

## ВІДГУК

офіційного опонента, доктора технічних наук, професора Сайка Володимира Григоровича, професора кафедри прикладних інформаційних систем Київського національного університету імені Тараса Шевченка на дисертаційну роботу Закутинського Ігоря Володимировича «Система Інтернету речей для моніторингу та управління громадським транспортом», представлену на здобуття наукового ступеня доктора філософії в галузі знань 17 «Електроніка та телекомунікації» за спеціальністю 172 «Електронні комунікації та радіотехніка», складений на підставі вивчення дисертації та наукових праць дисертанта

На сьогоднішній день, у світі спостерігаються стрімкі процеси урбанізації, коли все більша і більша частина населення переїжджає жити в міські регіони. Більше половини населення світу зараз живе в містах, і за прогнозом Світового банку до 2050 року цей показник зросте майже до 70%. В Україні понад 70% населення проживає в містах, що робить її однією з найбільш урбанізованих країн Європи. Громадський транспорт є критично важливим компонентом міської інфраструктури, який значною мірою формує якість життя в сучасному місті. Незалежно від розміру міста, оптимізація системи громадського транспорту стає ключовою задачею, що визначає ефективність транспортної системи та життя у місті загалом. У цьому контексті концепція Інтернету речей (IoT) є однією з найбільш перспективних технологій для розробки нових та вдосконалення вже існуючих систем громадського транспорту. IoT дозволяє побудувати інтелектуальні мережі, де різні складові транспортної інфраструктури можуть обмінюватися даними та взаємодіяти з операторами та пасажиром в режимі реального часу. Це, в свою чергу, надає можливості для моніторингу та аналізу даних і сприяє створенню більш безпечних, ефективних та зручних транспортних систем.

Тому, тема дисертаційного дослідження є актуальною та доречною на сьогоднішній день.

Дисертація складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатку. Матеріал дисертації викладено у логічній послідовності відповідно до поставленої методології дослідження та сформульованих задач. Їх рішення розкрито повністю, матеріал викладено грамотною технічною мовою.

Зміст дисертації, об'єкт і предмет дослідження відповідають галузі знань 17 – «Електроніка та телекомунікації», спеціальності 172 – «Електронні комунікації та радіотехніка» як за формулою спеціальності так і за напрямом дослідження.

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. Також проведено аналіз наукових методів побудови систем Інтернету речей в цілому, а також в контексті їх застосування для розробки інтелектуальних систем громадського транспорту. На основі проведеного аналізу виділено основні тренди наукових досліджень, а також ряд невирішених проблем та напрямків які потребують розробки нових рішень, або вдосконалення вже існуючих. Крім того, розроблено методіку проведення дослідження, в якій сформульований алгоритм виконання науково-технічних задач дослідження.

В другому розділі розроблено структуру телекомунікаційної мережі, яка забезпечує передачу даних в режимі реального часу. Обґрунтування запропонованої структури проводиться на основі проведених науково - практичних 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, а також конфігурації її окремих компонентів на пропускну здатність та загальну продуктивність, розроблено математичну модель з метою моделювання функціонування IoT системи на основі розподіленої архітектури.

У третьому розділі дослідження проводиться розробка системи збереження та обробки даних. На першому етапі сформульовано основні завдання даної системи, а також побудовано її функціональну схему та архітектуру. На наступному етапі розглядалися проблеми забезпечення надійності, масштабованості системи, а також проблеми оптимального використання обчислювальних ресурсів. Для розв'язання вищенаведених проблем було розроблено та апробовано комплекс методів та алгоритмів, які на них базуються. А саме: метод визначення оптимальної кількості обчислювальних контейнерів в розподілених системах Інтернету речей, а також метод балансування навантаження в розподілених IoT системах на основі багатопараметричного моніторингу. Також, в даному розділі розглянуто можливість застосування методів нейронних мереж для обробки даних телекомунікаційної мережі в рамках запропонованої системи збереження та обробки даних. На основі розробленого алгоритму формування даних телекомунікаційної мережі для навчання нейронних мереж, отримано моделі для прогнозування пасажиропотоку та визначення ймовірності виникнення ДТП.

В четвертому розділі автором реалізована інтелектуальна система громадського транспорту на основі запропонованих методів. Крім того, розроблено алгоритм процесу розгортання програмного забезпечення на серверах. Також в даному розділі проаналізовано та обґрунтовано відповідність розробленої системи основним стандартам захисту інформації. Для проведення оцінки ефективності розробленої системи, а також її порівняння з існуючими комерційними рішеннями запропоновано методіку тестування. Оцінка

ефективності вищенаведених систем проводилась по ключових характеристиках робастності системи, які були виділені в завданні даного дослідження. Результати оцінки свідчать про переваги запропонованої IoT системи у порівнянні з аналогами.

Висновки містять основні результати дисертаційної роботи, які вирішують сформульовані задачі.

**Обґрунтованість положень, висновків та рекомендацій** базується на коректності використання здобувачем методів у галузі математичного моделювання, експериментальних досліджень, та теорії нейронних мереж, про що свідчить ретельність та послідовність, з якою викладено відповідний теоретичний матеріал дослідження. Крім того, можна відзначити взаємоузгодженість отриманих результатів експериментальних даних та чисельних розрахунків, отриманих за допомогою розроблених методів.

**Наукова новизна отриманих результатів** полягає в тому, що:

1. Вперше запропонований метод балансування навантаження в розподілених системах Інтернету речей, який на відмінну від існуючих виконує балансування навантаження в мережі на основі багатопараметричного моніторингу стану активних обчислювальних контейнерів, дозволяє підвищити ефективність балансування навантаження на 40% - 65%.

2. Вперше запропонований метод визначення оптимальної кількості обчислювальних ресурсів. Даний метод реалізований на основі розробленої математичної моделі, яка на відмінну від існуючих враховує динамічне навантаження, яке генерується IoT пристроєм, що дозволяє покращити ефективність серверних обчислень при нерівномірному навантаженні.

3. Вперше розроблено математичну модель для моделювання підсистеми збереження та обробки даних в системах Інтернету речей. Розроблена математична модель дозволяє оцінити вплив архітектури та конфігурації компонентів підсистеми на її пропускну здатність, а також оцінити загальну ефективність системи на основі функцій розподілу швидкості обробки даних.

4. Отримав подальший розвиток метод прогнозування часових рядів за рахунок попередньої обробки вхідних даних телекомунікаційної мережі за запропонованим алгоритмом на основі LSTM архітектури для прогнозування пасажиропотоку міського транспорту і виявлення аномалій, а також метод рекурентних нейронних мереж для оцінки ризиків виникнення дорожньо-транспортних пригод (ДТП).

**Практичне значення одержаних результатів.** Практично вагомими вважаються такі результати:

1. Запропоновано методику визначення оптимальної технології передачі даних в телекомунікаційній IoT мережі, який полягає в проведенні комплексу експериментальних досліджень передачі даних між пристроєм Інтернету речей та обчислювальним сервером. На основі якого, проведено дослідження NB-IoT стандарту для побудови телекомунікаційної мережі в інтелектуальних транспортних системах. Дослідження дозволили оцінити переваги та недоліки даного стандарту в порівнянні з класичним LTE з'єднанням в міських умовах.

2. Розроблено програмний комплекс для дослідження впливу протоколів програмного рівня на швидкість передачі та пропускну здатність в мережі системи Інтернету речей.

3. Розроблено програмний продукт згідно математичної моделі процесу функціонування IoT мережі, який дає можливість оцінити можливе навантаження, та правильно спроектувати серверну архітектуру та конфігурацію системи.

Публікації автора є ґрунтовно підготовленими. Основні результати дисертаційного дослідження були опубліковані в 12 наукових працях. Зокрема 7 статей в наукових журналах, 3 з яких проіндексовані міжнародними наукометричними базами даних. Також отримані результати були представлені в 5 публікаціях у матеріалах міжнародних науково-технічних та науково-практичних конференцій.

**Зауваження та недоліки дисертаційної роботи:**

1. На с. 67-68, в таблицях з результатами експерименту не наведене значення вимірювання співвідношення сигнал-шум.

2. Запропоновану у розділі 2.5 математичну модель для симуляції поведінки IoT системи на основі розподіленої архітектури, доцільніше було б навести у розділі 3, після обґрунтування вибору розподіленої архітектури системи.

3. У розділ 3.1.1 недостатньо детально висвітлена відмінність між розглянутими методами визначення оптимальної кількості обчислювальних ресурсів. З висновків не зрозуміло, яким чином оцінюється ефективність вищенаведених методів.

4. В роботі існують граматичні та стилістичні помилки, наприклад:

- графіки 3.11 та 3.12 мають погану роздільну здатність;
- застосування термінів «симуляція» та «емуляція» для одного і того ж поняття
- на стор. 70 помилка у слові «стійкість»

Наведені у результаті аналізу роботи зауваження не носять принципового характеру та жодним чином не знижують позитивне враження про роботу та її наукову та практичну цінність.

В результаті опрацювання представленої дисертації і наукових робіт дисертанта можна зробити висновок щодо відповідності дисертаційної роботи вимогам Порядку підготовки здобувачів вищої освіти ступеня доктора філософії та доктора наук у вищих навчальних закладах (наукових установах) та сформулювати наступне.

1. Дисертація Закутинського Ігоря Володимировича «Система Інтернету речей для моніторингу та управління громадським транспортом» є завершеною науковою працею, що характеризується єдністю змісту і в якій одержані нові наукові результати, що в цілому є суттєвими для розвитку технологій Інтернету речей. У тексті дисертації використано сучасну науково-технічну термінологію.

2. Дисертація відповідає галузі знань 17 «Електроніка та телекомунікації» та спеціальності 172 «Електронні комунікації та радіотехніка».

3. Згідно 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. 6,7,8,9 «Порядку присудження ступеня доктора філософії», затвердженому постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 року № 44 вважаю, що робота відповідає вимогам, що пред'являються до дисертації на здобуття наукового ступеня доктора філософії, а її автор, Закутинський Ігор Володимирович, заслуговує присудження наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 17 «Електроніка та телекомунікації» за спеціальністю 172 «Електронні комунікації та радіотехніка».

Офіційний опонент:

професор кафедри прикладних  
інформаційних систем Київського  
національного університету  
імені Тараса Шевченка, д.т.н.

Володимир Сайко



ПІДПИС ЗАСВІДЧУЮ  
ПРОРЕКТОР  
З НАУКОВОЇ РОБОТИ  
ГАННА ТОЛСТАНОВА