

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»**

**ПИРІГ ЮЛІЯ ВОЛОДИМИРІВНА**



УДК 621.391

**МОДЕЛІ ТА АЛГОРИТМИ МАРШРУТИЗАЦІЇ ІНФОРМАЦІЙНИХ ПОТОКІВ  
В САМООРГАНІЗОВАНИХ МЕРЕЖАХ**

05.12.02 – телекомунікаційні системи та мережі

**Автореферат**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Львів - 2018

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Національному університеті «Львівська політехніка» Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук  
**Стрихалюк Богдан Михайлович**,  
Національний університет "Львівська політехніка",  
заступник директора Інституту телекомунікацій,  
радіоелектроніки та електронної техніки.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор  
**Ложковський Анатолій Григорович**,  
Одеська національна академія зв'язку ім. О.С. Попова,  
завідувач кафедри комутаційних систем;

кандидат технічних наук, доцент  
**Гринкевич Ганна Олександрівна**,  
Державний університет телекомунікацій,  
доцент кафедри телекомунікаційних систем та мереж.

Захист дисертації відбудеться «30» листопада 2018 р. о 12<sup>00</sup> год. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 35.052.10 у Національному університеті «Львівська політехніка» (79013, Львів-13, вул. С. Бандери, 12, ауд. 218 XI навчального корпусу).

З дисертацією можна ознайомитись у науковій бібліотеці Національного університету "Львівська політехніка" (79013, м. Львів, вул. Професорська, 1).

Автореферат розісланий "27" жовтня 2018 р.

Учений секретар спеціалізованої  
вченої ради



І.В. Демидов

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** В сучасному світі самоорганізовані мережі є потужним інструментом для збору, передавання та опрацювання великих обсягів даних на територіях, де розгортання інших типів телекомунікаційних засобів є неможливим або невиправданим. В таких умовах тривалість роботи компонентів подібного роду систем є вирішальним параметром, оскільки зовнішні джерела живлення відсутні. Можливість перебування елементів мережі в активному стані, під час якого проводиться розрахунок маршрутів, а також залучення до процесу передавання даних мінімальної кількості мережних елементів є ключовими з точки зору їх удосконалення.

На сьогоднішній день безпроводні сенсорні мережі WSNs (Wireless Sensor Networks) широко поширені в різноманітних областях, включаючи екологічний моніторинг, «розумні» домашні системи, пожежні системи, системи моніторингу здоров'я (e-Health) тощо. Вибір способу організації передавання інформації між сенсорним або мережним вузлом і шлюзами або базовими станціями є одним із вирішальних етапів при створенні безпроводної мережної системи.

У той же час, цілий ряд завдань, пов'язаних із розробленням ефективних алгоритмів кластеризації для безпроводних самоорганізованих мереж, стійких до відмов (MANET, WSN, WMN, VANET), ще потребує розв'язання. Для безпроводних сенсорних мереж досить високої щільності використовується кластеризація, тому важливим є розроблення методики розміщення їх вузлів, яка забезпечуватиме необхідне покриття. Очевидно, що функціонування кластеризованих безпроводних самоорганізованих мереж значною мірою залежить від алгоритму вибору головного вузла, який повинен забезпечити максимальну тривалість функціонування мережі.

Питаннями підвищення ефективності функціонування самоорганізованих мереж займаються вітчизняні та іноземні науковці: S. Marsland, J. Shapiro, U. Nehmzow, S.P. Luttrell, S. Hamalainen, H. Sanneck, C. Sartori, Yi Zhi Yao Ingo Viering, Krzysztof Kordybach, Paolo Zanier, Д.В. Агеєв, О.І. Лисенко, В.І. Новіков, М.М. Климаш, В.Г. Сайко, Л.О. Комарова, С.Г. Бунін, С.О. Субботін та багато інших.

У роботах згаданих науковців розкриті питання принципів, методів та засобів самоорганізації у телекомунікаціях, значну увагу зосереджено на проблематиці ефективності самоорганізованих мереж з точки зору щільності радіопокриття, підсистем керування та маршрутизації інформаційних потоків, проте не у повній мірі досліджено тривалість пошуку маршрутів у самоорганізованих мережах.

Важливим аспектом при передаванні даних по безпроводних самоорганізованих мережах залишається питання ефективності маршрутизації, що безпосередньо впливає на збалансованість та рівномірність використання ресурсів радіоканалів, а також сумісне використання ліцензованого спектру без впливу на передавання інформаційних потоків користувачами інших мережних систем.

Таким чином, враховуючи постійне зростання кількості пристроїв і мережних вузлів, які потребують обслуговування, удосконалення методів маршрутизації інформаційних потоків у самоорганізованих безпроводних мережах шляхом покращення часових параметрів маршрутизації та передавання інформації в умовах динамічного зростання інтенсивності її потоків і нестабільності рівня шумів у радіоканалах є актуальним науковим завданням.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Тематика дисертаційної роботи безпосередньо пов'язана з положеннями Постанови Верховної Ради України про «Концепцію національної інформаційної політики», а також «Концепції конвергенції телефонних мереж і мереж з пакетною комутацією в Україні», «Стратегії розвитку інформаційного суспільства в Україні», Закону України «Про Основні засади розвитку інформаційного суспільства в Україні на 2007-2015 роки». Дисертаційні дослідження виконувались у відповідності до наукового напрямку кафедри телекомунікацій Національного університету «Львівська політехніка» – «Інфокомунікаційні системи та мережі», в межах низки держбюджетних науково-дослідних робіт: «Моделі та структури конвергентних телекомунікаційних мереж на основі CLOUD – технологій» (2013-2014 рр.), № держреєстрації 0113U003184; «Методи побудови та моделі інформаційно-телекомунікаційної інфраструктури на основі SDN-технологій для систем електронного урядування» (2015-2016 рр.), № держреєстрації 0115U000444; «Методи побудови гетерогенних інформаційно-комунікаційних систем для розгортання програмно-конфігурованих мереж 5G подвійного використання» (2017-2018 рр.), № держреєстрації 0117U004449; «Розроблення методів адаптивного управління радіочастотним ресурсом у мережах мобільного зв'язку LTE-U для розвитку стандартів 4G/5G в Україні», (2017-2019 рр.), № держреєстрації 0117U007177.

**Мета і завдання дослідження.** Мета дисертаційної роботи полягає у покращенні часових параметрів маршрутизації та передавання інформації в умовах динамічного зростання інтенсивності потоків та нестабільності рівня шумів у радіоканалах сучасних безпроводних самоорганізованих мереж.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі **завдання**:

1. Провести аналіз методів та алгоритмів маршрутизації у безпроводних самоорганізованих мережах.

2. Удосконалити метод локалізації вузлів мережі на основі алгоритму Терстона з використанням діаграми потужності Вороного з правильними взаємозв'язками суміжності.

3. Розробити метод кластеризації сенсорних вузлів для підвищення ефективності маршрутизації з урахуванням моделі поширення сигналу в радіоканалі.

4. Запропонувати модель визначення станів телекомунікаційної мережі з використанням тензорного представлення топологічної структури.

5. Удосконалити модель маршрутизації потоків в самоорганізованих мережах, яка дасть змогу забезпечувати необхідний рівень якості обслуговування у разі програмних чи апаратних збоїв.

6. Розробити комплексний метод маршрутизації інформаційних потоків із урахуванням динамічності станів структури безпроводної самоорганізованої мережі.

*Об'єкт дослідження* – процеси передавання інформаційних потоків у безпроводних мережах із самоорганізацією.

*Предмет дослідження* – методи та алгоритми маршрутизації інформаційних потоків у самоорганізованих мережах.

*Методи дослідження.* Для проведення наукових досліджень використано базові положення теорії масового обслуговування, математичної статистики, теорії ймовірностей, теорії випадкових графів, а також математичне та імітаційне моделювання.

**Наукова новизна** роботи полягає у тому, що:

1. Вперше запропоновано комплексний метод маршрутизації на основі знаходження глобального екстремуму функції впорядкованого випадкового пошуку з додаванням/видаленням вузла, що, на відміну від існуючих, дав змогу утворювати множину маршрутів та здійснювати її послідовне упорядкування за критерієм максимізації рівня QoS з урахуванням неоднорідностей у мережі.

2. Удосконалено метод локалізації вузлів сенсорної мережі, який, на відміну від існуючих, базується на алгоритмічному підході Терстона з використанням діаграми потужності Вороного з правильними взаємозв'язками суміжності, що дало змогу підвищити точність визначення віртуальних координат при застосуванні канонічного одиничного диску Пуанкаре, покращуючи якість розв'язання завдань маршрутизації в евклідовому просторі.

3. Удосконалено метод кластеризації сенсорних вузлів для зменшення тривалості пошуку маршруту між довільною їх парою, який, на відміну від існуючих, передбачає визначення центроїда кластера із урахуванням моделі поширення сигналу в радіоканалі.

4. Набула подальшого розвитку модель зони перекриття кластерів у самоорганізованих мережах, яка, на відміну від існуючих, дає змогу застосувати схему перепризначення логічних адрес мережним вузлам, які функціонують у цих кластерах, і забезпечувати необхідний рівень якості обслуговування у разі програмних чи апаратних збоїв.

**Практичне значення одержаних результатів** полягає в тому, що:

1. Із застосуванням удосконаленого методу локалізації вузлів мережі вдалося забезпечити ефективність жадібної енергетичної маршрутизації на рівні 1,25 коефіцієнта еластичності за рахунок підвищення точності визначення віртуальних координат.

2. Розроблено метод кластеризації сенсорних вузлів, який дає змогу зменшити тривалість пошуку маршруту до 1,6 разів шляхом урахування в метриці шляху значення Евклідової відстані та рівня сигнал/шум у радіоканалі (розрахованого на основі моделі поширення радіосигналу), при цьому в тих самих умовах, завдяки впровадженню методу локалізації вузлів та розробленого алгоритму кластеризації, вдалося досягти зменшення тривалості пошуку маршруту між довільною парою вузлів до 4,5 разів.

3. Доведено, що застосування методу кластеризації з урахуванням моделі поширення сигналу дає змогу зменшити значення коефіцієнту бітових помилок всередині кластеру на 7% завдяки більш ефективному використанню пропускної здатності радіоканалу.

4. Завдяки можливості виконання локального відновлення маршруту за рахунок зміни схеми перепризначення логічних адрес у разі програмно-апаратних збоїв вдалося знизити затримку передавання даних на 5 % у порівнянні з традиційними протоколами маршрутизації.

5. Розроблено спосіб оптимізації найкоротших шляхів в безпроводній самоорганізованій мережі, впровадження якого забезпечило зменшення затримки передавання даних від вузла-джерела до вузла-отримувача до 2 разів.

Отримані в межах дисертаційного дослідження результати дають змогу теоретично обґрунтувати тип прийнятно-передавальних пристроїв і вимоги до

протоколів маршрутизації на етапі проектування мережі, а при її експлуатації – виконувати їх математично-програмне удосконалення для покращення часових параметрів обслуговування інформаційних потоків.

Основні результати дисертаційної роботи використані та впроваджені:

- у ТЗОВ ВТФ «Контех» для покращення якості обслуговування абонентів шляхом поділу корпоративної мережі на окремі сегменти (кластери);
- у ТЗОВ «Телекомунікаційна компанія» для підвищення функціональності корпоративної мережі;
- в ПП «Цифрові технології» для підвищення якості обслуговування абонентів у процесі надання мобільних сервісів.

**Апробація результатів дисертації.** Основні наукові результати і положення дисертації представлені, доповідались та всебічно обговорювались на 9-ти міжнародних та всеукраїнських науково-технічних конференціях, наукових семінарах та симпозіумах: Міжнародній конференції «Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій, комп'ютерної інженерії» TCSET'2016 (м. Львів-Славське, 2016 р.); Науково-технічній конференції «Проблеми телекомунікацій» (м. Київ, 2016 р.); Міжнародній науково-технічній конференції «The Experience of Designing And Application of CAD Systems in microelectronics» CADSM'2017 (Поляна-Свалява, 2017, 2015pp.); International Scientific-Practical Conference «Problems of Infocommunications, Science and Technology» PICS&T'2017 (м. Харків, 2017 р.); Міжнародних науково-практичних конференціях «Фізико-технологічні проблеми радіотехнічних пристроїв, засобів телекомунікацій, нано- та мікроелектроніки», (м. Чернівці, 2014, 2017 pp.).

Крім цього, дисертаційна робота представлена на науковому семінарі кафедри телекомунікацій Національного університету «Львівська політехніка».

**Публікації.** За результатами досліджень, опубліковано 15 наукових праць, серед них статей у наукових періодичних виданнях інших держав, що включені до наукометричної бази даних – 1 [3], статей у наукових фахових виданнях України, що індексуються міжнародними наукометричними базами – 5 [1, 2, 4-6], праць у збірниках матеріалів і тез доповідей міжнародних та всеукраїнських конференцій – 9, з них індексованих у наукометричній базі Scopus – 6 [7-12].

**Особистий внесок здобувача.** Всі результати наукових, теоретичних і практичних досліджень, які представлено в дисертаційній роботі, одержані авторкою особисто. У працях, опублікованих у співавторстві, здобувачці належать: у роботах [1, 7] – розроблення комплексного підходу до оптимізації процесів маршрутизації та підбір параметрів для проведення імітаційного моделювання; [2, 9] – апробація моделі визначення метричного тензора з використанням теореми косинусів для чотирикутників; [3, 12] – дослідження методів структурно-функціонального синтезу телекомунікаційних систем; [4, 14] – дослідження способів визначення віртуальних координат на основі гіперболічної просторової проекції; [5] – дослідження впливу критеріїв доступності та продуктивності системи на її структурно-функціональний синтез; [6, 8] – розроблення способу визначення віртуальних координат із використанням гіперболічних потоків Річчі; [13, 14] – дослідження алгоритмів маршрутизації в безпроводних мережах; [10] – дослідження методів підвищення ефективності використання радіочастотного спектру в мережах 5G; [11] – розроблення методу локалізації сенсорних вузлів для безпроводних мереж; [15] – дослідження особливостей передавання даних у вузлах рівня доступу.

**Структура та обсяг роботи.** Робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та двох додатків. Загальний обсяг роботи складає 158 сторінок друкарського тексту, із них 7 сторінок вступу, 113 сторінок основного тексту, 60 рисунків, список використаних джерел зі 121 найменування, 2 додатки на 6 сторінках. Додатки містять акти впровадження результатів дисертаційної роботи та список наукових праць авторки.

## **ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ**

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, показано зв'язок роботи із науковими програмами, планами, темами, сформульовано мету і визначено основні завдання, об'єкт, предмет і методи дослідження, подано наукову новизну і практичну значимість отриманих результатів із вказівкою відомостей про впровадження результатів роботи, описано особистий внесок здобувача, наведено відомості про апробацію результатів роботи та публікації за темою дисертації.

**У першому розділі – «Аналіз методів та особливостей маршрутизації інформаційних потоків у самоорганізованих мережах»** – проведено аналіз методів та особливостей маршрутизації у безпроводних самоорганізованих мережах.

З огляду на низькі показники вузлів щодо продуктивності обчислень і доступного обсягу пам'яті, а також враховуючи той факт, що кількість вузлів у безпроводних сенсорних мережах може сягати багатьох сотень і тисяч, а топологія є динамічно змінною, очевидно, що зберігати і підтримувати в актуальному стані інформацію про поточну конфігурацію всієї мережі в кожному вузлі не є можливим. Внаслідок цього, у самоорганізованих мережах в основному використовуються децентралізовані локальні схеми маршрутизації, у яких кожен вузол окремо приймає рішення про перенаправлення повідомлень, яке базується на інформації про його найближчих сусідів.

Оптимальний вибір методу маршрутизації з урахуванням множини факторів різного роду і технічних умов дає змогу збільшити продуктивність мережі. Важливим аспектом при передаванні даних є питання ефективності маршрутизації, яке безпосередньо впливає на збалансованість та рівномірність використання ресурсів радіоканалів самоорганізованих мереж.

Отже, удосконалення методів маршрутизації інформаційних потоків у самоорганізованих мережах в умовах різкого і динамічного зростання їх інтенсивності та нестабільності рівня шумів у радіоканалах сучасних безпроводних мереж є актуальним науковим завданням.

**У другому розділі – «Методи покращення параметрів якості надання послуг в безпроводних самоорганізованих мережах»** – запропоновано моделі, методи та алгоритми покращення параметрів якості надання послуг в мережах із самоорганізацією.

У зв'язку з високою щільністю абонентів у мережах безпроводного доступу важливим є розроблення методики розміщення сенсорних вузлів, яка забезпечує покриття певної території. Для розв'язання цього завдання удосконалено метод локалізації вузлів мережі з використанням діаграм потужності Вороного з правильними взаємозв'язками суміжності (рис. 1). В його основу покладено алгоритм Терстона для обчислення жадібного вкладення діаграми потужності вузла, а також спосіб його локалізації в моделі Пуанкаре на гіперболічній площині для удосконалення процесу визначення віртуальних координат вузлів самоорганізованої

мережі. Суть методу полягає у визначенні і побудові діаграми потужності кожної точки із множини триангуляції Делоне та встановленні значення граничних і внутрішніх радіусів для обчислення укладки кіл, які відповідають цим точкам у моделі Пуанкаре в гіперболічній площині, ініціалізованій нескінченними радіусами для всіх крайових кіл. Алгоритм працює до моменту побудови діаграм потужностей кожної з точок у гіперболічному просторі, координати яких відповідатимуть віртуальним координатам вузлів самоорганізованої мережі.

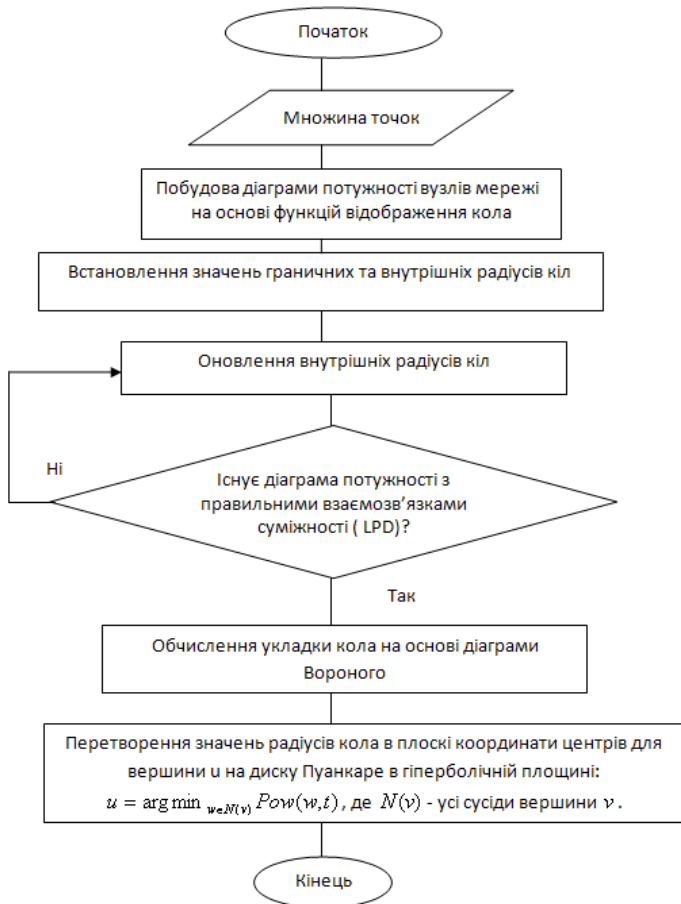


Рис. 1. Блок-схема запропонованого алгоритму локалізації вузлів

Важливим аспектом у процесі маршрутизації є функціонування вузлів у межах мережних кластерів. Для розв'язання завдань кластеризації в безпроводній сенсорній мережі удосконалено метод кластеризації сенсорних вузлів із урахуванням моделі поширення сигналу в радіоканалі (рис. 2). Суть методу полягає у розбитті елементів векторного простору -  $X$  на заздалегідь відоме число кластерів -  $k$ , місткістю  $S_1, S_2, \dots, S_k$  вузлів. На кожній ітерації  $t$  здійснюється перерахунок та визначення нового центроїда  $\mu_j$  для кожного кластера, отриманого на попередньому кроці, після чого вектори знову розбиваються на кластери відповідно до того, який з нових центрів виявився ближчим за обраною метрикою, що формується на основі розрахунку евклідової відстані між вузлами -  $p(x, \mu)$  та з урахуванням моделі поширення сигналу.

В якості оцінки втрат у досліджуваній безпроводній

самоорганізованій мережі запропоновано використати однопроменеву модель Motley-Keenan, яка дозволяє враховувати втрати потужності сигналу ( $L_t$ ) та відслідковувати рівень коефіцієнта бітових помилок (BER) при проходженні через кожен вузол мережі.

Формування кластеру  $i$ , відповідно, знаходження його центроїда, буде відбуватися до тих пір, поки не буде знайдено усі найближчі по відстані вузли з максимальним значенням потужності сигналу.

Для визначення стану телекомунікаційної мережі та відображення її топологічної структури після кластеризації у роботі пропонується модель із використанням тензорного представлення на основі криволінійної системи координат.

Навантаження між вузлами змінюється в процесі функціонування мережі, відповідно його перерозподіл описується коефіцієнтом зв'язності (символом Крістофеля).



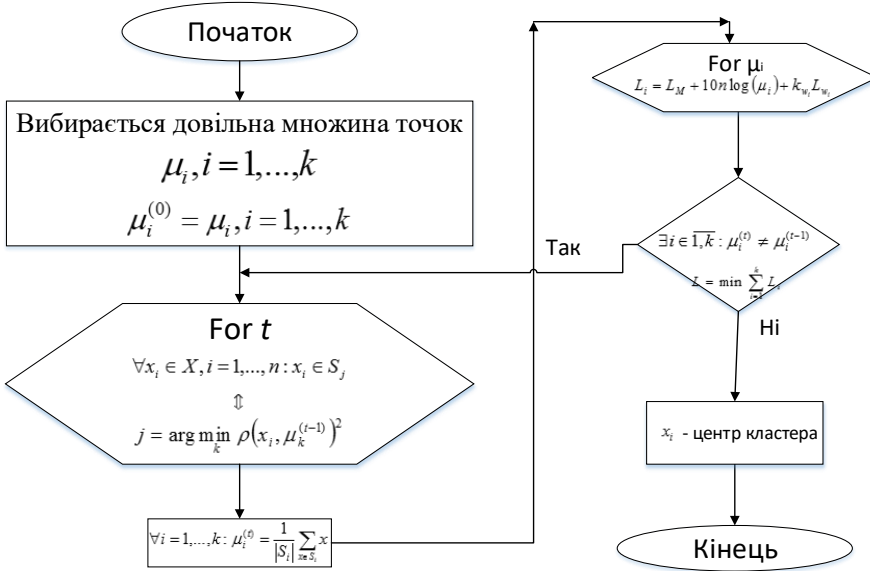


Рис. 2. Блок-схема удосконаленого алгоритму кластеризації вузлів самоорганізованої мережі

мережі визначається як:

$$(D_m D_k - D_k D_m) x^i dx^k dx^m \vec{e}_i = R_{j,mk}^i x^j dx^k dx^m \vec{e}_i, \quad (2)$$

де  $D_k$  – коваріантна похідна,  $R_{j,mk}^i$  – тензор Рімана або тензор кривизни, який визначають за допомогою символів Крістофеля першого ( $\Gamma_{ij}^k$ ) та другого ( $\Gamma_{k,ij}$ ) роду:

$$R_{j,mk}^i = \partial_m \Gamma_{jk}^i - \partial_k \Gamma_{jm}^i + \Gamma_{pm}^i \Gamma_{jk}^p - \Gamma_{pk}^i \Gamma_{jm}^p. \quad (3)$$

Зміну симетричного метричного тензора в часі в Ріманівській геометрії можна визначити за допомогою потоку Річчі як:

$$\frac{dg_{ij}}{dt} = -2R_{ij}. \quad (4)$$

Для представлення гіперболічного простору пропонується використовувати диск Пуанкаре, який являє собою одиничний диск на комплексній площині з Ріманівською метрикою. При здійсненні повороту в гіперболічному просторі використовується перетворення Мебіуса, яке для диска Пуанкаре у вигляді зсуву має наступний вигляд:

$$F_c(z) = c + \frac{r^2}{z + c}, \quad (5)$$

де  $c$  та  $r$  є центром та радіусом кола, відповідно.

Завдяки цьому топологія мережі може бути відображена на канонічному одиничному диску з круглими отворами у областях неоднорідностей її структури шляхом трансформації центру та радіуса кіл до вигляду віртуальних координат.

У роботі збільшено кількість компонент метричного тензора, що дає змогу представити Евклідову метрику у симетричному тензорному полі для опису деформації ріманової метрики, з врахуванням двостороннього зв'язку між кожною парою вузлів, яка згідно (4) має наступний вигляд:

$$\frac{dg_{ab}}{dt} = \frac{((1-e^{-at})^2 + (1-e^{-bt})^2 - (1-e^{-ct})^2)}{2(1-e^{-at})(1-e^{-bt})} \left[ \frac{ae^{-at}}{(1-e^{-at})} + \frac{be^{-bt}}{(1-e^{-bt})} \right] + \frac{ae^{-at}(1-e^{-at}) + be^{-bt}(1-e^{-bt}) - ce^{-ct}(1-e^{-ct})}{2(1-e^{-at})(1-e^{-bt})} \quad (6)$$

де  $1-e^{-at}$ ;  $1-e^{-bt}$ ;  $1-e^{-ct}$  – навантаження між вузлами СВ, СА і АВ, відповідно.

Стан мережі можна представити як:

$$\vec{r} = g_{ij} \cdot x^i \cdot x^j = g^{ij} \cdot x_i \cdot x_j, \quad (1)$$

де  $\vec{r}$  – радіус-вектор, який з'єднує початок системи координат з точкою, що відповідає стану мережі;  $x_i$  та  $x^i$  – коваріантні та контрваріантні компоненти, відповідно,  $g_{ij}$  та  $g^{ij}$  – коваріантний та контрваріантний метричний тензор, відповідно.

Зміна радіуса-вектора від послідовності змін стану

Використання цієї моделі дає змогу здійснювати моніторинг та фіксацію станів топологічної структури після кластеризації, на основі результатів яких відбуватимуться процеси маршрутизації, а також, у свою чергу, підвищити точність формування таблиць маршрутизації в конкретні моменти часу.

У третьому розділі – «Моделювання та дослідження розподілу інформаційних потоків у мережах із самоорганізацією» – проведено моделювання структури безпроводної мережі для перевірки ефективності передавання інформаційних потоків із використанням розроблених у дисертації методів та алгоритмів.

Для дослідження ефективності удосконаленого методу локалізації вузлів мережі проведено моделювання безпроводної мережі в програмному середовищі Matlab. Дослідження здійснювалось на випадкових трикутних графах, місткістю 40 - 50 вершин кожен. В результаті моделювання отримано жадібні вкладення діаграм потужності для кожної з точок (рис. 3).

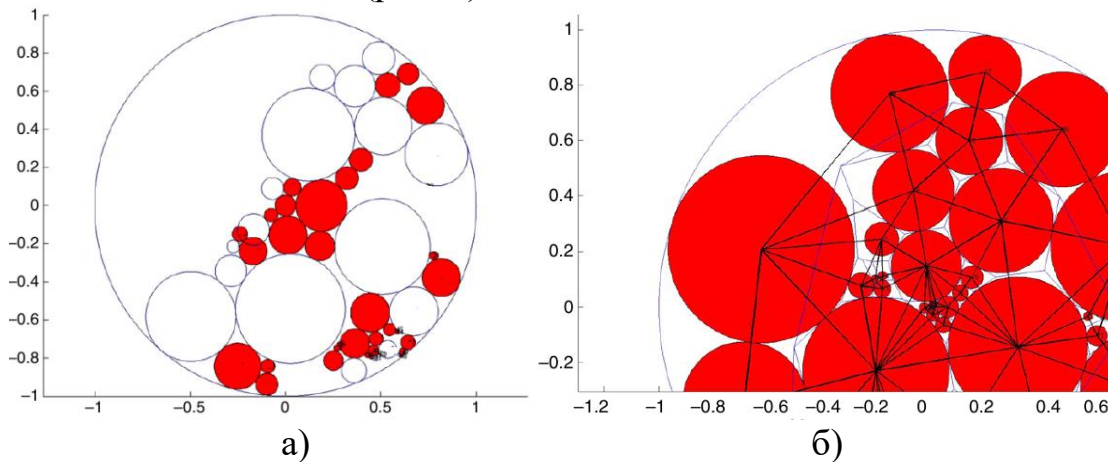


Рис. 3. Жадібні вкладення діаграм потужності після а) 6 ітерацій (зафарбовані кола – діаграми потужності точок, які мають правильні взаємозв'язки суміжності); б) 32 ітерацій (правильні взаємозв'язки суміжності є для всіх точок)

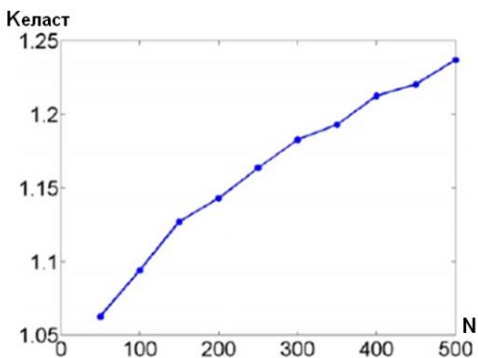


Рис. 4. Середній коефіцієнт еластичності маршруту

В результаті моделювання отримано залежність, яка свідчить про максимізацію відношення коефіцієнта еластичності, усередненого за усіма парами вершин та триангуляціями одного розміру, що дає змогу пришвидшити процес ініціалізації вузлів мережі та підвищити точність визначення віртуальних координат.

Результати проведеного моделювання (рис. 4) із застосуванням удосконаленого методу локалізації вузлів демонструють середній коефіцієнт еластичності мережі ( $K_{еласт}$ ) на рівні 1,25 при кількості вузлів в мережі ( $N$ ) 500. Це дає змогу покращити процес збіжності мережі, оскільки при її розширенні зберігається здатність функціонування без погіршення рівня якості надання послуг користувачам.

Для дослідження процесів передавання даних у безпроводних самоорганізованих мережах розроблено програмний симулятор, який дає змогу досліджувати їх функціонування в умовах високого рівня шуму в радіоканалах та визначати умови, при яких тривалість пошуку маршруту та якість передавання даних у мережі будуть найкращими.

Для прикладу, проведено дослідження для 20 вузлів Wi-Fi, розміщених на площині випадковим чином. Потужність випромінювання трансивера становила 20 дБм, мінімальна чутливість приймача – 65 дБм. Повідомлення генерувалися кожним вузлом з середнім інтервалом між повідомленнями у 1000 с та середнім розміром 500 байт. Середня тривалість оброблення повідомлення одним вузлом становила 1 с.

Оцінка тривалості пошуку маршруту у досліджуваній мережі з алгоритмом кластеризації k-means між довільно взятою парою вузлів показала, що середній час пошуку маршруту займає близько 18,5 мс (див. рис.5 а). Після використання в симуляторі запропонованого алгоритму кластеризації у мережі сформовано чотири кластери, відповідно до мінімальних значень Евклідової метрики та максимального значення критерію середнього рівня сигнал/шум.

Оцінка тривалості пошуку маршруту у досліджуваній мережі (між довільно взятою парою вузлів) при використанні запропонованого алгоритму кластеризації та методу локалізації вузлів показала, що середній час пошуку маршруту зменшився до 4,5 разів і становить 4100 мкс (рис. 5 б).

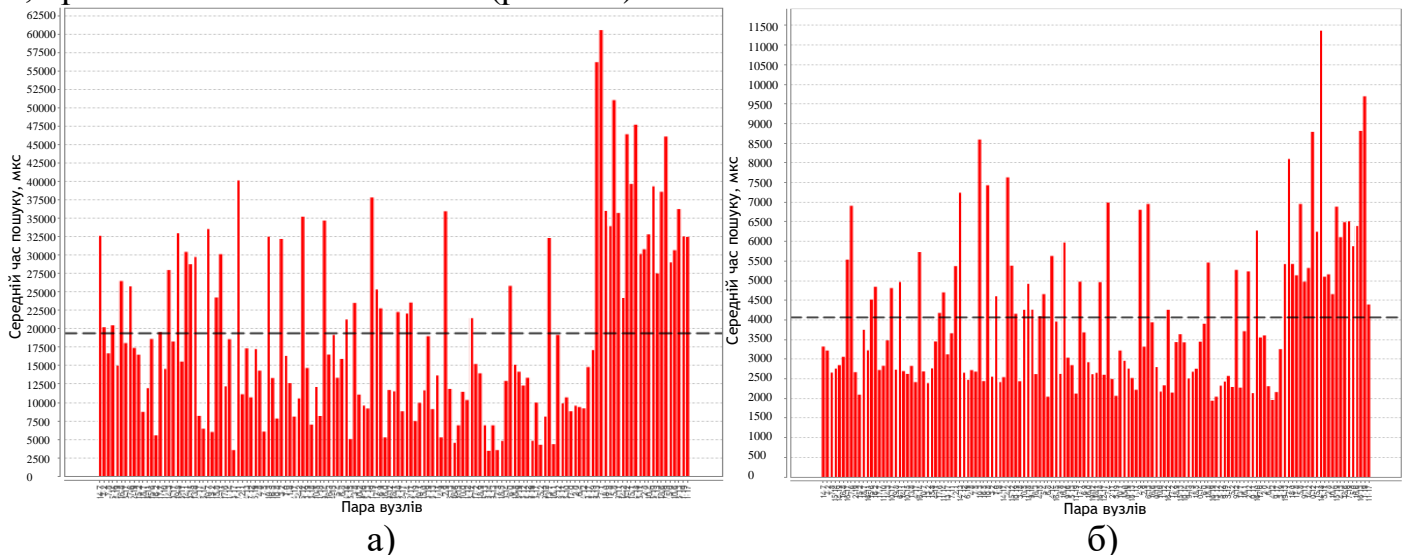


Рис. 5. Оцінювання тривалості пошуку маршруту у досліджуваній мережі а) за алгоритмом кластеризації k-means; б) згідно запропонованого алгоритму кластеризації та методу локалізації вузлів (згідно рис. 2)

Отримані результати свідчать про ефективність використання представлених у дисертаційній роботі алгоритму кластеризації та методу локалізації мережних вузлів, які дають змогу зменшити тривалість передавання повідомлень між двома довільними вузлами самоорганізованої безпроводної мережі.

Окреме впровадження розробленого алгоритму кластеризації самоорганізованої безпроводної мережі дає змогу зменшити тривалість пошуку маршруту при такій же конфігурації мережі з 45 до 27,5 с, тобто до 1,6 разів (див. рис. 6).

Оскільки кількість вузлів самоорганізованої мережі може збільшуватись, на рис. 7 представлено результати моделювання тривалості процесу визначення маршруту у процесі масштабування мережі.

Результати дослідження показують, що у випадку масштабування мережі, врахування не лише евклідової відстані, але й рівня сигнал /шум у радіоканалах дозволяє зменшити час передавання в середньому до 4 разів (це впливає з рис. 7).

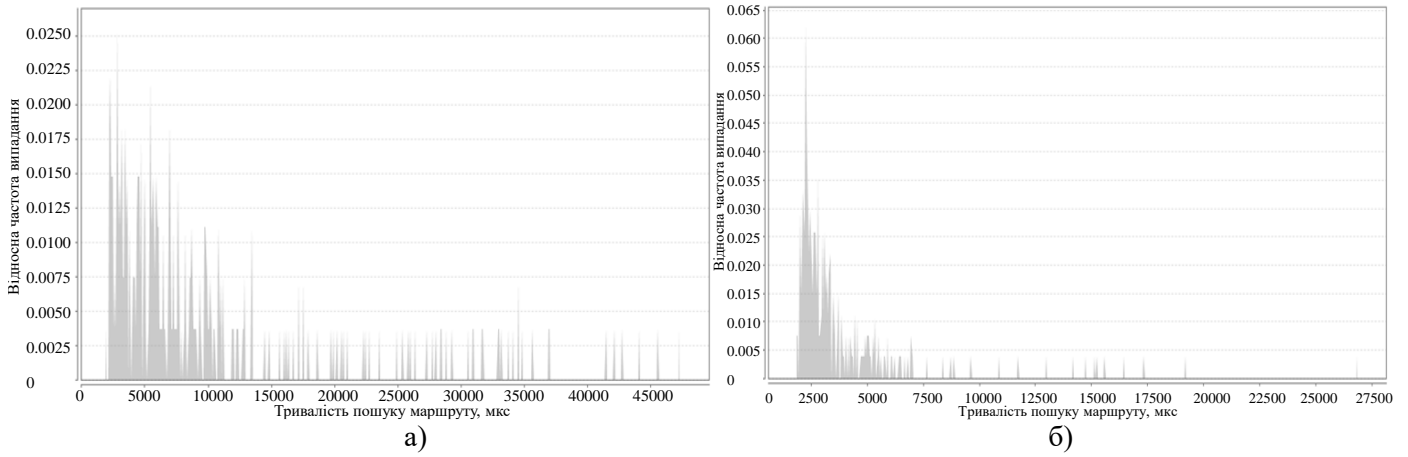


Рис. 6. Оцінювання тривалості пошуку маршруту при функціонуванні мережі з 18 вузлами а) без впровадження запропонованого алгоритму кластеризації; б) із впровадженням алгоритму кластеризації (згідно рис. 2)

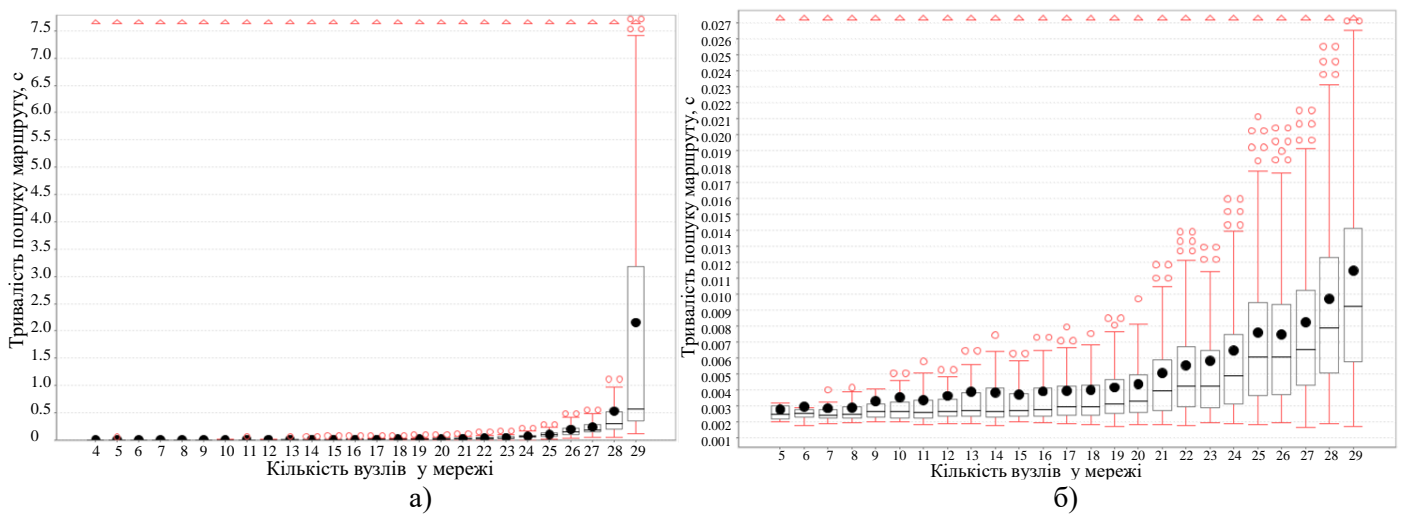


Рис. 7. Узагальнена характеристика тривалості пошуку маршруту в залежності від розміру мережі а) за алгоритмом k-means; б) за запропонованим авторкою алгоритмом кластеризації

Для дослідження процесів маршрутизації всередині кожного кластера мережі пропонується модель зони перекриття кластерів у самоорганізованих мережах, яка, на відміну від існуючих, дає змогу застосувати схему перепризначення логічних адрес мережним вузлам, які функціонують у цих кластерах і забезпечувати необхідний рівень якості обслуговування у разі програмних чи апаратних збоїв.

Основою цієї моделі є зміна схеми перепризначення логічних адрес і способу визначення наступного вузла в маршруті передачі повідомлення у разі програмно-апаратних збоїв. В момент, коли необхідно встановити зв'язок певної точки з іншими, здійснюється розсилка пакетів у всіх напрямках: від кожної точки до всіх сусідніх точок. Поле пакету змінюється при проходженні через кожен вузол маршруту. Коли пакет потрапляє до вузла-отримувача, відбувається порівняння значень поля пакетів «метрика прямого маршруту», які прийшли різними шляхами, і тоді маршрут, який має найменше серед них значення, стає оптимальним. Проміжні вузли визначають свою приналежність до вибраного маршруту за допомогою «метрики зворотнього маршруту».

Запропонована модель дає можливість прогнозувати збіжність в епізодичній мережі в типових умовах її експлуатації.

На основі представлених на рис. 8 результатів моделювання видно, що затримка при передаванні голосових даних зменшується на 5% у порівнянні з алгоритмами AODV та OLSR. Завдяки можливості локального відновлення маршруту вдалося досягти зменшення часу зв'язності між вузлами та підвищити ефективність використання пропускної здатності каналів з 500 кбіт/с до 3500 кбіт/с (рис. 9).

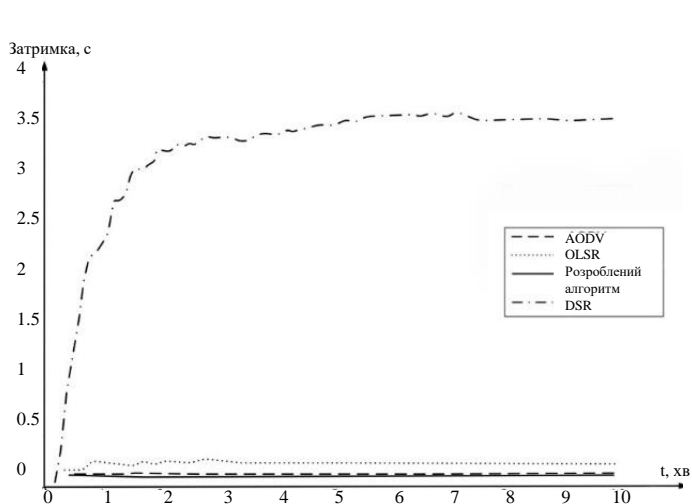


Рис. 8. Середня затримка при передаванні голосових даних

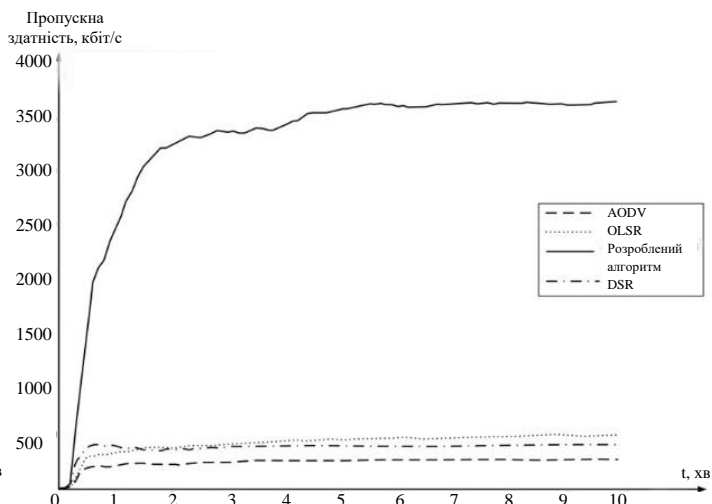


Рис. 9. Загальна пропускна здатність мережі

У четвертому розділі – «Підвищення ефективності маршрутизації інформаційних потоків у самоорганізованих мережах» – розроблено комплексний метод маршрутизації на основі знаходження глобального екстремуму функції впорядкованого випадкового пошуку з додаванням/видаленням вузла, що, на відміну від існуючих, дав змогу утворювати множину маршрутів та здійснювати її послідовне упорядкування за критерієм максимізації рівня QoS з урахуванням неоднорідностей у мережі.

Оскільки характерною особливістю самоорганізованих мереж є динамічно змінна топологія, що формується на основі автономних вузлів, то важливим питанням для таких мереж є визначення найкращого маршруту передавання інформації. У роботі запропоновано модифікацію алгоритмів маршрутизації на основі урахування зони досяжності між вузлами.

Модифікація мурашкового алгоритму маршрутизації проведена з використанням параметра ймовірності переходу між вузлами -  $P^*$  із ефективним відхиленням невідповідних маршрутів (рис.10).

Модифікація методу імітації відпалу пропонується на основі додавання або видалення транзитного вузла (рис. 11).

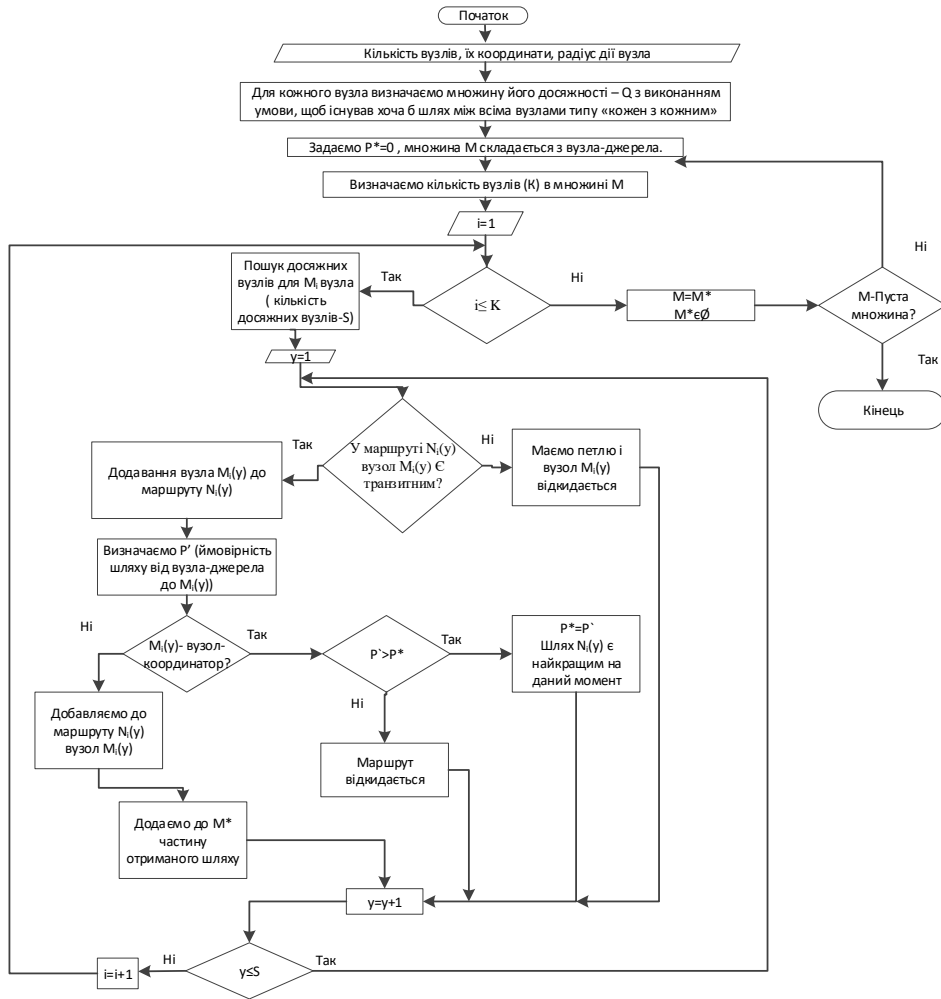


Рис. 10. Блок-схема модифікованого мурашкового алгоритму

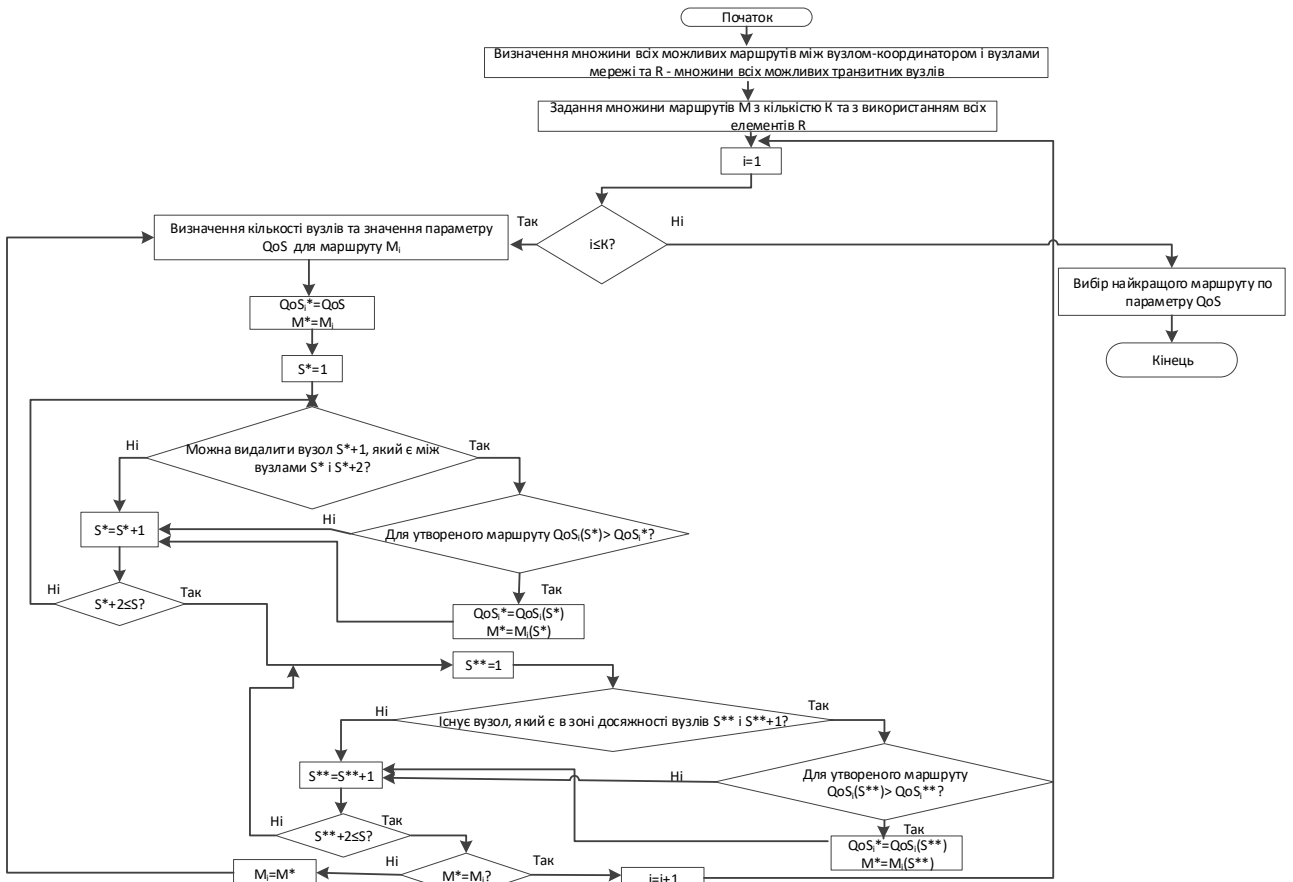


Рис. 11. Блок-схема модифікованого алгоритму імітації відпаду



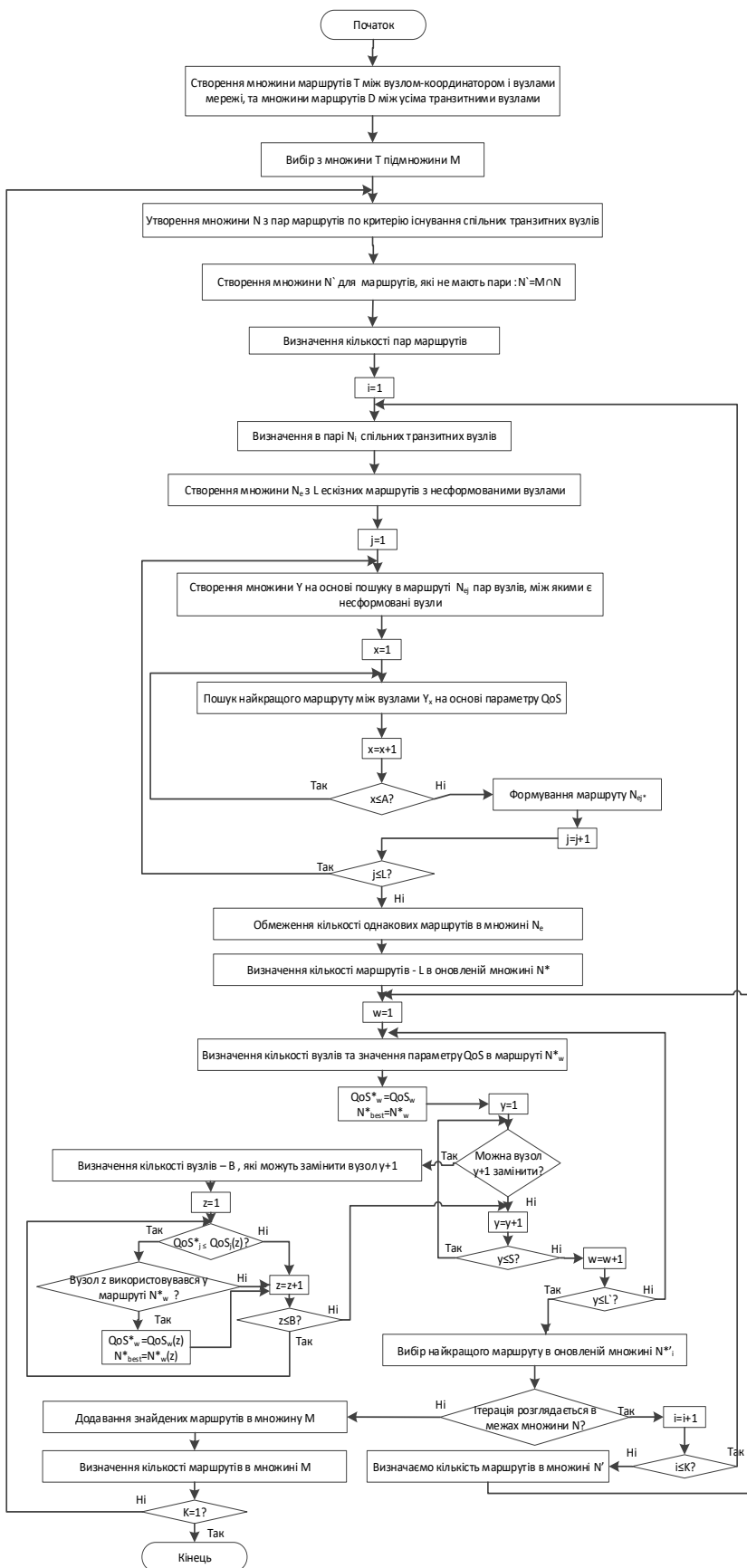


Рис. 12. Блок-схема модифікованого генетичного алгоритму для маршрутизації у самоорганізованих мережах

Модифікація генетичного алгоритму для маршрутизації в самоорганізованих мережах пропонується зміною транзитного вузла на основі урахування зони досяжності сусідніх вузлів (рис. 12).

На основі представлених модифікованих алгоритмів – мурашкового та імітації відпалу (рис. 10-11) – пропонуємо використовувати комплексний метод маршрутизації, який з оновленої множини кращих маршрутів, що утворюється модифікованим алгоритмом імітації відпалу, здійснює вибір найкращого маршруту за критерієм часу передавання даних шляхом використання модифікованого мурашкового алгоритму. Суть методу (рис. 13) полягає у створенні множини кращих маршрутів, які утворюються завдяки роботі модифікованих алгоритмів імітації відпалу та мурашкового, та використання яких дає змогу знаходити глобальний екстремум деякої функції на основі впорядкованого випадкового пошуку, а саме: здійснювати пошук маршруту з кращим значенням параметру QoS на основі видалення/додавання вузла з маршруту, а також враховувати неоднорідності в мережі. Функціонування розробленого методу маршрутизації здійснюється при умові, що вузол для видалення/додавання знаходиться в межах спільної зони досяжності множини вузлів, які розглядаються.

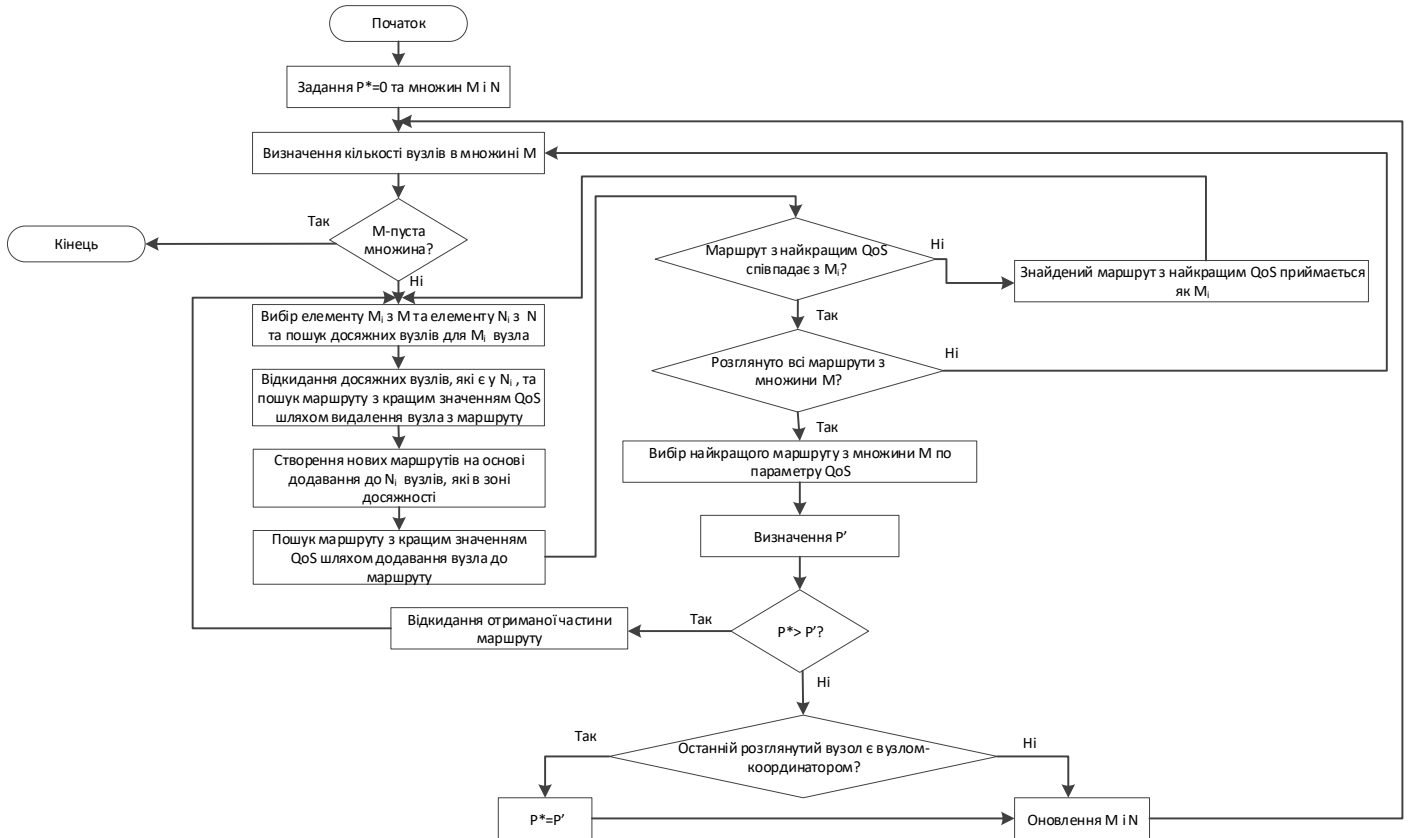


Рис. 13. Узагальнена блок-схема розробленого алгоритму маршрутизації інформаційних потоків

Застосування комплексного методу маршрутизації інформаційних потоків у безпроводних самоорганізованих мережах дає змогу досягти зменшення тривалості пошуку маршруту при тій же конфігурації мережі, а саме: при функціонуванні мережі з 30 вузлів затримка при передаванні даних зменшується до 2 разів (рис. 14).

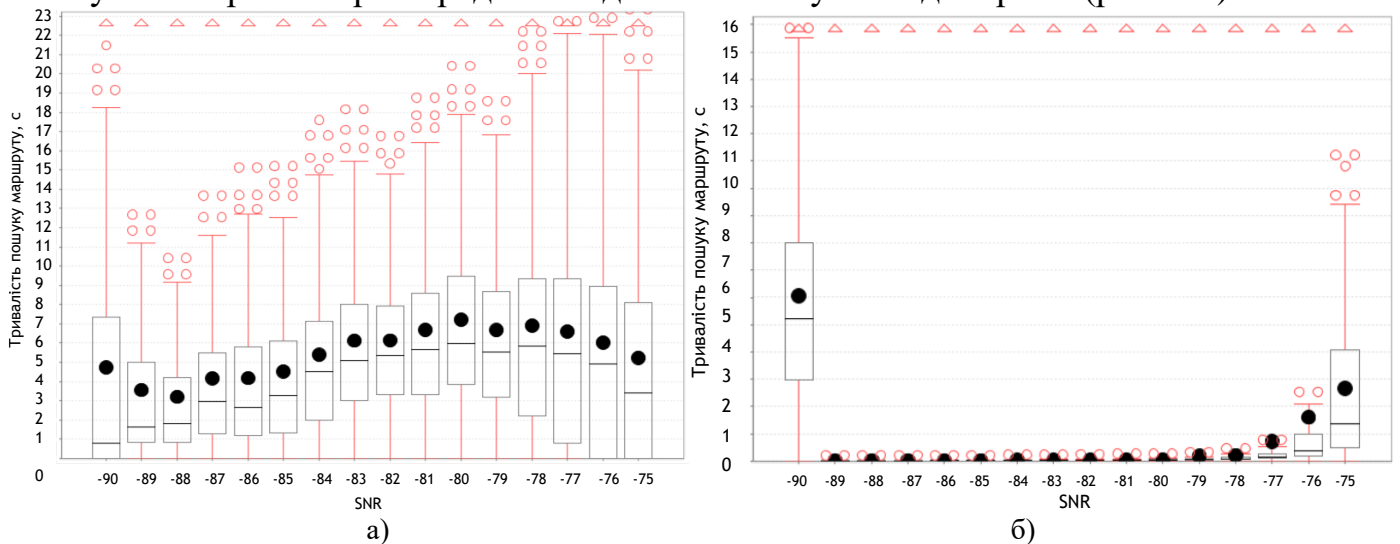


Рис. 14. Залежність тривалості пошуку маршруту від значень SNR а) без використання комплексного методу маршрутизації; б) із запропонованим комплексним методом маршрутизації (див. рис. 13)



## ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розв'язано наукове завдання удосконалення методів маршрутизації інформаційних потоків у безпроводних самоорганізованих мережах шляхом покращення часових параметрів маршрутизації та передавання інформації в умовах динамічного зростання інтенсивності її потоків та нестабільності рівня шумів у радіоканалах.

Основні результати роботи полягають у наступному:

1. Проведено аналіз особливостей побудови безпроводних самоорганізованих мереж. Важливим питанням при передаванні даних по безпроводних, зокрема сенсорних, мережах залишається підвищення ефективності процесів маршрутизації, які безпосередньо впливають на збалансованість та рівномірність використання ресурсів радіоканалу, а також сумісне використання ліцензованих радіочастотних смуг без впливу на процеси передавання даних інших користувачів.

2. Удосконалено метод локалізації вузлів сенсорної мережі, який, на відміну від існуючих, базується на алгоритмічному підході Терстона з використанням діаграми потужності Вороного з правильними взаємозв'язками суміжності, що дало змогу підвищити точність визначення віртуальних координат мережних вузлів на канонічному одиничному дискові Пуанкаре, покращуючи якість розв'язання завдань маршрутизації в евклідовому просторі. Результати проведеного моделювання показали, що із застосуванням удосконаленого методу локалізації вузлів мережі вдалося забезпечити ефективність жадібною енергетичною маршрутизації на рівні 1,25 коефіцієнта еластичності за рахунок підвищення точності визначення віртуальних координат мережних вузлів.

3. Для розв'язання завдань маршрутизації у безпроводній сенсорній мережі удосконалено метод кластеризації сенсорних вузлів із урахуванням моделі поширення сигналу в радіоканалі. Суть алгоритму полягає у розбитті множини елементів векторного простору на заздалегідь відоме число кластерів та перевизначенні центроїда кожного кластера в кожній новій ітерації. Метрика маршрутизації формується на основі розрахунку евклідової відстані між вузлами та з урахуванням моделі поширення сигналу. Результати дослідження показують, що завдяки впровадженню методу локалізації вузлів та розробленого алгоритму кластеризації тривалість пошуку маршруту між довільно взятою парою вузлів зменшилась до 4,5 разів. Окреме впровадження розробленого алгоритму кластеризації дає змогу зменшити тривалість пошуку маршруту з 45 до 27,5 с, тобто до 1,6 разів. Для випадку масштабування мережі результати дослідження показали, що врахування евклідової відстані та рівня сигнал /шум дає змогу зменшити час передавання даних до 4 разів.

4. Запропоновано модель визначення станів телекомунікаційної мережі з використанням тензорного представлення її топологічної структури після кластеризації із використанням криволінійної системи координат. Пропонується збільшити кількість компонент метричного тензора, що дало змогу представити Евклідову метрику у симетричному тензорному полі, яке застосовується для опису деформації Ріманової метрики. Використання цієї моделі дало змогу здійснювати моніторинг станів топологічної структури після кластеризації та точніше формувати таблиці маршрутизації в конкретні моменти часу.

5. Розроблено модель зони перекриття кластерів у самоорганізованих мережах, яка дає змогу знизити затримку передавання даних на 5 % у порівнянні з традиційними

протоколами маршрутизації за рахунок застосування схеми перепризначення логічних адрес мережним вузлам, які функціонують у цих кластерах. Такий спосіб відновлення маршруту дає змогу при збільшенні швидкості пересування вузлів досягти зменшення часу зв'язності між вузлами та підвищити ефективність використання пропускну здатності каналів з 500 кбіт/с до 3500 кбіт/с.

6. Розроблено комплексний метод маршрутизації на основі знаходження глобального екстремуму функції впорядкованого випадкового пошуку з додаванням/видаленням вузла. Суть методу полягає у створенні множини кращих маршрутів, які утворюються завдяки роботі модифікованих алгоритмів імітації відпалу та мурашкового, використання яких дає змогу знаходити глобальний екстремум деякої функції на основі впорядкованого випадкового пошуку, а саме: здійснювати пошук оптимізованого маршруту з кращим значенням параметру QoS на основі видалення/додавання вузла з маршруту, а також враховувати неоднорідності в мережі. Завдяки інтеграції методів кластеризації та маршрутизації інформаційних потоків для самоорганізованих мереж вдалося досягти зменшення тривалості пошуку маршруту. Ефективне застосування методу кластеризації з урахуванням моделі поширення сигналу дало змогу зменшити значення коефіцієнту бітових помилок до 7%. Моніторинг тривалості передавання даних від вузла-джерела до вузла-отримувача та процесів пошуку найкоротшого маршруту в безпроводній самоорганізованій мережі при використанні комплексного методу маршрутизації інформаційних потоків показав, що затримка на передавання даних зменшилася до 2 разів. Це дає змогу забезпечити високу працездатність мережі в цілому та підтримувати необхідний рівень параметрів QoS для кінцевих користувачів.

## **СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

### **Статті у наукових фахових виданнях України та наукових періодичних виданнях інших держав, що входять до міжнародних наукометричних баз даних:**

1. <sup>1</sup>Климаш Ю.В. Комплексний метод маршрутизації інформаційних потоків у самоорганізованих мережах / <sup>1</sup>Ю.В. Климаш, О.М. Шпур, М.В. Кайдан // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Радіоелектроніка та телекомунікації. – Львів. – 2017. – №885. – С.76-87. (Index Copernicus).

2. <sup>1</sup>Климаш Ю.В. Модель визначення метричного тензора в телекомунікаційній мережі на основі криволінійної системи координат / <sup>1</sup>Ю.В. Климаш, М.В. Кайдан, Б.М. Стрихалюк // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Радіоелектроніка та телекомунікації. – Львів. – 2017. – №874. – С. 103-110. (Index Copernicus).

3. Demydov I. The Structural-Functional Synthesis of IoT Service Delivery Systems by Performance and Availability Criteria / Ivan Demydov, <sup>1</sup>Yulia Klymash, Mykola Brych, Mykhailo Klymash // Internet of Things (IoT) and Engineering Applications (Canada). – May, 2017. – Vol. 2. – Issue 1. – P. 1-13. (друковане іноземне наукове періодичне видання з напряму, ISSN 2371-8609) (Cross Ref).

4. Стрихалюк Б.М. Алгоритм максимізації часу життя сенсорної мережі з використанням концепції віртуальних вузлів / Б. М. Стрихалюк, <sup>1</sup>Ю. В. Климаш, І.І. Болюбаш // Вісник Національного університету «Львівська політехніка».

---

<sup>1</sup>Прізвище Климаш змінено на Пиріг на підставі свідоцтва про шлюб: серія 1-СГ №355408 від 14.07.2018.

Радіоелектроніка та телекомунікації. – Львів. – 2016. – №849. - С. 173-178. (Index Copernicus).

5. Demydov I.V. The structural-functional synthesis of cloud service delivery platform after service availability and performance criteria // Demydov I.V., Strykhalyuk B.M., Shpur O.M., Mohamed Mehdi El Hatri, <sup>1</sup>Klymash Yu.V. // Системи обробки інформації : зб. наук. пр. / Х: Харк. ун-т Повітр. Сил ім. Івана Кожедуба. – 2015.– №1(126).– С. 144-149.(Index Copernicus).

6. Стрихалюк Б.М. Підвищення ефективності динамічної маршрутизації у гетерогенних сервісно-орієнтованих системах з використанням гіперболічних потоків Річчі // Б.М. Стрихалюк, <sup>1</sup>Ю.В. Климаш, І.Б. Стрихалюк, Б. В. Коваль // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Радіоелектроніка та телекомунікації. – Львів. – 2015. – №818. –С. 189-194. (Index Copernicus).

**Публікації у матеріалах конференцій, що входять до міжнародних наукометричних баз даних:**

7. <sup>1</sup>Klymash Y. Modified Routing Algorithms for Self-Organized Networks / <sup>1</sup>Yulia Klymash, Mykola Kaidan, Bogdan Strykhalyuk // Modern problems of radio engineering, telecommunications, and computer science Proceedings of the International Conference TCSET'2018. (Lviv-Slavske, Ukraine February 20 – 24, 2018) – Lviv: Publishing House of Lviv Polytechnic – 2018. – P.243-246. (Scopus).

8. <sup>1</sup>Klymash Y. Increasing the reliability of distribution systems by the use of intrusion detection system based on ricci flows / <sup>1</sup>Y. Klymash, B. Strykhalyuk // Proceedings of 14th international conference “The experience of designing and application of CAD Systems in microelectronics” CADSM'2017. (21-25 February, Lviv-Poljana, Ukraine), 2017. – P.385-387. (Scopus).

9. Kaidan M. Metric Tensor Definition Model for Service-Oriented Network Based on Curvilinear Coordinates Systems / Mykola Kaidan, Olga Shpur and <sup>1</sup>Yulia Klymash // 4th IEEE International Scientific-Practical Conference “Problems of Infocommunications. Science and Technology” (PICS&T'2017). Conference proceedings. (10-13 October, Kharkiv, Ukraine), 2017. - Kh:KHNURE. – P. 430-433. (Scopus).

10. Maksymyuk T. Game theoretical framework for multi-operator spectrum sharing in 5G heterogeneous networks / Taras Maksymyuk; Mykola Brych; <sup>1</sup>Yulia Klymash; Maryan Kyryk; Mykhailo Klymash // 4th IEEE International Scientific-Practical Conference «Problems of Infocommunications. Science and Technology» (PICS&T'2017). Conference proceedings. (10-13 October, Kharkiv, Ukraine), 2017. - Kh: KHNURE. - P. 515-518. (Scopus).

11. <sup>1</sup>Klymash Y. Algorithm for greedy routing based on the Thurston algorithm in sensor networks // <sup>1</sup>Y. Klymash, B. Strykhalyuk, I. Strykhalyuk // Modern problems of radio engineering, telecommunications, and computer science. Proceedings of the International Conference TCSET'2016. (Lviv-Slavske, Ukraine February 23 - 26, 2016). – Lviv: Publishing House of Lviv Polytechnic – 2016 – P. 652-654. (Scopus).

12. Strykhalyuk B. Synthesis of distributed service-oriented structures cloud networks is based on algorithm for determining hyperbolic virtual coordinates / B. Strykhalyuk, O. Shpur, I. Demydov, <sup>1</sup>Yu. Klymash // Proceedings of XIIIth international conference «The experience of designing and application of CAD Systems in microelectronics» CADSM'2015. (24-27 February, Lviv-Poljana, Ukraine). – 2015. – P. 231-235. (Scopus).

<sup>1</sup> Прізвище Климаш змінено на Пиріг на підставі свідчення про шлюб: серія 1-СГ №355408 від 14.07.2018.

**Публікації у матеріалах міжнародних та всеукраїнських конференцій:**

13. <sup>1</sup>Климаш Ю.В. Модель дослідження алгоритмів маршрутизації само організованих мереж / <sup>1</sup>Ю.В. Климаш, М.В. Кайдан, Б.М. Стрихалюк // VI міжнародна науково-практична конференція (I Міжнародний симпозіум) «Практичне застосування нелінійних динамічних систем в інфокомунікаціях» (9-11 листопада 2017, м.Чернівці, Україна) –Чернівці:«Місто», 2017. – С.92-94.

14. Стрихалюк Б.М. Маршрутизація з гарантованою доставкою в 3D безпроводних сенсорних мережах / Б.М. Стрихалюк, <sup>1</sup>Ю.В. Климаш // X Міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми телекомунікацій» ПТ-2016: Збірник матеріалів конференції (19-22 квітня 2016р. м. Київ), 2016. – К.: НТТУ «КПІ» – С.471-473.

15. Кирик М.І. Багаторівнева модель буферизації даних у вузлах обслуговування мультисервісного трафіку / М.І. Кирик, Н.М. Плєсканка, <sup>1</sup>Ю.В. Климаш // Фізико-технологічні проблеми радіотехнічних пристроїв, засобів телекомунікацій, нано- та мікроелектроніки: матеріали IV Міжнародної науково-практичної конференції (23-25 жовтня 2014 р. м. Чернівці), 2014 – С. 110-111.

**АНОТАЦІЯ**

Пиріг Ю.В. Моделі та алгоритми маршрутизації інформаційних потоків в самоорганізованих мережах. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.12.02 – телекомунікаційні системи та мережі. – Національний університет «Львівська політехніка» Міністерства освіти і науки України, м. Львів, 2018.

Дисертація присвячена удосконаленню методів маршрутизації інформаційних потоків у безпроводних самоорганізованих мережах шляхом покращення часових параметрів маршрутизації та передавання інформації в умовах різкого зростання динаміки потоків та нестабільності рівня шумів у радіоканалах. Встановлено, що важливим завданням при передаванні даних по безпроводних сенсорних мережах залишається забезпечення ефективності маршрутизації, яка безпосередньо впливає на збалансованість та рівномірність використання ресурсів радіоканалу, а також сумісне використання ліцензованих частотних смуг без впливу на процеси передавання користувачів. Для розв'язання окреслених завдань у роботі вперше запропоновано комплексний метод маршрутизації на основі знаходження глобального екстремуму функції впорядкованого випадкового пошуку з додаванням/видаленням вузла для утворення множини маршрутів та їх послідовного упорядкування за критерієм максимізації рівня QoS з урахуванням неоднорідностей у мережі. Удосконалено метод локалізації вузлів сенсорної мережі на основі алгоритмічного підходу Терстона з використанням діаграми потужності Вороного, що дало змогу підвищити точність визначення віртуальних координат при застосуванні диску Пуанкаре. Удосконалено метод кластеризації множини сенсорних вузлів для зменшення тривалості пошуку маршруту між довільною їх парою на основі визначення центроїда кластера із урахуванням моделі поширення сигналу в радіоканалі. Набула подальшого розвитку модель зони перекриття кластерів у самоорганізованих мережах, яка дала змогу застосувати схему перепризначення логічних адрес мережним вузлам, що функціонують у цих кластерах, і забезпечувати необхідний рівень якості

<sup>1</sup> Прізвище Климаш змінено на Пиріг на підставі свідчення про шлюб: серія 1-СГ №355408 від 14.07.2018.

обслуговування у разі програмних чи апаратних збоїв. Доведено ефективність запропонованих в роботі рішень з використанням розроблених математичних і імітаційних моделей.

Ключові слова: самоорганізовані мережі, якість обслуговування, маршрутизація, кластеризація.

### **АННОТАЦИЯ**

Пирог Ю.В. Модели и алгоритмы маршрутизации информационных потоков в самоорганизующихся сетях. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.12.02 – телекоммуникационные системы и сети. – Национальный университет «Львівська політехніка» Министерства образования и науки Украины, г. Львов, 2018.

Диссертация посвящена усовершенствованию методов маршрутизации информационных потоков в беспроводных самоорганизующихся сетях путем улучшения временных параметров маршрутизации и передачи информации в условиях резкого роста динамики потоков и нестабильности уровня шумов в радиоканалах. Показано, что важной задачей при передаче данных по беспроводным сенсорным сетям остается обеспечение эффективности маршрутизации, которая непосредственно влияет на сбалансированность и равномерность использования ресурсов радиоканала, а также совместное использование лицензированных частотных полос без влияния на процессы передачи пользователей. Для решения определенных задач в работе впервые предложен комплексный метод маршрутизации на основе нахождения глобального экстремума путем упорядоченного случайного поиска с добавлением / удалением узла для образования множества маршрутов и их последовательного упорядочения по критерию максимизации уровня QoS с учетом неоднородностей в сети. Усовершенствован метод локализации узлов сенсорной сети на основе алгоритмического подхода Терстона с использованием диаграммы мощности Вороного, что позволило повысить точность определения виртуальных координат при применении модели диска Пуанкаре. Усовершенствован метод кластеризации множества сенсорных узлов для уменьшения продолжительности поиска маршрута между произвольной их парой на основе определения центра кластера с учетом модели распространения сигнала в радиоканале. Получила дальнейшее развитие модель зоны перекрытия кластеров в самоорганизующихся сетях, которая позволила применить схему переназначения логических адресов сетевым узлам, функционирующим в этих кластерах, и обеспечивать необходимый уровень качества обслуживания в случае программных или аппаратных сбоев. Доказана эффективность предложенных в работе решений с использованием разработанных математических и имитационных моделей.

Ключевые слова: самоорганизующиеся сети, качество обслуживания, маршрутизация, кластеризация.

### **ABSTRACT**

Pyrih Yu. V. Models and algorithms for data flows routing in self-organized networks. – On the rights of the manuscript.

A thesis submitted in fulfilment of the PhD degree in technical sciences on specialty 05.12.02 – telecommunication systems and networks. – Lviv Polytechnic National University of Ministry for Education and Science of Ukraine, Lviv, 2018.

The thesis is devoted to solving the actual scientific task of the data flows routing methods enhancement in self-organized networks by improvement of the data transmission latency in conditions of the dynamic traffic intensity and noise fluctuations in modern wireless sensor networks in order to satisfy user requirements in real-time applications.

The principles and features of the wireless self-organizing networks design have been analysed to determine the key tasks, which should be solved to improve the balance and fairness of radio resource utilization such as improvement of the routing efficiency and spectrum sharing in licensed bands without jeopardizing the user experience. In order to solve the given tasks this thesis propose new complex routing method based on the global extremum determination for the function of sorted random search by adding/removing of the nodes. Proposed method allows creating and arranging of the set of routes by using the QoS maximization and taking into account the network heterogeneity. The nodes localization method has been improved based on the Thurston's algorithm using the Voronoi power diagram with correct adjacent connections, which allows to increase the precision of virtual coordinates by using canonical unit Poincare disk to improve the quality of routing in Euclidian space. The clustering method of sensor nodes has been improved by the determination of centroid taking into account the wireless channel propagation model to reduce the time for route searching between the arbitrary pair of nodes. The model of clusters overlapping in self-organized wireless networks has been further developed by using the logical nodes addresses reassignment within the given cluster to ensure the target QoS level in case of hardware or software failures. The simulations have been conducted based on the developed analytical and empirical models in conditions of noise fluctuations in wireless channels to prove the efficiency of the proposed solutions. Simulation results show that by using the proposed complex routing method we can ensure the high reliability of the wireless sensor network and maintain the required QoS level for end users. Simulations on the efficiency of proposed clustering method show that bit error rate has been reduced by 7% comparing to existing solutions. Simulations of the transmission time between source node and destination node using the shortest path selection by the proposed complex routing method show that the transmission latency has been reduced two times comparing to conventional routing methods for the same configuration of the wireless sensor network.

Keywords: self-organized networks, quality of service, routing, clustering.