

Голові разової спеціалізованої вченої ради
Національного університету
«Львівська політехніка»
доктору технічних наук, доценту
Бешлею Миколі Івановичу

РЕЦЕНЗІЯ

**професора кафедри інформаційно-комунікаційних технологій
Навчально-наукового інституту інформаційно-комунікаційних технологій
та електронної інженерії
Національного університету «Львівська політехніка»
д.т.н., проф. Демидова Івана Васильовича
на дисертаційну роботу Пирога Ярослава Романовича
"Підвищення ефективності функціонування безпроводних сенсорних мереж
на основі генетичного алгоритму",
представлену на здобуття наукового ступеня доктора філософії
в галузі знань 17 «Електроніка та телекомунікації» та спеціальності
172 «Телекомунікації та радіотехніка»**

1. Актуальність дисертаційної роботи

Сучасний етап розвитку інформаційно-комунікаційних технологій характеризується активним використанням безпроводних сенсорних мереж (БСМ) у системах IoT, кіберфізичних середовищах та інтелектуальних транспортних і моніторингових рішеннях. При цьому важливим чинником ефективної роботи таких мереж є не лише щільність і конфігурація розміщення вузлів, а й реалізація надійної та адаптивної маршрутизації в умовах обмежених ресурсів і динамічних змін мережевої структури.

Характерною особливістю БСМ є обмеженість енергетичних, обчислювальних і радіоресурсів сенсорних вузлів, а також динамічність топології, зумовлена мобільністю вузлів, їх відмовами, додаванням нових елементів та зміною радіусу дії. За таких умов традиційні алгоритми маршрутизації й розміщення вузлів виявляються недостатньо ефективними, оскільки не забезпечують глобальної оптимальності рішень, стійкості до змін топології та раціонального використання ресурсів мережі.

У цьому контексті перспективним напрямом є застосування еволюційних методів оптимізації, зокрема генетичних алгоритмів, які здатні ефективно працювати у багатовимірних та слабоформалізованих задачах. Генетичні алгоритми дають змогу здійснювати глобальний пошук оптимальних рішень, адаптуватися до змін середовища та враховувати множину критеріїв, що є характерним для задач функціонування сучасних мереж.

З огляду на викладене, поставлене в дисертаційній роботі Пирого Ярослава Романовича наукове завдання - підвищення ефективності функціонування безпроводних сенсорних мереж шляхом розроблення 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. Ступінь обґрунтованості та достовірності основних наукових положень, висновків і рекомендацій

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертаційній роботі, впливають з коректного використання теорії ймовірностей, математичної статистики та теорії графів. Отримані результати не суперечать фундаментальним основам теорії телекомунікаційних і інформаційних систем та відповідають існуючим стандартам ITU-T.

Достовірність отриманих здобувачем науково-практичних результатів засвідчено актами впровадження. Матеріали дисертаційної роботи пройшли необхідну апробацію, обговорювались на міжнародних наукових конференціях.

3. Наукова новизна дисертаційної роботи

У дисертаційній роботі отримано 3 пункти наукової новизни, зокрема автор:

- удосконалив метод визначення маршруту між сенсорними вузлами за критерієм мінімальної довжини, який використовує динамічну адаптацію імовірності схрещування та мутації на основі значення фітнес функції та сукупність генетичних операторів. Порівняно з традиційними підходами, метод дає змогу автоматично перебудовувати маршрут при зміні топології, забезпечуючи стабільність функціонування БСМ.

- розвинув багатокритеріальний метод маршрутизації, який використовує еволюційний механізм пошуку маршруту із фітнес-функцією,

побудованою на основі нормалізованих значень мережових параметрів та характеристик вузла з урахуванням їх вагових коефіцієнтів. Дане рішення дає змогу визначити оптимальний маршрут та множину резервних маршрутів в умовах обмежених мережових ресурсів та динамічно змінної сенсорної топології.

- розробив метод 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. Це дає змогу мінімізувати надлишкове перекриття зон дії сенсорних вузлів як при створенні нової мережі, так і при інтеграції нових елементів в існуючу топологію.

4. Повнота викладу результатів дисертаційної роботи у наукових публікаціях

За результатами досліджень, які викладені у дисертаційній роботі, опубліковано 15 наукових праць, що повністю висвітлюють основні положення та результати дисертаційного дослідження. Публікаційна активність здобувача у наукометричній базі Scopus свідчить про високий рівень наукової роботи та її визнання міжнародною спільнотою. Це підтверджує, що робота відповідає міжнародним стандартам, що є важливою якістю її наукової новизни та значущості.

5. Практичне значення результатів дисертаційного дослідження

Практичне значення дисертаційного дослідження полягає у створенні ефективного інструментарію для оптимізації функціонування БСМ у різних умовах експлуатації.

Застосування удосконаленого генетичного алгоритму для формування маршруту передачі даних між сенсорними вузлами дає змогу:

- для сценаріїв з однаковим радіусом дії вузлів скоротити довжину маршруту на 47,14% порівняно з жадібним алгоритмом (ЖА) і на 28,39% порівняно з мурашиним алгоритмом (МА), кількість переходів зменшити у 3 рази щодо ЖА та у 2 рази щодо МА;

- для сценаріїв із трьома радіусами дії вузлів скоротити довжину маршруту на 32,10–48,80% порівняно з ЖА та на 4,62–26,67% порівняно з МА, залежно від обраної метрики відстані (Евклідової, Манхеттенської Чебишова, Мінковського).

Застосування багатокритеріального алгоритму маршрутизації з комплексним критерієм дає змогу формувати оптимальні маршрути, що враховують мережеві параметри та характеристики сенсорних вузлів. Такий підхід забезпечує досягнення вузла-отримувача навіть у складних умовах, де ЖА не виконує завдання, та скорочує довжину маршруту на 15,75% порівняно з МА.

Для транспортної задачі в “розумному місті” застосування багатокритеріального алгоритму визначення маршрутів транспортних засобів на основі еволюційного пошуку дозволило зменшити тривалість подолання маршрутів автомобілями на 15,28% порівняно з МА, тоді як ЖА не забезпечує успішного досягнення точки прибуття.

Використання методу просторового розміщення сенсорних вузлів дає змогу максимізувати їх щільність розгортання на території із врахуванням обмежень щодо міжвузлової відстані: для однакових радіусів дії збільшення кількості розміщених елементів на 1–4 одиниці порівняно з ЖА, та на 1–6 одиниць порівняно із випадковим пошуком; для різних радіусів дії забезпечило розгортання повної вибірки з 25 вузлів, що перевищує результати ЖА на 2–4 одиниці, випадкового пошуку – на 6 одиниць, при цьому перекриття зон дії вузлів зменшено до 0% порівняно з 12% для рівномірного пошуку. Це забезпечує оптимальний розподіл вузлів із урахуванням радіусів їх дії та міжвузлової відстані для покриття необхідної території без «сліпих зон».

Таким чином, запропоновані алгоритми мають високу практичну цінність, оскільки забезпечують комплексне підвищення ефективності функціонування БСМ, зокрема дають змогу скоротити довжину маршрутів, зменшити кількість переходів, підвищити надійність маршрутизації та оптимально розмістити сенсорні вузли, що забезпечує економію ресурсів і стійку роботу мереж у динамічних умовах.

Отримані результати мають широкі перспективи використання, зокрема можуть бути впроваджені у сучасні телекомунікаційні системи для підвищення продуктивності та надійності мереж, у промислових і медичних системах моніторингу, у сільському господарстві, а також у проектах «розумного міста» для оптимізації руху транспортних потоків.

6. Загальна характеристика дисертаційної роботи

У дисертаційній роботі розв’язано науково-практичне завдання підвищення ефективності функціонування безпроводних сенсорних мереж шляхом

розроблення методів розміщення сенсорних вузлів та визначення маршруту і множини резервних маршрутів на основі генетичного алгоритму в умовах їх мобільності та різного радіусу дії.

Дисертаційна робота складається із переліку умовних скорочень, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел (154 найменування) та двох додатків.

Загальний обсяг роботи становить 269 сторінок, з яких 221 сторінка основного тексту. Робота містить 154 рисунки та 41 таблицю. Додатки містять акти впровадження результатів дисертаційної роботи та список праць автора.

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, визначено її мету та сформовано завдання для її досягнення. Наведено зв'язок проведеного дослідження з науковими програмами та темами, сформовано наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, дані про особистий внесок здобувача, апробацію результатів дисертації.

У першому розділі проведено системний аналіз застосування еволюційних обчислень для оптимізації БСМ. Обґрунтовано необхідність адаптивного налаштування параметрів генетичного алгоритму та розроблено їх класифікацію за критеріями фітнес-функцій і мережевих задач.

У другому розділі розроблено вдосконалений метод маршрутизації в БСМ із динамічною адаптацією ймовірностей операторів схрещування і мутації та сукупністю обраних генетичних операторів. Імітаційне моделювання підтвердило перевагу пропонованого рішення над жадібними та мурашиними алгоритмами, забезпечивши скорочення довжини маршруту до 47,14% та 2-3-кратне зменшення кількості транзитних ділянок.

Третій розділ присвячено багатокритеріальному методу маршрутизації у мережах із динамічно змінною топологією, який базується на інтегральному показнику якості, що враховує як мережеві параметри, так і характеристики сенсорного вузла. Представлене рішення забезпечує формування основних і резервних маршрутів, демонструючи високу ефективність як у БСМ, так і в інтелектуальних транспортних системах «розумного міста» у порівнянні із жадібним та мурашиним алгоритмами.

У четвертому розділі розглянуто задачу оптимізації топологічного розгортання БСМ шляхом розроблення методу розміщення вузлів на основі модифікованого генетичного алгоритму, що враховує гетерогенність мережі (різні

радіуси дії вузлів) та обмеження на мінімальну міжвузлову відстань як для нових, так і для вже існуючих сегментів топології.

Розроблено спеціалізований програмний модуль для імітаційного моделювання БСМ, який реалізує модульну архітектуру, що забезпечує гнучку адаптацію параметрів ГА та можливість проведення порівняльного аналізу із випадковим, жадібним та рівномірним алгоритмами розміщення вузлів на площині. Результати досліджень підтвердили доцільність використання розробленого рішення у БСМ.

7. Зауваження та рекомендації до дисертаційної роботи

1. У 2 розділі наведено результати покращення завдяки використанню запропонованого рішення щодо маршрутизації для різних метрик відстані (наприклад, 48.80% або 4.62%), проте не вказано, чи ці результати є середніми за серію пусків.

2. У роботі наявна технічна помилка у позначенні $f(t_{\text{net}})$, яке містить змінну t , що зазвичай відповідає часу, проте в тексті йдеться про покоління G .

3. У роботі порівняльний аналіз ефективності розробленого генетичного алгоритму для маршрутизації проведено лише з жадібним та мурашковим алгоритмом. Проте, для повноти оцінки ефективності запропонованого рішення варто було б додати порівняння з класичним детермінованим алгоритмом, наприклад, таким як алгоритм Дейкстри.

4. У 3 розділі для недоступних ділянок маршруту використовується штраф у розмірі 10 000. Необґрунтовано, чому обрано саме 10 000, а не, наприклад, подвоєння довжини ребра.

5. На рисунку 4.5 представлена схема взаємозв'язку підсистем розробленого програмного модуля, проте ця блок-схема є узагальненою. Вона не відображає потоки даних між модулями та ієрархію управління.

Вказані зауваження не є критичними і не впливають на якість розроблених методів та алгоритмів, що дає змогу позитивно оцінювати дисертаційну роботу в цілому.

Загальні висновки

На підставі розгляду змісту дисертації, її анотації, праць здобувача та актів впровадження можна зробити висновок, що дисертаційна робота Пирога Ярослава Романовича "Підвищення ефективності функціонування безпроводних сенсорних

мереж на основі генетичного алгоритму” є завершеною, самостійно виконаною науковою працею.

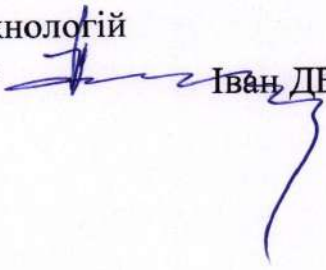
У цій дисертаційній роботі отримано нові наукові результати, що в сукупності забезпечили розв’язання актуального наукового завдання підвищення ефективності функціонування безпроводних сенсорних мереж шляхом розроблення методів розміщення сенсорних вузлів та визначення маршруту і множини резервних маршрутів на основі генетичного алгоритму в умовах їх мобільності та різного радіусу дії.

За науковим рівнем, практичною цінністю, апробацією та публікаціями, повнотою висновків та рекомендацій, дисертаційна робота відповідає вимогам “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 на присудження наукового ступеня доктора філософії у галузі знань 17 “Електроніка та телекомунікації” за спеціальністю 172 “Телекомунікації та радіотехніка”.

Рецензент:

доктор технічних наук, професор,

професор кафедри інформаційно-комунікаційних технологій

Національного університету “Львівська політехніка”  Іван ДЕМИДОВ

Підпис д.т.н., професора Демидова І.В. засвідчую:

Вчений секретар

Національного університету

«Львівська політехніка»



Роман БРИЛИНСЬКИЙ