України від 30 травня 2018 р., № 430-р). Крім того, тематика дисертаційного дослідження безпосередньо пов'язана з рішенням науково-технічних завдань, які

відповідають положенням Закону України «Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки» (стаття 3, п.2) від 11 липня 2001 р.; Закону України «Про пріоритетні напрями інноваційної діяльності в Україні» (стаття 4, п.2 і п.7) від 5 грудня 2012 р.; «Концепції розвитку телекомунікацій в Україні», затвердженої розпорядженням Кабінету Міністрів України № 316-р від 7 червня 2006 р.

### **Наукова новизна**

У результаті проведеного дисертаційного дослідження отримано такі нові наукові результати:

*Вперше:*

- запропоновано метод балансування навантаження в розподілених системах Інтернету речей на основі багатокритеріального моніторингу стану активних обчислювальних контейнерів, дозволяє підвищити його ефективність на 40% – 65%;

- розроблено математичну модель для врахування динамічного навантаження, що дозволило визначити оптимальну кількість обчислювальних ресурсів при нерівномірному навантаженні;

- розроблено математичну модель для моделювання підсистеми збереження та обробки даних у системах Інтернету речей, що дозволило оцінити вплив архітектури та конфігурації компонентів підсистеми на її пропускну здатність та оцінити загальну ефективність системи.

*Отримав подальший розвиток:*

- метод прогнозування часових рядів за рахунок попередньої обробки вхідних даних телекомунікаційної мережі та метод рекурентних нейронних мереж для оцінки ризиків виникнення дорожньо-транспортних пригод (ДТП).

### **Практична значущість**

У ході дисертаційного дослідження запропоновано методiku визначення оптимальної технології передачі даних в телекомунікаційній IoT мережі, яку апробовано під час дослідження NB-IoT стандарту в інтелектуальних

транспортних системах. Використання цієї методики дозволило оцінити переваги та недоліки вказаного стандарту в порівнянні з класичним LTE з'єднанням в міських умовах. Крім того, розроблено програмний комплекс для дослідження впливу протоколів програмного рівня на швидкість передачі та пропускну здатність в мережі системи Інтернету речей.

Автором запропоновано алгоритм автоматичного розгортання розподіленої архітектури IoT мережі для інтелектуальної системи міського транспорту, а також алгоритм оцінки продуктивності системи із застосуванням програмних емуляторів IoT пристроїв.

### **Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків та рекомендацій**

Дисертаційне дослідження охоплює широкий спектр науково-технічних завдань, характеризується глибиною і комплексністю. Автором було змістовно та послідовно обґрунтовано пропозиції, які викладені у дисертаційному дослідженні. Робота є логічною, матеріал структурованим, а поставлені завдання є чіткими. Їх рішення повністю аргументовані, що базується на коректному використанні математичного апарату, великій кількості числових розрахунків з використанням наукових методів аналізу. Це забезпечує високий рівень наукової обґрунтованості положень зазначеної дисертаційної роботи.

### **Характеристика основних положень роботи**

Оформленням та викладенням матеріалів дослідження дисертаційної роботи є стандартним для робіт на отримання наукового ступеню доктора філософії. Викладення матеріалу дослідження починається з анотації, вступу, чотирьох розділів, висновків та рекомендацій і закінчується наведенням списку використаних джерел та додатків. Список використаних джерел складає 108 найменувань і займає 16 сторінок. Обсяг роботи складає 184 сторінки, що відповідає вимогам.

У *вступі* визначено актуальність теми досліджень, зв'язок з науковими програмами та темами, сформульовано мету роботи та задачі досліджень, визначено об'єкт та предмет дослідження, визначено методи досліджень, наведено наукову новизну та практичну цінність отриманих результатів, наведено відомості про апробацію та публікацію результатів дисертації.

В *першому розділі* проведено аналіз поточного стану розвитку інтелектуальних систем для моніторингу та управління громадським транспортом. Автором проведено аналіз наукових методів побудови систем Інтернету речей загалом, а також в контексті їх застосування для розробки інтелектуальних систем громадського транспорту. На основі цього аналізу виділено основні тренди наукових досліджень та ряд невирішених проблем і напрямків, які потребують розробки нових рішень або вдосконалення вже існуючих.

У *другому розділі* розроблено структуру телекомунікаційної мережі, яка забезпечує передачу даних у режимі реального часу. Обґрунтування запропонованої структури проводиться на основі проведених експериментів. Зокрема, для дослідження бездротових технологій передачі даних LTE та NB-IoT проводиться експеримент в міських умовах, де визначається вплив рівня сигналу на параметри передачі даних та енергоспоживання системи. Для дослідження протоколів програмного рівня розроблено середовище тестування, в якому симулюються різні сценарії поведінки IoT мережі. Для оцінки впливу архітектури системи та конфігурації її окремих компонентів на пропускну здатність та загальну продуктивність було розроблено математичну модель, яка дозволила виконати моделювання функціонування IoT системи на основі розподіленої архітектури.

У *третьому розділі* дослідження проводиться розробка системи збереження та обробки даних. Спочатку було сформульовано основні завдання цієї системи та побудовано її функціональну схему й архітектуру. Далі розглядалися завдання забезпечення надійності, масштабованості системи та

оптимального використання обчислювальних ресурсів. Для розв'язання вищенаведених завдань розроблено та апробовано ряд методів та алгоритмів, серед яких: 1) метод визначення оптимальної кількості обчислювальних контейнерів в розподілених системах Інтернету речей; 2) метод балансування навантаження в розподілених IoT системах на основі багатопараметричного моніторингу. Автор також розглядає можливість застосування нейронних мереж для обробки даних телекомунікаційної мережі для прогнозування пасажиропотоку та визначення ймовірності виникнення ДТП.

*Четвертий розділ* присвячений реалізації інтелектуальної системи громадського транспорту на основі запропонованих автором методів. Крім того, розроблено алгоритм процесу розгортання програмного забезпечення на серверах. Проаналізовано та обґрунтовано відповідність розробленої системи основним стандартам захисту інформації. З метою оцінки ефективності розробленої системи запропоновано методіку тестування по ключових характеристиках робастності. Ця методика може служити для порівняння систем. Результати оцінки свідчать про переваги запропонованої IoT системи у порівнянні з аналогами.

*Висновки* містять основні наукові результати дисертаційної роботи, які засвідчують вирішення сформульованого комплексу науково-технічних завдань у повному обсязі.

У *додатках* містяться акти впровадження результатів дисертаційної роботи та програмні коди.

Отже, зміст дисертаційного дослідження відповідає її назві. Структура дисертації відповідає прийнятим для наукового дослідження вимогам. Усі положення, які винесені на захист, висвітлені в тексті дисертації та відповідають освітнім компонентам освітньо-наукової програми «Телекомунікації та радіотехніка» за спеціальністю 172 «Телекомунікації та радіотехніка».

## **Повнота викладення матеріалів дисертації у роботах, які опубліковані автором**

Основні результати опубліковані в 13 наукових працях. При цьому 8 статей видані в періодичних наукових виданнях, з яких 2 проіндексовані міжнародною наукометричною базою даних. Серед публікацій 2 наукові роботи написані дисертантом особисто, інші – у співавторстві. Окрім того, отримані результати були представлені в 5 публікаціях у матеріалах міжнародних науково-технічних та науково-практичних конференцій.

## **Зауваження щодо змісту та оформлення дисертації**

1. У параграфі 3.3.1 на сторінках 80 – 86 наводяться два існуючих методи для визначення оптимальної кількості обчислювальних ресурсів (контейнерів) та пропонується власний метод на основі MILP моделі. Однак, недостатньо проаналізовані їх переваги та недоліки, а отже, не до кінця зрозумілий ефект від впровадження запропонованого методу.

2. У розділі 3 пропонується метод балансування навантаження в розподілених IoT системах на основі багатопараметричного моніторингу та наводиться реалізація алгоритму для MQTT протоколу. Бажано було б також показати можливість застосування зазначеного методу для інших протоколів передачі даних, які застосовуються в IoT системах, зокрема для тих, які зазначені у розділі 2.

3. У параграфі 3.2.2 на сторінці 94 автор застосовує векторні відстані для визначення коефіцієнта рівномірності розподілу навантаження. Однак зв'язок між цими параметрами не наводиться та не зрозуміло, як визначити межу між «великим» та «маленьким» значеннями агрегованої метрики середньої відстані для прийняття рішення щодо рівномірності чи нерівномірності розподілу навантаження.

4. Для графіків на рис. 3.11 та 3.12 на сторінках 98 та 99 не зазначена назва осі абсцис. Крім того, роздільна здатність цих рисунків є незадовільною.

### Висновок

Дисертаційна робота Закутинського Ігоря Володимировича на тему «Система Інтернету речей для моніторингу та управління громадським транспортом» є завершеним дослідженням, виконаним здобувачем самостійно на високому науковому рівні. Дисертаційна робота характеризується чіткістю змісту та містить нові науково обґрунтовані теоретичні та експериментальні результати, які мають наукову новизну, теоретичне та практичне значення. Тема дисертації та її зміст відповідають освітнім компонентам освітньо-наукової програми «Телекомунікації та радіотехніка» за спеціальністю 172 «Телекомунікації та радіотехніка» та вимогам «Порядку підготовки здобувачів вищої освіти ступеня доктора філософії та доктора наук у вищих навчальних закладах (наукових установах)», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 23 березня 2016 року № 261 (зі змінами і доповненнями від 3 квітня 2019 року № 283), вимогам пп. 6, 7, 8 та 9 «Порядку присудження ступеня доктора філософії», затвердженому постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 року № 44, а отже, автор дисертаційної роботи, **Закутинський Ігор Володимирович**, заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 172 «Телекомунікації та радіотехніка».

### Рецензент

доктор технічних наук, професор,  
 професор кафедри телекомунікаційних  
 та радіоелектронних систем

Національного авіаційного університету



**Максим ЗАЛІСЬКИЙ**

