

Голові разової спеціалізованої вченої ради
Національного університету «Львівська політехніка»
доктору технічних наук, доценту
Бешлею М.І.

ВІДГУК ОФІЦІЙНОГО ОПОНЕНТА
професора кафедри інфокомунікаційних систем і технологій
Вінницького національного технічного університету
д.т.н., доц. Михалевського Дмитра Валерійовича
на дисертаційну роботу Пирога Ярослава Романовича
"Підвищення ефективності функціонування безпроводних сенсорних мереж
на основі генетичного алгоритму",
подану до захисту на здобуття наукового ступеня доктора філософії за
спеціальністю 172 «Телекомунікації та радіотехніка» в галузі знань
17 «Електроніка та телекомунікації»

1. Оцінка актуальності теми дисертаційної роботи

Активне впровадження концепцій Інтернету речей, «розумних» інфраструктур і інтелектуальних систем моніторингу зумовлює зростання вимог до надійності та адаптивності безпроводних сенсорних мереж (БСМ), що функціонують в умовах динамічно змінної топології та обмежених ресурсів.

Характерною особливістю БСМ є поєднання обмежених ресурсів сенсорних вузлів із високою динамічністю мережевої топології. Зміна положення вузлів, варіативність радіусів їх дії та необхідність масштабування мережі суттєво ускладнюють реалізацію ефективних алгоритмів маршрутизації й просторового розміщення. У таких умовах використання класичних алгоритмів оптимізації часто призводить до локально оптимальних, але нестійких рішень, що не гарантують належного рівня якості обслуговування.

Одним із перспективних напрямів підвищення ефективності функціонування БСМ є застосування методів еволюційної оптимізації, які дозволяють здійснювати пошук рішень у великих масивах параметрів і адаптуватися до змін топології без необхідності повного перерахунку конфігурацій мережі.

Генетичні алгоритми (ГА), побудовані на принципах еволюційного пошуку, забезпечують природну здатність до адаптації рішень за рахунок механізмів

селекції, схрещування та мутації, що дозволяє ефективно реагувати на зміни параметрів середовища передачі інформації без повної перебудови алгоритмічної структури.

Додатковим аргументом на користь використання ГА є багатокритеріальний характер показників якості функціонування сенсорних безпроводних мереж. Оцінка ефективності маршрутизації або конфігурації мережі, як правило, не може бути зведена до одного параметра, а потребує одночасного врахування декількох або цілої множини показників та факторів. Відповідно доцільність використання ГА для задач оптимізації БСМ обумовлена їх здатністю забезпечувати глобальний пошук рішень у складному багатовимірному просторі, адаптацію до динамічних змін мережевого середовища, ефективну інтеграцію багатьох показників якості та стійкість до невизначеності вхідних даних.

Отже, поставлене у дисертаційній роботі наукове завдання – підвищення ефективності функціонування безпроводних сенсорних мереж шляхом розробки методів розміщення сенсорних вузлів та визначення маршруту і множини резервних маршрутів на основі генетичного алгоритму в умовах їх мобільності та різного радіусу дії, є актуальним.

2. Зв'язок дисертаційної роботи з науковими програмами, планами, темами

Дисертаційне дослідження Пирога Ярослава Романовича є невід'ємною складовою наукової діяльності кафедри інформаційно-комунікаційних технологій Національного університету «Львівська політехніка». Тематика роботи безпосередньо корелює з пріоритетним напрямом «Інфокомунікаційні системи та мережі» та відображає актуальні запити щодо розбудови цифрової інфраструктури України.

Наукові результати дисертації були отримані та апробовані в межах виконання низки важливих науково-дослідних робіт, зокрема:

- «Розроблення інноваційних методів та моделей побудови індустріально-орієнтованих інформаційно-комунікаційних систем для модернізації цифрових інфраструктур промисловості» (№ держреєстрації 0122U000817) (2022-2024 рр.),

- «Розроблення інноваційних методів та засобів розгортання інтелектуальної інформаційної інфраструктури для подвійного використання в умовах цифрової трансформації України» (№ держреєстрації 0123U100232) (2023-2025 рр.),

- «Розробка методів і засобів побудови мобільних кіберфізичних систем із штучним інтелектом для соціальних, безпекових та оборонних завдань» (№держреєстрації 0125U000645) (2025-2027 рр.);

- госпдоговірної роботи «Розробка модуля моніторингу інформаційних сервісів для розподілених інфокомунікаційних систем» (ГД №0726 Н-109) (2025 р.).

Широке залучення результатів дисертації до виконання фундаментальних та прикладних робіт, що фінансуються з державного бюджету та за господарським договором, підтверджує високу наукову та практичну затребуваність розроблених методів.

3. Аналіз змісту дисертаційної роботи

Дисертаційна робота Пирога Ярослава Романовича за своєю структурою та обсягом повністю відповідає встановленим вимогам до наукових праць такого рівня. Загальний обсяг дисертації становить 269 сторінок, з яких 221 сторінка – основний текст.

Робота містить 154 малюнки та 41 таблицю, які детально ілюструють результати теоретичних та імітаційних досліджень. Список використаних джерел містить 154 найменування, а додатки містять необхідні документи про апробацію та акти впровадження.

У вступі здобувачем обґрунтовано вибір об'єкта та предмета дослідження, сформульовано наукову проблему та окреслено методологічний апарат.

Змістовне наповнення розділів:

- Перший розділ присвячено системному аналізу інтеграції еволюційних принципів у процеси функціонування БСМ. Автор обґрунтував перспективність генетичних алгоритмів (ГА) як інструменту динамічної оптимізації та розробив оригінальну класифікацію ГА за критеріями фітнес-функцій і параметричного налаштування, що дозволило систематизувати фактори їхньої продуктивності.

- У другому розділі представлено вдосконалений алгоритм визначення найкоротших траєкторій передачі даних. Наукова значущість полягає у розробці механізму адаптивної зміни ймовірностей генетичних операторів. На основі чисельних експериментів доведено перевагу методу: скорочення довжини маршрутів на 32,10–48,80% та кратне зменшення кількості ретрансляційних переходів порівняно з жадібними та мурашиними стратегіями.

- У третьому розділі наведено модель БСМ у двовимірному просторі, що враховує гетерогенність вузлів за радіусом дії. Науковий внесок розділу полягає у

подальшому розвитку багатокритеріального еволюційного методу, де фітнес-функція базується на інтеграції шести нормалізованих параметрів: метрик відстані (Евклідова), якісних показників каналу (рівень втрат та затримок) та апаратних характеристик вузла (енергетичний залишок батареї, рівень сигналу, вхідний/вихідний ступінь). Шляхом імітаційного моделювання доведено, що запропонований багатокритеріальний генетичний алгоритм формує оптимальні маршрути, які є на 15,75% коротшими порівняно з мурашиним алгоритмом, тоді як жадібний пошук у аналогічних умовах не здатний забезпечити успішну доставку даних. Додатково продемонстровано універсальність методу на прикладі інтелектуальних транспортних систем: врахування довжини маршруту, критеріїв завантаженості та недоступності доріг дозволило скоротити час руху транспортних засобів у середовищі «розумного міста» на 15,28%.

- Четвертий розділ присвячено вирішенню задачі просторової дислокації сенсорних вузлів. Автором вперше запропоновано метод просторового розміщення на основі модифікованого ГА, що використовує штрафи та мінімальну міжвузлову відстань для регулювання щільності вузлів. Результати моделювання підтвердили високу ефективність методу: для сценаріїв із фіксованим радіусом дії досягнуто збільшення кількості встановлених вузлів на 1–4 одиниці порівняно з жадібним пошуком та на 1–6 одиниць відносно випадкового, при одночасному зменшенні площі перекриття на 2,85–13,23% при рівномірному розміщенні. У складних гетерогенних сценаріях розроблений метод забезпечив інсталяцію максимальної кількості вузлів (25 одиниць), що на 8–24% ефективніше за існуючі підходи. Важливим досягненням є усунення просторового накладання зон покриття – показник перекриття становить 0% проти 12% у рівномірного пошуку, що є суттєвим фактором для підвищення продуктивності функціонування БСМ.

Важливою ознакою завершеності дослідження є впровадження його результатів у навчальний процес Національного університету «Львівська політехніка» для профільних дисциплін спеціальностей 172 та 126, що підкреслює актуальність та високу прикладну цінність розроблених методів.

4. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків, рекомендацій, наданих в дисертації, їхня достовірність

Обґрунтованість наукових положень дисертації забезпечується вибором класичного математичного апарату, який повністю відповідає специфіці галузі телекомунікацій. У процесі роботи здобувач успішно поєднав методи теорії

ймовірностей та математичної статистики, теорії графів, імітаційного моделювання, об'єктно-орієнтованого програмування.

Основні ідеї дисертації пройшли успішну перевірку під час виступів на трьох міжнародних науково-технічних конференціях. Крім міжнародного рівня, робота пройшла детальне внутрішнє обговорення на спеціалізованих наукових семінарах кафедри інформаційно-комунікаційних технологій Національного університету «Львівська політехніка», де отримала позитивні відгуки провідних фахівців галузі. Як підтвердження, отримано акти впровадження від галузевих підприємств.

Сукупність вказаних факторів дозволяє стверджувати, що висновки дисертації є цілком достовірними, а надані рекомендації мають глибоке наукове обґрунтування.

5. Наукова новизна результатів, отриманих у дисертаційній роботі

Сформульовані в дисертації наукові положення характеризуються новизною та спрямовані на підвищення ефективності функціонування БСМ. Основні результати, що визначають науковий внесок автора, полягають у наступному:

- удосконаленні методу визначення маршруту між сенсорними вузлами за критерієм мінімальної довжини, який, на відміну від існуючих, використовує динамічну адаптацію імовірності схрещування та мутації на основі значення фітнес-функції та сукупність генетичних операторів для автоматичного перебудовування маршруту при зміні мережевої топології;

- подальшому розвитку багатокритеріального методу маршрутизації, який, на відміну від існуючих, використовує еволюційний механізм пошуку маршруту із фітнес-функцією, побудованою на основі нормалізованих значень мережевих параметрів (Евклідової відстані, рівня втрат даних, затримки передачі даних) та характеристик вузла (рівня заряду батареї, рівня сигналу, вхідного/вихідного ступеня), для визначення оптимального маршруту та множини резервних маршрутів в умовах обмежених мережевих ресурсів та динамічно змінної сенсорної топології;

- розробці методу просторового розміщення сенсорних вузлів на основі удосконаленого генетичного алгоритму, який здійснює оцінку щільності їх розподілу на площині із застосуванням обмежень та врахуванням мінімальної міжвузлової відстані для визначення оптимальних конфігурацій у процесі еволюційного відбору, що дало змогу мінімізувати надлишкове перекриття із урахуванням різних радіусів дії як при створенні нової мережі, так і при інтеграції нових вузлів в існуючу топологію.

6. Повнота викладу наукових положень, висновків, рекомендацій в опублікованих працях

Основні положення та практичні результати дисертації Пирога Ярослава Романовича оприлюднені у 15 наукових працях, що повністю розкривають зміст виконаного дослідження. Структура публікаційного доробку автора відзначається високою якістю та фаховою відповідністю:

- 9 статей опубліковано у провідних наукових фахових виданнях України;
- 3 статті представлено у міжнародних періодичних виданнях, серед яких 2 роботи розміщено у закордонних журналах та 1 - у вітчизняному виданні кат. А, що індексується базою Scopus;
- 3 матеріали оприлюднено у збірниках тез доповідей міжнародних конференцій, які індексуються у базі Scopus.

Представлені публікації у повній мірі відображають наукову новизну та практичну цінність роботи, забезпечуючи належну доступність результатів для фахової спільноти.

7. Відсутність порушення академічної доброчесності

Аналіз дисертаційної роботи Пирога Ярослава Романовича та оприлюднених за її темою наукових праць свідчить про повне дотримання автором принципів академічної доброчесності. У роботі не виявлено ознак академічного плагіату, самоплагіату, фабрикації чи фальсифікації даних. Усі запозичені ідеї, положення та результати інших дослідників супроводжуються належними посиланнями на першоджерела, а особистий внесок здобувача у спільних публікаціях є чітко визначеним та обґрунтованим.

8. Практичне значення результатів дисертаційного дослідження

Практична цінність результатів дисертаційного дослідження полягає у можливості їх безпосереднього застосування для підвищення ефективності проєктування та експлуатації БСМ. Запропоновані алгоритмічні рішення орієнтовані на роботу в умовах обмежених ресурсів, динамічної топології та неоднорідних параметрів вузлів, що є характерним для сучасних мережевих систем.

Застосування удосконаленого генетичного алгоритму для задач маршрутизації забезпечує суттєве скорочення довжини маршрутів передавання даних. Зокрема, для мереж із однаковими радіусами дії вузлів досягнуто зменшення

довжини маршрутів майже на 28–47% у порівнянні з традиційними жадібними та мурашиними алгоритмами, а також істотне зниження кількості міжвузлових переходів (у 2–3 рази). Для сценаріїв з неоднорідними радіусами дії сенсорних вузлів отримано стабільне покращення маршрутних характеристик у діапазоні від 32% до майже 49% відносно жадібних методів і до 27% відносно мурашиних алгоритмів, залежно від використаної метрики відстані.

У випадках динамічної зміни топології мережі, пов'язаних із додаванням або вилученням вузлів, запропоновані рішення демонструють підвищену стійкість та адаптивність. Зокрема, при зміні складу мережі забезпечується додаткове скорочення довжини маршрутів у межах 9–23%, а в окремих сценаріях перевага над альтернативними підходами за цільовими показниками сягає понад 16%.

Розроблений багатокритеріальний підхід до маршрутизації, який поєднує мережеві параметри та характеристики сенсорних вузлів, дозволяє формувати працездатні маршрути навіть у ситуаціях, де традиційні алгоритми не забезпечують досягнення вузла-отримувача. За комплексним критерієм якості довжина сформованого маршруту зменшується приблизно на 16% порівняно з мурашиним алгоритмом, що підтверджує практичну доцільність використання еволюційних методів у складних умовах функціонування БСМ.

Практичне значення отриманих результатів також підтверджено можливістю їх застосування за межами класичних сенсорних мереж. Зокрема, використання багатокритеріального еволюційного підходу для задач маршрутизації транспортних засобів у середовищі «розумного міста» дозволило скоротити час руху приблизно на 15% порівняно з відомими евристичними алгоритмами, що свідчить про універсальність запропонованого рішення.

Розроблений метод просторового розміщення сенсорних вузлів забезпечує ефективне покриття заданої території при мінімізації перекриття зон дії вузлів. Для різних сценаріїв досягнуто збільшення кількості встановлених вузлів на 8–24% порівняно з жадібними та випадковими підходами, а також повне усунення перекриття зон покриття (0% проти 12% при рівномірному пошуку), що безпосередньо впливає на зниження енергетичних витрат і продовження часу життя мережі.

Отримані в дисертаційній роботі результати мають підтверджене прикладне значення, оскільки були впроваджені у навчальний процес профільних дисциплін 126 та 172 спеціальностей для студентів Національного університету «Львівська політехніка» та використані у практичній діяльності телекомунікаційних підприємств ТОВ «МаксіТех» та Львівській філії АТ «Укртелеком», що свідчить

про їх готовність до використання у реальних інженерних і науково-прикладних задачах.

9. Зауваження до дисертаційної роботи

Оцінюючи позитивно наукове та практичне значення дисертаційної роботи, вважаю за необхідне висловити наступні зауваження:

1. У розділі 1, автор наводить дослідження ключових слів, що пов'язано із генетичними алгоритмами та наводить карту аналізу. Було б доцільно навести схему чи діаграми відповідності операторів генетичного алгоритму до складових частин чи параметрів безпроводних сенсорних мереж.

2. У другому розділі вказується про розроблення методу із використанням еволюційного пошуку в просторі конфігурацій маршрутів, а далі розробка генетичного алгоритму. З тексту не зовсім зрозуміло як вони пов'язані.

3. У другому розділі вказано про видалення п'яти вузлів при пошуку маршруту, проте не пояснено методику їх вибору: це були випадкові вузли, чи найбільш навантажені. Від цього суттєво залежить оцінка стійкості розробленого ГА.

4. Формула 2.4 містить велику кількість імовірнісних параметрів та констант. Доцільно було б її спростити, зосередившись на ключових змінних, що дозволило б чіткіше оцінити швидкість зростання обчислювальних витрат.

5. У багатокритеріальному методі маршрутизації незрозуміло, чи можливо враховувати тип трафіку для встановлення оптимального маршруту, оскільки сенсори можуть генерувати дані, аудіо- та відеоінформацію.

6. У підрозділі 3.5. проведено дослідження ефективності застосування розробленого генетичного алгоритму для транспортної задачі у «розумному місті». Постає питання доцільності розміщення сенсорів на транспортних засобах, оскільки сучасні методи відеомоніторингу та алгоритми штучного інтелекту дозволяють значно спростити кількість вузлів для аналізу ситуацій на дорогах.

7. У четвертому розділі проведено дослідження щодо збільшення щільності розміщення 25 нових вузлів, при цьому розмір популяції був збільшений до 1000 особин. Проте в роботі не пояснено, чому саме таке значення є оптимальним.

8. У тексті роботи використовуються терміни «кількість транзитів» та «кількість переходів». Для забезпечення однозначності сприйняття результатів моделювання слід було уніфікувати назву.

9. У роботі використовується критерій заряду батареї вузла. Було б цікаво побачити результати досліджень у напрямку підвищення енергоефективності сенсорної мережі в цілому, на базі розробленого генетичного алгоритму.

10. Загальні висновки

Дисертаційна робота Пирога Ярослава Романовича «Підвищення ефективності функціонування безпроводних сенсорних мереж на основі генетичного алгоритму», подана на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 172 – Телекомунікації та радіотехніка, є завершеним, логічно структурованим та цілісним науковим дослідженням, у якому розв'язано актуальне науково-практичне завдання, що має суттєве значення для розвитку сучасних телекомунікаційних систем.

За науковим рівнем, практичною цінністю, апробацією та публікаціями, повнотою висновків і рекомендацій, дисертаційна робота відповідає «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 №44 від 12.01.2022 р. (зі змінами, внесеними згідно з постановами КМУ №341 від 21.03.2022 р., №502 від 19.05.2023 р., №507 від 03.05.2024 р.), а її автор – Пиріг Ярослав Романович, заслуговує присудження наукового ступеня доктора філософії у галузі знань 17 «Електроніка та телекомунікації» за спеціальністю 172 «Телекомунікації та радіотехніка».

доктор технічних наук, доцент,
професор кафедри інфокомунікаційних
систем і технологій
Вінницького національного
технічного університету

Дмитро МИХАЛЕВСЬКИЙ

Особистий підпис Дмитра МИХАЛЕВСЬКОГО засвідчую:
вчений секретар Вченої ради
Вінницького національного технічного університету
к.т.н., доцент



Інна ВІШТАК