

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

ВІДГУК ОФІЦІЙНОГО ОПОНЕНТА

професора кафедри телекомунікацій, медійних та інтелектуальних технологій
Хмельницького національного університету

д.т.н., проф. Бойка Юлія Миколайовича

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

Сучасний розвиток телекомунікаційних систем супроводжується переходом від ієрархічних, статично налаштованих мереж до децентралізованих структур, здатних функціонувати в умовах невизначеності та постійної зміни параметрів середовища. У цьому аспекті безпроводні сенсорні мережі (БСМ) розглядаються не як окремий клас мережевих рішень, а як приклад складних самоорганізованих систем, для яких критично важливими є механізми адаптації, відновлення та підтримання ефективності передавання даних за обмежених ресурсів.

Однією з ключових науково-технічних проблем, що постає при проектуванні та експлуатації таких мереж, є розв'язання задач просторового розміщення вузлів і маршрутизації інформаційних потоків. Нерівномірність покриття, перекриття зон дії, деградація енергетичних характеристик вузлів і зміни топології безпосередньо впливають на показники якості обслуговування мережі. З погляду телекомунікаційної теорії, ці процеси мають нелінійний і взаємозалежний характер, що суттєво ускладнює застосування класичних методів оптимізації.

Генетичні алгоритми становлять особливу цінність як інструмент розв'язання складних мережових задач, оскільки вони поєднують властивості глобального пошуку, стійкості до змін умов і можливості природної інтеграції багатокритеріальних показників. Їх застосування у задачах розміщення сенсорних вузлів та побудови маршрутів дозволяє перейти від статичних схем організації мережі до еволюційно адаптивних механізмів керування її структурою та інформаційними потоками.

Таким чином, розв'язання наукового 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

Дисертаційна робота Пирога Ярослава Романовича виконувалась у відповідності до наукового напрямку кафедри інформаційно-комунікаційних технологій Національного університету «Львівська політехніка» – «Інфокомунікаційні системи та мережі», зокрема в межах наукових досліджень в рамках держбюджетних науково-дослідних робіт:

- «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.).

3. Аналіз змісту роботи

Дисертаційна робота має загальний обсяг 269 сторінок, зокрема містить 4 розділи та 2 додатки. Всі подані матеріали цілком відповідають чинним вимогам до оформлення дисертаційних робіт.

У вступі здобувачем системно окреслено наукову проблему, що розглядається, та обґрунтовано її значущість для розвитку телекомунікаційних систем. Чітко сформульовано мету дослідження, визначено комплекс взаємопов'язаних завдань, реалізація яких забезпечує досягнення поставленої мети. Також відображено зв'язок дисертаційної роботи з науково-дослідними темами та програмами, наведено положення щодо наукової новизни й практичної цінності отриманих результатів, охарактеризовано особистий внесок автора, а також подано відомості про апробацію та публікацію результатів дослідження.

Перший розділ дисертації присвячено аналізу принципів використання генетичних алгоритмів у безпроводних сенсорних мережах. Показано, що еволюційні методи оптимізації є ефективним інструментом для розв'язання мережових задач в умовах динамічної топології, зростання кількості вузлів і змінних характеристик трафіку. Особливу увагу приділено впливу параметричного налаштування генетичних алгоритмів на результати оптимізації, що дозволило обґрунтувати доцільність застосування адаптивних механізмів керування генетичними операторами. Запропонована автором систематизація генетичних алгоритмів за сукупністю ознак (параметричні налаштування, типи фітнес-функцій, алгоритмічні реалізації та сфери застосування) формує цілісне уявлення про фактори, які визначають їх ефективність у мережових задачах.

У другому розділі розроблено адаптивний метод визначення маршруту мінімальної довжини між сенсорними вузлами з використанням генетичного алгоритму. Ключовою особливістю запропонованого підходу є динамічна зміна імовірностей схрещування та мутації залежно від значення фітнес-функції, що забезпечує автоматичну перебудову маршруту при зміні топології мережі. За результатами імітаційного моделювання встановлено, що в сценаріях з однаковими радіусами дії вузлів довжина маршруту зменшується на 47,14% порівняно з жадібним алгоритмом та на 28,39% порівняно з мурашиним алгоритмом, а кількість переходів скорочується відповідно у 3 та 2 рази. Для топологій із трьома різними радіусами дії вузлів переваги запропонованого рішення становлять від 32,10% до 48,80% відносно жадібного алгоритму та від 4,62% до 26,67% відносно мурашиного. В умовах динамічних змін мережі розроблений метод демонструє

підвищену стійкість: при видаленні вузлів він перевершує мурашиний алгоритм у середньому на 16,14%, а при додаванні нових вузлів забезпечує скорочення маршруту на 8,72–22,87%, тоді як жадібний алгоритм у ряді випадків не формує коректного маршруту.

Третій розділ присвячено розвитку багатокритеріального методу маршрутизації даних у децентралізованих мережах із динамічно змінною топологією. Запропонований багатокритеріальний генетичний алгоритм використовує фітнес-функцію, сформовану на основі нормалізованих значень мережевих параметрів та характеристик вузлів із урахуванням їх вагових коефіцієнтів. Результати порівняльного моделювання свідчать, що за комплексним критерієм, який поєднує шість окремих показників, оптимальний маршрут, сформований розробленим алгоритмом, є на 15,75% коротшим порівняно з мурашиним алгоритмом, тоді як жадібний алгоритм не забезпечує досягнення кінцевої точки. Подальше застосування методу для задач маршрутизації транспортних засобів у сценаріях «розумного міста» дозволило зменшити час руху на 15,28% порівняно з мурашиним алгоритмом, що підтверджує універсальність запропонованого методу.

У четвертому розділі розглянуто задачу просторового розміщення сенсорних вузлів та представлено програмну реалізацію розроблених методів. Запропонований метод на основі модифікованого генетичного алгоритму забезпечує оцінювання щільності розміщення вузлів з урахуванням мінімальної міжвузлової відстані та штрафних функцій. Для сценаріїв з однаковим радіусом дії вузлів кількість розміщених вузлів перевищує результати жадібного пошуку на 1–4 вузли, випадкового — на 1–6 вузлів, при цьому площа перекриття зменшується на 2,85–13,23% порівняно з рівномірним розміщенням. Для сценаріїв із різними радіусами дії досягнуто розміщення 25 вузлів, що перевищує результати жадібного пошуку на 2–4 вузли (підвищення ефективності на 8–16%) та випадкового — на 6 вузлів (24%), водночас перекриття зон дії повністю усунено (0% проти 12% для рівномірного розміщення).

В додатку до роботи надано акти впровадження результатів та список наукових праць автора.

Загалом зміст дисертаційної роботи характеризується логічною послідовністю викладу, науковою обґрунтованістю прийнятих рішень і тісним зв'язком між теоретичними положеннями та результатами імітаційного моделювання.

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

Наукові положення, висновки та практичні рекомендації, що представлені в дисертації Пирого Ярослава Романовича, характеризуються високим рівнем обґрунтованості та логічною послідовністю. Достовірність результатів дослідження забезпечується наступними чинниками:

- методологічна коректність: здобувач застосував фундаментальний науковий апарат, що відповідає сучасному стану розвитку інфокомунікаційних технологій. Обґрунтованість алгоритмічних рішень базується на методах теорії графів, теорії ймовірностей та математичної статистики, імітаційному моделюванні, об'єктно-орієнтованому програмуванні;

- експериментальне підтвердження: достовірність розроблених методів підкріплена результатами ґрунтовного імітаційного моделювання. Порівняльний аналіз із відомими аналогами продемонстрував статистично значущу перевагу запропонованих рішень;

- апробація та публікації: основні наукові результати пройшли ретельну перевірку під час доповідей на 3 міжнародних науково-технічних конференціях та були опубліковані у рецензованих фахових виданнях, що підтверджує визнання науковою спільнотою коректності обраних підходів.

Таким чином, сукупність використаних методів та отриманих кількісних даних дозволяє стверджувати, що результати дисертаційної роботи є достовірними, а сформульовані рекомендації – науково обґрунтованими та придатними для практичного впровадження.

5. Наукова новизна результатів, отриманих у дисертаційній роботі

Наукова новизна дисертаційної роботи чітко сформульована і обґрунтована та полягає в наступному:

- удосконалено метод формування маршрутів передавання даних між сенсорними вузлами за критерієм мінімальної довжини, який відрізняється від відомих рішень використанням механізму адаптивного налаштування ймовірностей схрещування та мутації залежно від поточного значення фітнес-функції. Застосування сукупності генетичних операторів у поєднанні з динамічною параметричною адаптацією забезпечує автоматичну реконфігурацію маршруту при зміні топології мережі, що підвищує стійкість та безперервність функціонування безпроводної сенсорної мережі.

- подальшого розвитку набув багатокритеріальний підхід до маршрутизації даних у безпроводних сенсорних мережах, який ґрунтується на еволюційному механізмі пошуку оптимального маршруту з використанням фітнес-функції, сформованої на основі нормалізованих значень як мережевих параметрів, так і характеристик окремих вузлів. Урахування Евклідової відстані, рівня втрат і затримки передавання даних, а також рівня заряду батареї, рівня сигналу та вхідного / вихідного ступеня вузлів із відповідними ваговими коефіцієнтами дозволило забезпечити формування не лише оптимального маршруту, а й множини резервних маршрутів, адаптованих до умов обмежених ресурсів і динамічно змінної сенсорної топології.

- вперше запропоновано метод просторового розміщення сенсорних вузлів на площині на основі удосконаленого генетичного алгоритму, який передбачає оцінювання щільності розподілу вузлів із урахуванням обмежень та мінімально допустимої міжвузлової відстані. Реалізація такого підходу в процесі еволюційного відбору дає змогу визначати оптимальні конфігурації розміщення вузлів та суттєво зменшувати надлишкове перекриття зон їх дії, зберігаючи ефективність як під час розгортання нових безпроводних сенсорних мереж, так і при інтеграції додаткових вузлів у вже існуючу мережеву топологію.

У сукупності отримані наукові результати формують цілісний і методологічно обґрунтований внесок у розвиток теорії та практики застосування генетичних алгоритмів для задач маршрутизації та просторової організації безпроводних сенсорних мереж.

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

Результати дисертаційного дослідження Пирого Ярослава Романовича пройшли всебічну апробацію та повною мірою відображені у відкритому науковому друці. Аналіз представлених матеріалів дає підстави стверджувати про високу якість оприлюднення наукового доробку:

- кількісний та якісний склад публікацій: за темою дисертації опубліковано 15 наукових праць. Особливої уваги заслуговує фаховий рівень видань: 9 статей оприлюднено у провідних наукових журналах України, а міжнародне визнання результатів підтверджується наявністю 5 публікацій, що індексуються у наукометричній базі Scopus (зокрема статті у закордонних та вітчизняних періодичних виданнях, а також матеріали конференцій).

- рівень наукової апробації: ключові концепції щодо оптимізації безпроводних сенсорних мереж пройшли публічне обговорення на трьох міжнародних науково-технічних конференціях, що свідчить про їх відповідність сучасним світовим трендам у галузі радіoeлектроніки та телекомунікацій.

- інституційне обговорення: робота пройшла ретельну експертизу та була фахово обговорена на наукових семінарах кафедри інформаційно-комунікаційних технологій Національного університету «Львівська політехніка», що підтверджує внутрішню цілісність та обґрунтованість усіх викладених положень.

Таким чином, опубліковані праці у повному обсязі та з необхідною деталізацією розкривають зміст дисертації.

7. Відсутність порушення академічної доброчесності

Дисертація містить результати власних досліджень здобувача. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів супроводжується посиланнями на відповідні джерела.

Підстав для сумнівів у науковій доброчесності здобувача під час детального ознайомлення з дисертаційною роботою не виявлено. Узгодженість тексту дисертації з науковими працями дисертанта свідчить про відсутність ознак фальсифікації.

8. Практичне значення результатів дисертаційного дослідження

Практичне значення результатів дисертаційної роботи полягає у можливості їх безпосереднього використання під час проєктування, розгортання та експлуатації безпроводних сенсорних мереж різного масштабу і призначення, зокрема в умовах обмежених енергетичних і мережевих ресурсів та динамічно змінної топології. Запропоновані методи та алгоритми орієнтовані на підвищення ефективності ключових мережевих процесів – маршрутизації даних і просторового розміщення сенсорних вузлів, що має важливе прикладне значення для сучасних телекомунікаційних систем.

Використання удосконаленого генетичного алгоритму для формування маршрутів передавання даних між сенсорними вузлами забезпечує істотне скорочення довжини маршрутів і зменшення кількості переходів між вузлами як у мережах з однаковими, так і з різними радіусами дії. Зокрема, в умовах однорідних радіусів дії досягнуто зменшення довжини маршрутів майже на половину порівняно з жадібними підходами та більш ніж на чверть — у порівнянні з

мурашиними алгоритмами, що безпосередньо сприяє зниженню затримок і енергоспоживання. Для гетерогенних топологій із кількома радіусами дії вузлів запропонований алгоритм демонструє стабільні переваги незалежно від використовуваної метрики відстані, забезпечуючи скорочення маршрутів у широкому діапазоні значень. В умовах динамічних змін мережевої структури він зберігає працездатність і перевершує альтернативні рішення за довжиною сформованих маршрутів як при видаленні, так і при додаванні вузлів.

Практична ефективність багатокритеріального алгоритму маршрутизації підтверджується здатністю формувати працездатні та оптимізовані маршрути з урахуванням сукупності мережевих параметрів і характеристик сенсорних вузлів. На відміну від жадібних алгоритмів, які в окремих сценаріях не забезпечують досягнення вузла-отримувача, запропонований підхід гарантує завершеність маршруту та забезпечує його скорочення більш ніж на 15% у порівнянні з мурашиним алгоритмом. Це підвищує надійність передавання даних і стійкість мережі до деградації окремих елементів.

Розроблений багатокритеріальний еволюційний метод також продемонстрував прикладну цінність у задачах маршрутизації транспортних засобів, де врахування довжини маршруту, рівня завантаженості та недоступності ділянок дорожньої мережі дозволило скоротити час руху майже на 15,3% порівняно з мурашиним алгоритмом, тоді як жадібні підходи виявилися неспроможними забезпечити досягнення цільової точки. Це підтверджує універсальність запропонованих рішень і можливість їх використання поза межами класичних задач БСМ.

Важливим практичним результатом є також метод просторового розміщення сенсорних вузлів, який забезпечує ефективне покриття заданої території з мінімізацією перекриття зон дії. Для сценаріїв з однаковими радіусами дії досягнуто збільшення кількості розміщених вузлів у порівнянні з жадібними та випадковими методами, а також зменшення площі перекриття до 2,85–13,23% відносно рівномірного розміщення. У випадку різних радіусів дії забезпечено розміщення максимально можливої кількості вузлів із повним усуненням перекриття зон покриття, що суттєво перевищує ефективність альтернативних підходів.

9. Зауваження до дисертаційної роботи

1. У 1 розділі вказано, що ГА є одним із найбільш дієвих інструментів, проте в описі розділу відсутнє згадування його порівняльного аналізу з іншими сучасними метавристиками.

2. У 2 розділі ст. 114 вказано, що додавання нових вузлів дозволило зменшити довжину маршруту. Проте, з точки зору теорії зв'язку, додавання вузла зазвичай збільшує кількість ребер (хопів) у маршруті або залишає геометричну відстань між джерелом і отримувачем незмінною. Необхідно уточнити завдяки чому досягнуто таких результатів.

3. У таблицях 2.3–2.6 наведено значний обсяг числових результатів досліджень, однак відсутні агреговані показники, що ускладнює цілісне сприйняття отриманих результатів та їх порівняльний аналіз.

4. Аналіз даних таблиці 3.22 показує, що більшість запропонованих резервних маршрутів проходить через однакові вузли, а саме 4, 8 та 12, що свідчить про їх домінуючу роль у структурі маршрутів та формування потенційних «вузьких місць», що негативно впливає на продуктивність мережі.

5. Термін «ітераційні результати», використаний у роботі, не відповідає науковій практиці у сфері еволюційних алгоритмів, де аналіз результатів зазвичай здійснюється за поколіннями.

6. При поданні графів сформованої мережі на рис. 4.59 та рис. 4.65 не конкретизовано фізичні критерії, відповідно до яких формуються ребра графа, що унеможливорює однозначне трактування наведеної моделі мережі.

Слід відмітити, що зазначені зауваження не несуть принципового значення і не впливають на загальну позитивну оцінку теоретичного рівня та практичної значущості результатів дисертаційної роботи Пирого Ярослава Романовича.

10. Загальні висновки

Дисертаційна робота Пирого Ярослава Романовича є самостійним, завершеним науковим дослідженням, виконаним на належному науково-методичному рівні. Всі наукові положення, висновки та рекомендації, викладені в дисертації, є обґрунтованими та достовірними, а їх практична цінність підтверджена дослідженнями та актами впровадження.

Робота відповідає вимогам Паспорту спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка», вимогам наказу МОН України №40 від 12.01.2017 р. «Про

затвердження вимог до оформлення дисертації» та вимогам постанови Кабінету Міністрів України від 12.01.2022 р. №44 із змінами «Про затвердження порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії».

Враховуючи актуальність теми, наукову новизну, теоретичну та практичну цінність отриманих результатів, дисертаційна робота Пирога Ярослава Романовича повністю відповідає вимогам, що висуваються до дисертацій на здобуття наукового ступеня доктора філософії, а її автор заслуговує присудження наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 172 «Телекомунікації та радіотехніка».

Офіційний опонент
доктор технічних наук, професор,
професор кафедри телекомунікацій, медійних
та інтелектуальних технологій
Хмельницького національного університету

Юлій БОЙКО

Особистий підпис Юлія БОЙКА засвідчую:
вчений секретар Вченої ради
Хмельницького національного університету
д.е.н., професор



Ольга ГОНЧАР