

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

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

**ПИРІГ ЮЛІЯ ВОЛОДИМИРІВНА**

УДК 621.391

**ДИСЕРТАЦІЯ**

**Моделі та алгоритми маршрутизації інформаційних потоків в  
самоорганізованих мережах**

05.12.02 – телекомунікаційні системи та мережі

(шифр і назва спеціальності)

05 «Технічні науки»

(галузь знань)

Подається на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,  
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

\_\_\_\_\_ /Ю.В. Пиріг/

**Науковий керівник:**

Стрихалюк Богдан Михайлович,

доктор технічних наук

*Ідентичність всіх примірників дисертації*

**ЗАСВІДЧУЮ:**

*Вчений секретар спеціалізованої  
вченої ради*

**/ І.В. Демидов/**

**Львів – 2018**

## АНОТАЦІЯ

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

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.12.02 «Телекомунікаційні системи та мережі» (172 – Телекомунікації та радіотехніка) – Національний університет «Львівська політехніка» Міністерства освіти і науки України, Львів, 2018.

Дисертація присвячена вирішенню актуального наукового завдання удосконалення методів маршрутизації інформаційних потоків у самоорганізованих мережах шляхом покращення часових параметрів маршрутизації та передавання інформації в умовах різкого зростання динаміки потоків та нестабільності рівня шумів у радіоканалах .

У першому розділі здійснено аналітичний огляд літературних джерел за темою дисертації, на основі чого проведено аналіз особливостей побудови самоорганізованих мереж; здійснено огляд методів маршрутизації та їх вплив на якість передавання даних.

Другий розділ роботи присвячено детальному дослідженню методів, використання яких дозволяє покращити якість надання послуг в безпроводних самоорганізованих мережах: метод локалізації та метод кластеризації сенсорних вузлів. Удосконалено метод локалізації вузлів сенсорної мережі, який базується на алгоритмічному підході Терстона, шляхом використанням діаграми потужності Вороного з правильними взаємозв'язками суміжності для підвищення точності визначення віртуальних координат при застосуванні канонічного одиничного диску Пуанкаре. Для вирішення задач кластеризації в безпроводній сенсорній мережі запропоновано метод кластеризації сенсорних вузлів із врахуванням моделі поширення сигналу в радіоканалі. Метрика центрів кластерів формується на основі розрахунку Евклідової відстані між вузлами та моделі поширення сигналу. В якості оцінки втрат у досліджуваній безпроводній самоорганізованій мережі запропоновано використовувати однопроменеву модель Motley-Keenan, яка дозволяє враховувати втрати потужності сигналу та відслідковувати рівень коефіцієнта бітових помилок

(BER) при проходженні через кожен вузол мережі. Запропоновано модель визначення станів телекомунікаційної мережі з використанням тензорного представлення її топологічної структури на основі криволінійної системи координат, що дозволить більш точно формувати таблиці маршрутизації в конкретні моменти часу.

У третьому розділі дисертації проведено моделювання ефективності пропозованих методу локалізації та алгоритму кластеризації вузлів безпроводної самоорганізованої мережі. Для оцінки ефективності удосконаленого методу локалізації вузлів самоорганізованої мережі використано імітаційну модель мережі із жадібною маршрутизацією, на основі аналізу роботи якої отримано залежність, що свідчить про максимізацію відношення коефіцієнта еластичності, усередненого по всіх парах вершин та триангуляціям одного розміру, що дозволяє пришвидшити процес ініціалізації вузлів мережі та підвищити точність визначення віртуальних координат. Таким чином, при значенні середнього коефіцієнта еластичності мережі – 1,25 процес надання сервісу кінцевому користувачеві буде здійснюватись швидше. Розроблено програмний симулятор для дослідження процесів передавання даних у безпроводних самоорганізованих мережах, аналіз роботи якого підтверджує, що завдяки впровадженню пропозованих методу локалізації вузлів та алгоритму кластеризації тривалість пошуку маршруту між довільно взятою парою вузлів зменшилась у 4,5 разів, що дає змогу зменшити час передачі повідомлень між вузлом-джерелом і вузлом-отримувачем. При здійсненні масштабуванні мережі показано, що врахування Евклідової відстані, та рівня сигнал / шум дозволяє зменшити час передавання даних у самоорганізованій безпроводній мережі фактично у 4 рази. Удосконалено модель зони перекриття кластерів у самоорганізованих мережах на основі використання схеми перепризначення логічних адрес мережним вузлам, які функціонують у цих кластерах, що дозволяє забезпечувати необхідний рівень якості обслуговування у разі програмних чи апаратних збоїв. Завдяки можливості локального відновлення маршруту при збільшенні швидкості

переміщення вузлів використання запропонованої моделі дозволяє зменшити час зв'язності між вузлами та підвищити ефективність використання пропускної здатності каналів з 500 кбіт/с до 3500 кбіт/с.

Четвертий розділ роботи присвячено практичним аспектам реалізації запропонованих методів кластеризації вузлів та маршрутизації інформаційних потоків у саморганізованих мережах. У роботі представлено модифікацію алгоритмів «природних обчислень»: мурашкового, в якому використано параметр ймовірності переходу між вузлами з відхиленням невідповідних маршрутів; генетичного, в якому зміна транзитного вузла здійснюється на основі зони досяжності сусідніх вузлів. Також запропоновано модифікацію методу імітації відпалу, в якому пропонується здійснювати додавання або видалення транзитного вузла на основі можливості доступу до сусідніх вузлів. Розроблено комплексний підхід для підвищення ефективності маршрутизації даних у самоорганізованих мережах на основі створення множини кращих маршрутів, що утворюються завдяки роботі модифікованих алгоритмів імітації відпалу та мурашкового, використання яких дозволяє знаходити глобальний екстремум деякої функції на основі впорядкованого випадкового пошуку та здійснювати пошук маршруту з кращим значенням параметру QoS на основі видалення / додавання вузла з маршруту, а також враховувати неоднорідності в мережі. Результати моделювання показали доцільність використання комплексного методу маршрутизації інформаційних потоків для самоорганізованих мереж, оскільки у випадку можливості вибору маршрутів, які характеризуються мінімальною кількістю транзитних вузлів, перевага повинна надаватися маршрутам із найменшим часом передавання даних. Це дозволить забезпечити високу працездатність мережі в цілому та підтримувати необхідний рівень параметрів QoS для кінцевих користувачів. Ефективне застосування запропонованого методу кластеризації з урахуванням моделі поширення сигналу дозволило зменшити значення коефіцієнту бітових помилок на 7%. Моніторинг тривалості передавання даних від вузла-джерела до вузла-отримувача та пошуку найкоротшого маршруту в безпроводній

самоорганізованій мережі при впровадженні комплексного методу оптимізації маршрутизації інформаційних потоків показав, що при тій же конфігурації мережі затримка на передавання даних зменшилася у 2 рази.

*Ключові слова:* самоорганізована мережа, якість обслуговування, маршрутизація, кластеризація.

Список публікацій здобувача:

*Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:*

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». Радіoeлектроніка та телекомунікації №885 – Львів. – 2017. – С.76-87.

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». Радіoeлектроніка та телекомунікації №874 – Львів. – 2017. – С. 103-110.

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).

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». Радіoeлектроніка та телекомунікації, №849 – Львів. – 2016.– С. 173-178.

5. Demydov I. V. The structural-functional synthesis of cloud service delivery platform after service availability and performance criteria / I. V. Demydov, B. M.

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

Strykhalyuk, O.M. Shpur, Mohamed Mehdi El Hatri, <sup>1</sup>Yu.V. Klymash // Системи обробки інформації : зб. наук. пр. / Х: Харк. ун-т Повітр. Сил ім. Івана Кожедуба. – 2015. – №1(126) – С. 144-149.

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» №818. Радіоелектроніка та телекомунікації. – Львів. – 2015.– С. 189-194.

*Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:*

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.

8. <sup>1</sup>Klymash Y. Increasing the reliability of distribution systems by the use of intrusion detection system based on ricci flows / 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.

9. <sup>1</sup>Климаш Ю.В. Модель дослідження алгоритмів маршрутизації самоорганізованих 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 , Чернівці, Україна) – Чернівці:«Місто», 2017. – С.92-94.

10. Kaidan M. Metric Tensor Definition Model for Service-Oriented Network Based on Curvilinear Coordinates Systems /Mykola Kaidan, Olga Shpur, <sup>1</sup>Yulia Klymash // 4th IEEE International Scientific-Practical Conference "Problems of Infocommunications, Science and Technology"(PICS&T'2017, 10-13 October, Ukrai-

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

ne), 2017. – Kh:KHNURE – P. 430-433.

11. 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.

12. 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.

13. <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.

14. 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.

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.

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

## 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 of the Ph. D. degree in technical sciences on specialty 05.12.02 «Telecommunication systems and networks» (172 - Telecommunications and Radioengineering). - 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 the first section an analytical review of literary sources on the topic of the dissertation was carried out on the basis of which: an analysis of the peculiarities of the construction of self-organized networks; review of routing methods and their impact on data transfer quality.

The second section is devoted to the detailed study of methods, the use of which allows to improve the quality of service provision in wireless self-organized networks: the method of localization of nodes, the method of clustering sensory nodes. 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. In order to solve clusterization problems in a wireless sensor network, the method of clustering of sensor nodes with the consideration of the model of signal propagation in the radio channel is proposed. The cluster center metrics are based on the calculation of the Euclidean distance between nodes and the pattern of signal propagation. As a loss estimator in the wireless wireless network itself, it is suggested to use the Motley-Keenan single-beam model, which allows for the loss of signal strength when passing through obstacles and to track the level of BER when passing through each node of the network. The model of determination of states of a telecommunication network



with the use of a tensor representation of its topological structure on the basis of the curvilinear coordinate system is proposed, which will allow more accurately to form routing tables at specific moments of time.

In the third section of the thesis, was conducted the efficiency simulation of the proposed method of localization and algorithm of clustering nodes a wireless self-organized network was carried out. In order to evaluate the effectiveness of the improved method of locating the sites of a self-organized network, an imitation model of the network with greedy routing has been developed, based on the analysis of which the dependence is obtained, which indicates the maximization of the ratio of elasticity ratio, averaged over all vertex pairs and triangulations of the same size, which accelerates the process of initializing the nodes of the network and to improve the accuracy of the definition of virtual coordinates. Thus, with an average network elasticity factor of 1.25, the process of providing the service to the end user will be faster. A software simulator for the study of data transfer processes in wireless self-organized networks using greedy routing, whose analysis of work confirms that due to the implementation of the method of localization of nodes and the developed clustering algorithm, the route search time between an arbitrary pair of nodes has decreased by 4.5 times, which allows to reduce the time of transmission of messages between the source node and the receiving node. When the scale of the network is shown, it is shown that consideration not only Euclidean distance, but also the level of signal / noise allows to reduce the time of data transmission in the organized wireless network in fact by 4 times. The model of the overlapping cluster model in self-organized networks has been improved based on the use of the scheme of reassignment of logical addresses to network nodes that function in these clusters, which allows to provide the necessary level of service quality in the event of software or hardware crashes. Due to the ability of the local route reconnection to increase the speed of nodes' use, the proposed routing model can reduce the time between nodes and increase the efficiency of channel bandwidth utilization from 500 kbps to 3500 kbps.

The fourth section is devoted to actual practical aspects of implementation the proposed methods of clustering nodes and routing information flows in self-organized networks. The modification of algorithms of "natural calculations" is proposed: ant colony optimization, in which the parameter of probability of transition between nodes with deviations of inappropriate routes is used; genetic, in which the change of the transit node is carried out on the basis of the reach zone of neighboring nodes. The modification of the annealing method is also presented, with the parallel implementation of which it is proposed to add or remove a transit node based on the possibility of access to neighboring nodes. An integrated approach is developed to improve the efficiency of data routing in self-organized networks based on the creation of the set of best routes generated through the work of modified simulated annealing and ant colony optimization, the use of which allows to find the global extremum of some function on the basis of organized random search and to search the optimized route with the best value the QoS parameter based on removing / adding a node from the route, and also taking into account heterogeneities in the network. The simulation results showed the expediency of using a comprehensive method of streamlining information flows for self-organized networks, since in the case of the possibility of choosing routes that are characterized by a minimum number of transit nodes, preference should be given to routes with the lowest data transmission time. This will ensure the high performance of the network as a whole and maintain the necessary level of QoS parameters for end users. The effective application of the proposed clustering method, taking into account the pattern of signal propagation, has allowed to reduce the value of the bit error rate by 7%. 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.

Key words: self-organized network, quality of service, routing, clustering,

The list of author's publications:

*Proceedings where basic scientific results of thesis are published:*

1. <sup>1</sup>Klymash Yu.V. Comprehensive method of routing information streams in self-organized networks / <sup>1</sup>Yu.V. Klymash, O.M. Shpur, M.V. Kaidan // Herald of Lviv Polytechnic National University, Series of Radioelectronics and Telecommunications, No. 885. – Lviv. – 2017. – P.76-87.

2. <sup>1</sup>Klymash Yu.V. Model definition of the metric tensor in the telecommunications network based on curvilinear coordinate system / <sup>1</sup>Yu.V. Klymash, M.V. Kaidan, B.M. Strykhalyuk // Herald of Lviv Polytechnic National University, Series of Radioelectronics and Telecommunications, No. 874. – Lviv. – 2017.– P. 103-110.

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.

4. Strykhalyuk B.M. The algorithm for maximizing the lifetime of the sensor network using the concept of virtual nodes / B. M. Strykhalyuk, <sup>1</sup>Yu. V. Klymash, I. I. Bolyubash // Herald of Lviv Polytechnic National University, Series of Radioelectronics and Telecommunications, No. 849 – Lviv. – 2016. – P. 173-178.

5. Demydov I.V. The structural-functional synthesis of cloud service delivery platform after service availability and performance criteria / I.V. Demydov, B.M. Strykhalyuk, O.M. Shpur, Mohamed Mehdi El Hatri, <sup>1</sup>Yu.V. Klymash // Information processing systems: collection of scientific works. – Kh: Kharkiv National Air Force University. – 2015. – No.1(126). –P. 144-149.

6. Strykhalyuk B.M. Increasing the Efficiency of Dynamic Routing in Heterogeneous Service-Oriented Systems Using Hyperbolic Flows of Ricci / B.M. Strykhalyuk, <sup>1</sup>Yu.V. Klymash, I.B. Strykhalyuk, B.V. Koval // Herald of Lviv Polytechnic National University, Series of Radioelectronics and Telecommunication,

<sup>1</sup> The surname Klymash has been changed to Pyrih on the basis of a marriage certificate: series 1-CF №355408 dated July 14, 2018

*Proceedings that certify an approvement of thesis:*

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.

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.

9. <sup>1</sup>Klymash Yu.V. The model of research algorithms for routing self-organized networks / <sup>1</sup>Yu.V. Klymash, M.V. Kaydan, B.M. Strykhalyuk // International Scientific-Practical Conference (I International Symposium) "Practical Application of Nonlinear Dynamic Systems for Infocommunication," November 9-11, 2017, Chernivtsi, Ukraine. – Chernivtsi: "Misto", 2017. – P.92-94

10. 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.

11. 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"

<sup>1</sup> The surname Klymash has been changed to Pyrih on the basis of a marriage certificate: series 1-CF №355408 dated July 14, 2018

(PICS&T'2017). Conference proceedings. (10-13 October, Kharkiv, Ukraine), 2017.  
– Kh:KHNURE – P. 515-518.

12. Strykhalyuk B.M. Routing with guaranteed delivery in 3D wireless sensor networks / B.M. Strykhalyuk, <sup>1</sup>Yu.V. Klymash // Materials of the international scientific and technical conference "Problems of telecommunications", Kyiv, April 19-22, 2016. – P.471-473.

13. <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.

14. 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.

15. Kyryk M.I. Multi-level model of data buffering in service nodes of multi-service traffic / M.I. Kyryk, N. M. Pleskanka, <sup>1</sup>Yu.V. Klymash // Physical and technological problems of radio engineering devices, telecommunication, nano and microelectronics, IV International Scientific Practical Conference, 23-25 October 2014, Chernivtsi, Ukraine. – P. 110-112.

<sup>1</sup> The surname Klymash has been changed to Pyrih on the basis of a marriage certificate: series 1-CГ №355408 dated July 14, 2018

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	17
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТА ОСОБЛИВОСТЕЙ МАРШРУТИЗАЦІЇ ІНФОРМАЦІЙНИХ ПОТОКІВ У САМООРГАНІЗОВАНИХ МЕРЕЖАХ .....	24
1.1. Особливості функціонування безпроводних самоорганізованих мереж .....	24
1.2. Аналіз методів маршрутизації у самоорганізованих мережах та їх вплив на якість передавання потоків .....	31
1.3. Забезпечення параметрів QoS у мережах із самоорганізацією .....	38
1.3.1. Особливості передавання інформаційних потоків у вузлах безпроводних самоорганізованих мереж.....	41
1.3.2. Переваги та недоліки існуючих методів маршрутизації безпроводних самоорганізованих мереж.....	44
1.4. Висновки до 1-го розділу .....	47
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИ ПОКРАЩЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ЯКОСТІ НАДАННЯ ПОСЛУГ В БЕЗПРОВІДНИХ САМООРГАНІЗОВАНИХ МЕРЕЖАХ.....	49
2.1. Метод локалізації вузлів мережі з використанням діаграм потужності Вороного з правильними взаємозв'язками суміжності.....	49
2.2. Кластеризація сенсорних вузлів як спосіб підвищення ефективності маршрутизації.....	57
2.2.1. Формалізація алгоритму k-means для вирішення задач кластеризації в безпроводній сенсорній мережі .....	60
2.2.2. Розробка методу кластеризації з урахуванням моделі розповсюдження сигналу .....	65
2.3. Визначення стану телекомунікаційної мережі з використанням моделі тензорного представлення її топологічної структури .....	68

2.4. Застосування моделі тензорного представлення топологічної структури мережі та її вплив на передавання і управління інформаційними потоками.....	72
2.5. Висновки до 2-го розділу .....	75
<b>РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЮВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗПОДІЛУ ІНФОРМАЦІЙНИХ ПОТОКІВ В МЕРЕЖАХ ІЗ САМООРГАНІЗАЦІЄЮ .....</b>	<b>77</b>
3.1. Дослідження ефективності локалізації вузлів мережі із використанням діаграм потужностей Вороного .....	77
3.2. Оцінка ефективності впровадження методу кластеризації сенсорних вузлів з урахуванням моделі розповсюдження сигналу.....	79
3.3. Модель маршрутизації самоорганізованих mesh-мереж з використанням шлюзів .....	96
3.3.1. Маршрутизація повідомлень в одношлюзових безпроводних самоорганізованих мережах деревоподібної топології.....	100
3.4.2. Багатошлюзова безпроводна самоорганізована мережа.....	101
3.4. Оцінка доцільності впровадження пропонованої моделі маршрутизації та її вплив на параметри QoS .....	104
3.5. Висновки до 3-го розділу .....	109
<b>РОЗДІЛ 4. ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ МАРШРУТИЗАЦІЇ ІНФОРМАЦІЙНИХ ПОТОКІВ У САМООРГАНІЗОВАНИХ МЕРЕЖАХ .....</b>	<b>112</b>
4.1. Генетичний алгоритм маршрутизації потоків .....	113
4.2. Маршрутизація інформаційних потоків з використанням мурашкового алгоритму .....	118
4.3. Оптимізація маршрутів передавання даних на основі методу імітації відпалу .....	122
4.4. Комплексний метод оптимізації маршрутизації інформаційних потоків для самоорганізованих мереж.....	126

4.5. Дослідження ефективності маршрутизації інформаційних потоків в самоорганізованій mesh-мережі.....	129
4.6. Висновки до 4-го розділу .....	132
ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ.....	134
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	138
ДОДАТОК 1. АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЙНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	153
ДОДАТОК 2. СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ ТА ВІДОМОСТІ ПРО АПРОБАЦІЮ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ.....	156



## ВСТУП

**Актуальність теми.** В сучасному світі самоорганізовані мережі є потужним інструментом для збору та опрацювання великих обсягів даних на територіях, де розгортання інших типів телекомунікаційних засобів є неможливим або невиправданим. В таких умовах тривалість роботи компонентів такого 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 датчики безпеки, додатки моніторингу здоров'я тощо. Вибір способу організації передавання інформації між сенсорним вузлом і шлюзами або базовими станціями є одним із вирішальних етапів при створенні безпроводної сенсорної мережі.

У той же час, цілий ряд завдань, пов'язаних із розробкою ефективних алгоритмів кластеризації для безпроводних самоорганізованих мереж (MANET, WSN, WMN, VANET), стійких до відмов, ще потребує розв'язання. Для безпроводних мереж з досить високою щільністю використовується кластеризація, отже, важливою є також розробка методики розміщення сенсорних вузлів, що забезпечуватиме необхідну зону 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. Агеев, 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 питаннях ефективності самоорганізованих мереж з точки зору щільності радіопокриття, системи керування та маршрутизації інформаційних потоків, проте не у повній мірі досліджено тривалість пошуку маршрутів у самоорганізованих мережах.

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

Таким чином, враховуючи зростання кількості пристроїв в самоорганізованих мережах, удосконалення методів маршрутизації інформаційних потоків у самоорганізованих мережах шляхом покращення часових параметрів маршрутизації та передавання інформації в умовах різкого зростання динаміки потоків та 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 рамках низки держбюджетних науково-дослідних робіт: № держреєстрації 0111U001223, «Моделі та

структури конвергентних телекомунікаційних мереж на основі CLOUD – технологій» («ДБ/CLOUD») (2013-2014 рр.), № держреєстрації 0113U003184, «Методи побудови та моделі інформаційно-телекомунікаційної інфраструктури на основі SDN-технологій для систем електронного урядування» (ДБ/SDN) (2015-2016), № держреєстрації 0115U000444, «Методи побудови гетерогенних інформаційно-комунікаційних систем для розгортання програмно-конфігурованих мереж 5G подвійного використання» (ДБ/5G) (2017-2018), № держреєстрації 0117U004449, «Розроблення методів адаптивного управління радіочастотним ресурсом у мережах мобільного зв'язку LTE-U для розвитку стандартів 4G/5G в Україні» (ДБ/LTE-U), (2017-2019 рр.).

**Мета і завдання дослідження.** Мета дисертаційної роботи полягає у покращенні часових параметрів маршрутизації та передавання інформації в умовах різкого зростання динаміки 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* – процес 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, теорії інформації, математичної статистики, теорії ймовірностей, теорії випадкових графів, тензорний аналіз, 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 дозволяє 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 дозволяє 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 рамках дисертаційного дослідження результати дають змогу теоретично обґрунтувати тип приймально-передавальних пристроїв і вимоги до протоколів маршрутизації на етапі проектування мережі та виконувати їх математично-програмне удосконалення для підвищення часових параметрів обслуговування інформаційних потоків при її експлуатації.

Основні результати дисертаційної роботи використані та впроваджені:

- у ТзОВ «Телекомунікаційна компанія» для покращення якості обслуговування абонентів шляхом поділу корпоративної мережі на окремі сегменти (кластери);
- у ТзОВ ВТФ «Контех» 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 симпозиумах: 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, 2015 pp.); International Scientific - Practical Conference «Problems of Infocommunications, Science and Technology» PICS&T'2017 (м. Харків, 2017 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Фізико-технологічні проблеми радіотехнічних пристроїв, засобів телекомунікацій, нано- та мікроелектроніки», (м. Чернівці, 2017, 2014 pp.).

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

**Публікації.** За результатами досліджень, опубліковано 15 наукових праць, серед них статей у іноземних періодичних виданнях – 1, статей у наукових фахових виданнях України, що входять до міжнародних наукометричних баз різного рівня – 5, у збірниках матеріалів і тез доповідей міжнародних та

всеукраїнських конференцій – 9, з них індексованих у наукометричній базі Scopus – 6.

**Особистий внесок здобувача.** Всі результати наукових, теоретичних і практичних досліджень, які представлено в дисертаційній роботі, одержані автором особисто. У працях, опублікованих у співавторстві, здобувачеві належать: у роботах [1, 7] – розробка комплексного підходу до оптимізації процесів маршрутизації та підбір параметрів для проведення імітаційного моделювання; [2, 10] – апробація моделі визначення метричного тензора з використанням теореми косинусів для чотирикутників; [3, 14] – дослідження методів структурно-функціонального синтезу телекомунікаційних систем; [4, 14] – дослідження способів визначення віртуальних координат з використанням гіперболічного простору; [5] – дослідження впливу критеріїв доступності та продуктивності системи на її структурно-функціональний синтез; [6, 8] – розробка способу визначення віртуальних координат з використанням гіперболічних потоків Річчі; [9, 12] – дослідження алгоритмів маршрутизації в безпроводних мережах; [11] – дослідження методів підвищення ефективності використання радіочастотного спектру в мережах 5G; [13] – розробка 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 автора.

# РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТА ОСОБЛИВОСТЕЙ МАРШРУТИЗАЦІЇ ІНФОРМАЦІЙНИХ ПОТОКІВ У САМООРГАНІЗОВАНИХ МЕРЕЖАХ

## 1.1. Особливості функціонування безпроводних самоорганізованих мереж

Сучасні технології відкривають перед людством величезні можливості, використання яких дозволяє спростити вирішення завдань у різних галузях. Однією з таких перспективних технологій є безпроводний зв'язок [16].

За прогнозом компанії Cisco, наведеним у звіті «Наочний індекс розвитку мережевих технологій: прогноз і методологія на період 2016-2021 рр.» (Cisco Visual Networking Index™ (VNI) Forecast and Methodology, 2016-2021), трафік від безпроводних та мобільних пристроїв становитиме більше 63 відсотків загального трафіку IP до 2021 року; кількість пристроїв, підключених до IP-мереж буде в три рази перевищувати глобальне населення в 2021 році [17].

Основні переваги використання даної технології в мережах наведено на рис. 1.1.

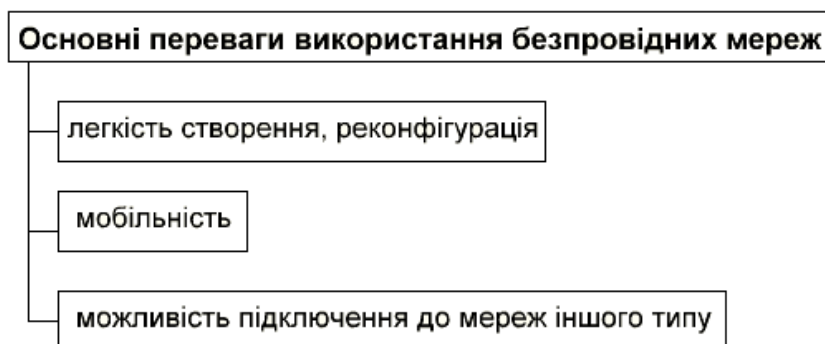


Рис.1.1. Основні переваги використання безпроводних мереж

Основою побудови безпроводних мереж є наступні архітектури:

- самоорганізована (розподілена), при якій точки доступу здійснюють координацію і застосування політик безпеки, забезпечують мобільність користувачів.

Перевагами цієї архітектури є: простота розгортання, низька вартість в порівнянні з централізованою архітектурою, потреба мінімального контролю з сторони ІТ-спеціалістів.



- централізована, при якій центральним елементом є контролер, що здійснює управління трафіком безпроводних точок доступу, аутентифікацію користувачів і дотримання політик безпеки.

Для мереж з централізованою архітектурою характерною є ієрархічна структура мережі, в якій є один або кілька центральних вузлів, що здійснюють обробку та перенаправлення даних від вузла-джерела до вузла-отримувача і управління мережею в цілому. Типовими прикладами таких мереж є мережі WiFi, BlueTooth.

Мережі без чітко вираженої інфраструктури (з розподіленою архітектурою) складаються з однотипних вузлів, кожен з яких має досить розвинене програмно-апаратне забезпечення, що дозволяє організувати передачу даних від вузла-джерела до вузла-отримувача при наявності технічної можливості для обміну даними.

Передача даних від одного вузла мережі до іншого може проходити через ряд проміжних вузлів у випадку, якщо вузол - джерело не має прямого зв'язку з вузлом - одержувачем повідомлення.

У роботі розглядаються безпроводні мережі з самоорганізованою архітектурою – безпроводні самоорганізовані мережі.

Під самоорганізованою (SON – self-organised) мережею розуміється безпроводна мережа, для якої характерно:

- відсутність визначеної структури розміщення вузлів (динамічно мінлива структура мережі);
- розподіл функцій між вузлами, у тому числі при появі нового вузла чи виходу з ладу існуючого вузла;
- адаптація до зміни її параметрів: кількості користувачів, рівня сигналу, рівня зовнішніх перешкод тощо;
- висока швидкість розгортання (масштабування).

До класу SON мереж відносяться мережі, які представлені на рис. 1.2 [18].



Рис. 1.2. Види SON мереж

Розглянемо дані види SON мереж.

MANET мережа – безпроводна мережа з самоорганізованою архітектурою, яка складається з мобільних пристроїв, кожен з яких може довільно змінювати своє місцезнаходження.

MANET мережа реалізує маршрутизацію з декількома переходами - це тип зв'язку в радіосистемах, у яких зона покриття мережі більша, ніж радіус дії одиночних вузлів. Таким чином, для передачі інформації до вузла-отримувача вузол може використовувати інші вузли.

Перевагами самоорганізованих MANET мереж над традиційними безпроводними мережами:

- 1) можливість передачі даних на великі відстані без збільшення потужності передавача;
- 2) стійкість до змін інфраструктури мережі;
- 3) можливість швидкої реконфігурації в умовах непридатного електромагнітного середовища.

Використання даної технології стає все більш популярним у військово-промисловому комплексі [19].

Мережа MANET часто використовується при проведенні різних форм бойових дій та пошукових операцій у місцях стихійних лих, при цьому важлива швидкість і простота встановлення зв'язку. Радіостанції Streamcaster здатні підтримувати до 380 вузлів MANET в одній мережі. Це дозволяє ефективно транслювати сигнали від одного вузла до іншого в автоматичному режимі, що

знижує будь-яку залежність від сигналів GPS та супутникового зв'язку в цілому. Радіостанція Streamcaster 4200 також через додатковий зовнішній роз'єм може підключатися до пристроїв Wi-Fi та GPS.

Відповідно до поточних потреб, пов'язаних з виконанням бойових завдань у всіх сценаріях C2D2E (Communications Degraded/ Communications Denied Environment), на ринку з'являється все більше і більше спеціалізованих комунікаційних MANET-платформ, доступних для військових сил [20].

Безпроводна сенсорна мережа (WSN) – це мережа, яка утворена великою кількістю вузлів датчиків, де кожен вузол оснащений датчиком для виявлення фізичних явищ, таких як світло, тепло, тиск і т.д.

Потужність вузлів сенсорної мережі, як правило, забезпечується акумуляторами, тому дальність передачі вузлів WSN невелика. Дальність передачі може складати від 800 до 1 000 метрів у відкритому середовищі за межами приміщення з прямою видимістю. Вона істотно зменшується в разі закритого навколишнього середовища. Мережа датчиків для розширення охоплення мережі використовує режим багатокрокової передачі, тобто кожен вузол сенсорної мережі є одночасно передавачем і приймачем [21].

Для передачі даних в WSN розроблено комплект протоколів і розширень, які увійшли в стандарт IEEE 802.15.4. Згідно з визначенням IEEE 802.15.4 - це стандарт для низькошвидкісних приватних радіомереж - Low Rate Wireless Personal Area Network (LR-WPAN), які забезпечують безпроводний зв'язок в різних додатках з обмеженим енергоспоживанням, обмеженою пропускнуою здатністю, при передачі інформації на невеликі відстані.

Основними перевагами LR-WPAN є:

- простота встановлення;
- надійна передача даних;
- низька в порівнянні з аналогами ціна;
- тривалий час роботи від батареї.

Відповідно до стандарту WSN складається з декількох компонентів. Основними компонентами є два типи пристроїв [22]:

- FFD-пристрої (full function device), які можуть бути в якості:
  - PAN-координатора (personal area network coordinator). Найбільш дорогий тип пристроїв, оскільки він повинен містити всю інформацію про мережеві з'єднання, мати великий обсяг пам'яті і високу продуктивність;
  - координатор, може реалізовувати функції ретранслятора, моста, маршрутизатора і шлюзу;
  - кінцевий пристрій.
- RFD-пристрої (reduced function device), які можуть виступати тільки в ролі кінцевого пристрою та взаємодіяти тільки з FFD-пристроями. Застосовуються в простих додатках, таких як управління світлом. RFD-пристроєм не потрібно передавати великий обсяг інформації і вони можуть комунікувати лише з одним FFD-пристроєм в певний момент часу.

Вибраний вид топології залежить від вимог. Стандарт IEEE 802.15.4 в LR-WPAN мережах передбачає застосування двох видів топологій [23]:

- топологія «зірка» (star topology);
- топологія з децентралізованим управлінням (peer to-peer topology) .

При топології «зірка» зв'язок здійснюється між кількома пристроями і єдиним центральним контролером (PAN-координатором).

При топології з децентралізованим управлінням пристрій мережі може взаємодіяти з іншими пристроями на відстані, на якій можливо здійснити передачу інформації. Така топологія дозволяє створювати більш складні конфігурації мереж та може бути самоорганізованою.

Отже, мережі WSN – це революційний метод збору інформації з метою створення інформаційно-комунікаційної системи, яка значно поліпшить надійність і ефективність інфраструктури.

Безпроводні mesh мережі (WMN) являють собою однорангову багатокрокову мережу з комірковою топологією, вузли якої автоматично встановлюють та підтримують мережеві з'єднання.

WMN забезпечує високу мобільність (у випадку недоступності або перевантаженості одного з вузлів мережі топологія мережі реконфігурується), низьку вартість, просте підключення до мережі нових користувачів тощо.

Існуючі в наш час WMN мережі побудовані з використанням найбільш поширеного безпроводного стандарту IEEE 802.11. У WMN всі вузли формально рівноправні, проте практично завжди є вузол, через який здійснюється обмін даних мережі із зовнішнім середовищем. Такий вузол називається базовою станцією .

У мережі цього виду обмін даними здійснюється на основі використання кадрів. Станції (вузли) передають повідомлення у призначені їм часові інтервали або отримують доступ до каналів довільним способом . Кожний вузол має унікальну 48-розрядну MAC-адресу. Для того, щоб ідентифікувати кожну станцію в мережі, їм присвоюється 16-розрядний мережевий ідентифікатор. Кожний вузол зберігає інформацію про своїх сусідів (вузлів, які можуть створити з цим вузлом безпосереднє з'єднання) і відповідно до заданої періодичності транслює її в мережу. На основі сукупності такої інформації від всіх вузлів мережі здійснюється передача даних.

У WMN використовуються такі архітектури [24]:

- плоска;
- ієрархічна;
- змішана.

При плоскій архітектурі всі пристрої в мережі мають однакові можливості, вони координуються для забезпечення передавання даних. Ця архітектура є найбільш простою, відповідно основною її перевагою є просте розгортання. Оскільки всі вузли є мобільні, то недоліком є жорсткі вимоги щодо їх енергоспоживання.

При ієрархічній архітектурі є декілька рівнів, причому клієнтські вузли утворюють нижній рівень. Такі вузли здатні обмінюватися даними з «основою» мережі – маршрутизаторами, які не змінюють своє місцезнаходження.

Маршрутизатори, які мають зовнішній інтерфейс для з'єднання з Інтернетом, називаються шлюзами.

Недоліком цієї топології порівняно з плоскою є необхідність планування такої мережі.

При змішаній архітектурі для обміну інформацією в мережі використовуються інші види безпроводних мереж: WiMAX, супутникові системи тощо.

Таким чином, враховуючи можливість збільшення площі зони покриття і щільності вузлів в режимі самоорганізації та стійкість до втрати окремих вузлів, використання WMN має величезний потенціал у різних сферах.

Мережа VANET – це вид SON безпроводних мереж, який підвищує ефективність та безпеку дорожнього руху шляхом використання автомобілів в якості вузлів зв'язку для визначення позиціонування і переміщення транспортних засобів, що включені в мережу.

VANET дозволяє використовувати транспортні засоби для управління трафіком. Така мережа являє собою безпроводну мережу, яка складається з вузлів – транспортних засобів, що здатні комунікувати між собою. Завдяки цьому забезпечується безпека дорожнього руху.

Розглянемо конкретні приклади застосування VANET. Щодо навігації мережі VANET можуть надати інформацію не тільки про місцезнаходження свого автомобіля як GPS / ГЛОНАСС / Галілеї, але і будь-якого іншого, а також про пробки, в тому числі і їх чисельні оцінки.

У частині доповнень щодо забезпечення підвищеного комфорту можна виділити наступні: інформація про поточний трафік на дорогах, погода, можливості прийому повідомлень, ігри в режимі on-line, інформація від придорожньої мережі про готелі, станції заправки, меню в ресторанах тощо.

Таким чином, основне завдання VANET – це забезпечення комфортного пересування учасників дорожнього руху, підвищення їх безпеки, захист транспортних засобів.

У зв'язку з активним використанням безпроводних мереж у різноманітних галузях виникає дефіцит частотного спектру. Для підвищення ефективності використання спектру можна використовувати когнітивне радіо, яке являє собою радіосистему, що вирішує такі основні завдання: виявлення невикористаних у конкретний момент часу спектральних діапазонів; аналіз параметрів радіоканалу, оцінка каналової інформації; контроль випромінюваної потужності та динамічне управління спектром.

Когнітивні радіомережі складаються з двох типів користувачів, первинних (ліцензованих) і вторинних (не ліцензованих) користувачів. Первинні користувачі мають більш високий пріоритет для використання ліцензованої смуги частот, вторинні – можуть використовувати ліцензовану смугу частот, не впливаючи на пріоритетне використання спектра основним користувачем, що максимізує ефективність ліцензованого використання спектра.

Отже, когнітивне радіо на основі інформації про радіопростір зможе перемикатися на найбільш підходящу технологію і частоту для надання певної послуги у безпроводних мережах, що дозволить збільшити продуктивність таких мереж.

## **1.2. Аналіз методів маршрутизації у самоорганізованих мережах та їх вплив на якість передавання потоків**

Кількість вузлів самоорганізованих мереж може змінюватись в різних межах: від десятків до тисяч, внаслідок чого топологія таких мереж є динамічною. З врахуванням того, що у БСМ немає достатніх ресурсів для зберігання та обробки даних маршрутизації всіх вузлів мережі, найбільш поширеними є децентралізовані локальні схеми маршрутизації, які дозволяють кожному вузлу приймати рішення про перенаправлення повідомлень на основі даних про його найближчих сусідів.

Враховуючи специфіку функціонування БСМ, класифікація методів маршрутизації здійснюється за багатьма ознаками. Розглянемо найбільш поширені з них [25].

#### 1. По принципу роботи:

- Проактивні. При цьому методі здійснюється періодичне розсилання службових повідомлень, які містять дані про зміни топології мережі. Внаслідок цього кожен вузол здійснює формування маршруту до інших вузлів та зберігає їх у таблиці маршрутизації.

- Реактивні. Цей метод працює за запитом, тобто формування маршрутів до певних вузлів відбувається тільки у випадку необхідності передачі даних, коли вузол-джерело розсилає по мережі ширококомове повідомлення-запит. У відповідь на такий запит вузол-адресат надсилає повідомлення-підтвердження, з якого вузол-джерело отримує дані про потрібний маршрут, після чого виконується його запис у таблицю маршрутизації.

- Гібридні (змішані). Цей метод комбінує проактивний і реактивний механізм. В загальному випадку мережа розбивається на множину підмереж, всередині кожної з них використовується проактивний протокол, взаємодія між ними забезпечується використанням реактивних протоколів. Це дозволяє зменшити обсяг службової інформації в мережі, оскільки її основна частина розсилається в підмережах.

#### 2. По економії енергоресурсів мережі:

- Без врахування. Не відбувається економія енергії вузлів мережі.
- З врахуванням. Дозволяють підвищити енергоефективність певних вузлів або цілої мережі шляхом розподілу навантаження відповідно до енергетичних ресурсів вузла для максимізації часу функціонування мережі.

#### 3. По структурній організації мережі:

- Плоскі. Характеризуються одноранговими вузлами, які мають однакові функції.

- Ієрархічні. Характеризуються наявністю рівнів, кожен з яких має різні функції. Класичним прикладом ієрархічної організації в безпроводних мережах



є маршрутизація на основі кластеризації вузлів. В цьому випадку кластером вважається група вузлів, які розташовані на невеликій відстані одне від одного. Комунікація здійснюється наступним чином: вузли кластеру обмінюються даними з головним вузлом (центром) цього кластеру, який, в свою чергу, комунікує з головними вузлами інших кластерів.

4. По ознаці централізації збору даних:

- З централізованим збором. Наявний один центр для збору, обробки і зберігання інформації вузлів мережі.

- З багатьма центрами збору. Такі центри взаємодіють між собою та здійснюють розподіл оброблення інформації, синхронізацію тощо.

- Децентралізовані. Зв'язок між будь-якими вузлами мережі здійснюється без обмежень.

5. По ознаці варіабельності топології мережі:

- Для статичної топології. Мережа складається з вузлів, які є нерухомими, тобто, вони мають певну довготривалу позицію.

- Для динамічної топології. Мережа містить вузли, які змінюють своє місцезнаходження у часі.

6. По врахуванню специфіки мережевого трафіку і забезпеченні якості послуг:

- Без врахування. Не враховуються особливості трафіку мережі.

- З врахуванням і з диференціацією схем маршрутизації для різних видів трафіку мережі. Враховуються особливості різних видів трафіку, таких як відео, аудіо, голос тощо.

В БСМ використовуються різні типи додатків, наприклад, деякі функціонують в реальному часі (online), інші – offline, тобто здійснюють збір даних при поступленні запиту. Методи ретрансляції різних типів трафіку мережі можуть базуватись на відстані між вузлами, кількості транзитних вузлів між вузлом-джерелом та вузлом-отримувачем, завантаженості маршрутів, мінімальній затримці передачі даних тощо [26, 15].

Акцентування уваги на якості послуг може негативно вплинути на інші аспекти процесу маршрутизації. Наприклад, для задоволення вимог щодо мінімальної затримки при передачі інформації вибираються найкоротші маршрути, що може суперечити вимозі забезпечення рівномірної витрати енергії вузлів, оскільки в такому випадку вибір маршруту має базуватись на основі рівномірного розподілу навантаження.

7. По використанню додаткової інформації щодо місцезнаходження вузла [27]:

- Без використання. Додаткова інформація не використовується.

- З використанням інформації про географічне розташування вузла. Така інформація збільшує ефективність маршрутизації, проте потребує додаткових витрат. Для визначення точного місцезнаходження вузол може містити GPS-приймач, тоді як для визначення приблизного місцезнаходження використовують методи розрахунку на основі рівня сигналу від сусідніх вузлів.

8. По врахуванню періодичної активності вузлів («sleeping time»):

– Без врахування. Вузли мережі постійно прослуховують радіоефір.

– З врахуванням. Мережа містить вузли, які періодично прослуховують радіоефір, тобто функціонують в наперед визначені часові інтервали. Це дозволяє зменшити енергоспоживання вузлів, внаслідок чого збільшується термін життя мережі.

9. По степені надійності доставки інформації:

– Ненадійні. Характеризуються відсутністю підтвердження про доставлення повідомлення.

– Надійні. Для забезпечення надійності передачі даних використовується підтвердження про доставку відправнику, при цьому недоліком є збільшення об'єму службового трафіку мережі.

10. За критерієм визначення оптимальності маршруту:

– Протоколи вектору відстані. В цьому випадку оптимальним вважається маршрут, в якому є найменша кількість ретрансляцій повідомлення між вузлом-джерелом і вузлом-отримувачем.

– Протоколи стану каналів. Це протоколи зі складною метрикою маршрутів, тобто вони здійснюють комплексне оцінювання маршрутів на основі декількох параметрів, наприклад, затримка доставки повідомлення, пропускна здатність каналу, кількість хопів тощо.

11. За кількістю задіяних в маршрутизації рівнів еталонної моделі взаємодії відкритих систем:

– Однорівневі. Функціонують на мережевому рівні, внаслідок чого забезпечується універсальність.

– Міжрівневі. Виконується взаємодія з іншими рівнями мережевої моделі OSI, наприклад, при отриманні даних щодо додаткових метрик маршруту. Забезпечують меншу універсальність, оскільки прив'язані до конкретних реалізацій інших рівнів OSI.

12. За наявністю підтримки декількох маршрутів до одного адресата:

– Одношляхові. Відбувається вибір одного маршруту, який є оптимальним. Інформація про нього записується в таблиці маршрутизації.

– Багатошляхові. В таблиці маршрутизації записуються декілька найкращих маршрутів. У випадку руйнування одного маршруту використовується інший, тобто не потрібно здійснювати повторну побудову маршруту. Крім цього при великому навантаженні мережі його можна розділити на декілька маршрутів.

Отже, для ефективного вирішення задач маршрутизації в БСМ потрібно враховувати різноманітні фактори, які впливають на процес передавання даних, а саме: адресація мережевих вузлів, синхронізація вузлів, усунення і мінімізація колізій тощо [28 – 30].

Розглянемо найбільш поширені протоколи маршрутизації.

AODV (Ad-Hoc On-Demand Distance Vector) – це протокол, який забезпечує динамічну маршрутизацію для різних видів безпроводних мереж шляхом створення маршруту на вимогу.

DSR (Dynamic Source Routing) – протокол динамічної маршрутизації, який застосовується для мобільних ad-hoc мереж. Цей протокол створює

маршрут при необхідності шляхом використання ширококомовного запиту, при цьому не потребує періодичної перевірки, оскільки дані про такий маршрут динамічно оновлюються.

OLSR (Optimized Link-State Routing) – протокол маршрутизації для різних видів безпроводних мереж, який на основі обміну повідомленнями аналізує інформацію про топологію мережі. Кожен вузол мережі формує свою таблицю маршрутизації на основі такої інформації, яка передається службовими пакетами вибору маршруту.

HWMP (Hybrid Wireless Mesh Protocol) – гібридний протокол маршрутизації для стандарту IEEE 802.11s, який функціонує на MAC-рівні, внаслідок чого він є ефективнішим, ніж AODV. Основою HWMP є два режими створення маршрутів: реактивний і проактивний. Для вибору кращих маршрутів використовуються різні метрики, які можуть містити інформацію про довжину маршруту (кількість переходів), пропускну здатність, надійність тощо.

Найбільш широко вживаною метрикою є довжина маршруту. Метрикою для стандарту IEEE 802.11s є час передачі в каналі:

$$Ca = \frac{o + \frac{Bt}{r}}{1 - ef}, \quad (1.1)$$

де  $Bt$  та  $o$  – константи для різних фізичних реалізацій:  $Bt$  - кількість бітів в тестовому пакеті (8192 біти),  $o$  – накладні витрати доступу до каналу, до яких відносять заголовки пакету, кадри протоколу доступу;  $r$  – швидкість передачі інформації в каналі;  $ef$  – імовірність виникнення помилки .

(1.1) представляє оцінювання часу передачі тестового пакету довжиною  $Bt$  з врахуванням можливих ретрансляцій при виникненні втрат в каналі.

В безпроводній mesh (multi-hop) мережі маршрутизатори можуть довільно змінювати своє місцезнаходження. Така мережа може функціонувати автономно або з'єднуватись з мережею Інтернет навіть у випадку втрати певного вузла, що свідчить про надійність її інфраструктури [31].

У роботі [32] здійснено моделювання роботи протоколів маршрутизації у середовищі моделювання Network Simulator. При масштабуванні мережі визначено затримки при передачі інформації.

Для моделювання використовувались наступні умови:

- модель канального рівня – IEEE 802.11g (Wi-Fi) з фіксованою пропускною здатністю 20 Мбіт/с;
- робочий діапазон – 2,4 ГГц;
- кількість вузлів – 10, 20, 30, 40, 50 ;
- розмір пакету даних – 512 байт;
- інтенсивність відправлення – 20 пакетів за секунду;
- протокол транспортного рівня – UDP;
- час функціонування мережі – 300 с.

На рис. 1.3 представлено результати моделювання, які демонструють залежність затримки передачі даних від збільшення кількості вузлів мережі ( $N$ ) при використанні протоколів маршрутизації HWMP, OLSR та AODV.

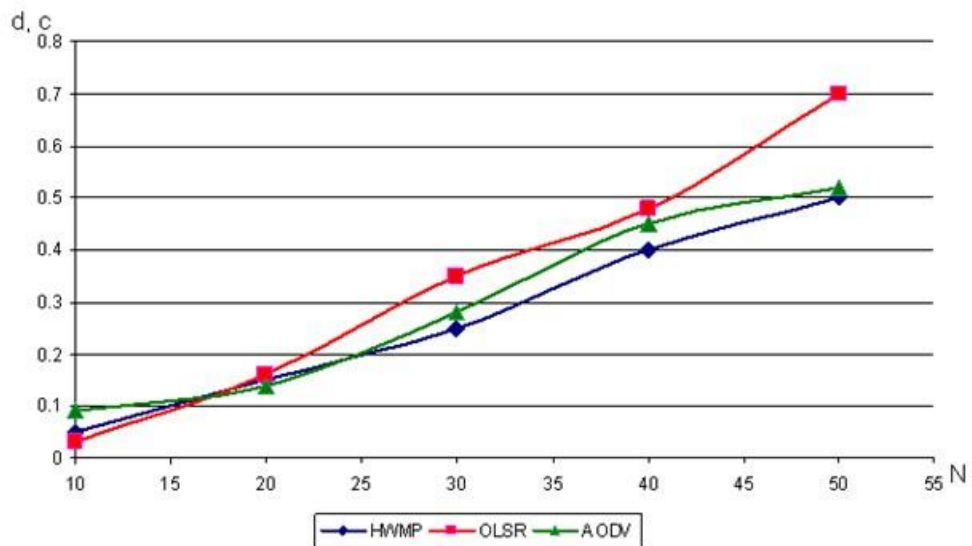


Рис. 1.3. Залежність затримки передачі даних від кількості вузлів мережі

Результати моделювання показують, що при використанні протоколу HWMP спостерігається найменша затримка передачі даних, при протоколі OLSR – найбільша.

Протокол AODV використовує тривалу процедуру ініціалізації з'єднання, проте він показує не найгірші результати.

Протокол OLSR при збільшенні кількості вузлів є неефективним, оскільки при великій кількості ретрансляторів динаміка роботи збільшується, записи в таблицях маршрутизації стають неактуальними, відповідно процес їх оновлення знижує корисну пропускну здатність.

Ефективність використання протоколу HWMP пояснюється тим, що при створенні маршруту він володіє найновішою інформацією про стан мережі. Цей гібридний протокол використовує метрику ALM (Airtime link metric), яка враховує умови доступу до середовища передачі даних, внаслідок чого дозволяє визначити найкращий маршрут.

AODV забезпечує кращий коефіцієнт доставки пакетів, ніж OLSR, проте при цьому час доставки пакетів більший, внаслідок чого передана інформація може бути не актуальною. Таким чином, протокол OLSR доцільно використовувати у невеликих мережах, тоді як для мереж великого розміру – протокол HWMP.

### **1.3. Забезпечення параметрів QoS у мережах із самоорганізацією**

З урахуванням динаміки топології саморганізованих безпроводних мереж, постійного переміщення їх вузлів, обмеженості смуги пропускання безпроводних каналів передачі даних, важливим є забезпечення належного рівня параметрів якості обслуговування – QoS.

Механізм забезпечення необхідного рівня QoS реалізується за допомогою інструментів, що дозволяють управляти певними параметрами, які безпосередньо впливають на якість послуг, що надаються в само організованій безпроводній мережі. Найпоширенішими з них є: ширина смуги пропускання, затримка передачі пакетів, фазове тремтіння цифрового сигналу (джитер), імовірність втрати пакетів тощо.

Загальновідомі три базових моделі QoS [33], які зазвичай реалізуються в режимі «точка-точка» :

1. Best Effort – абсолютна відсутність механізмів QoS. Використовуються всі доступні ресурси мережі без будь-якого виділення окремих класів трафіку і регулювання. Забезпечується автоматичне мінімальне управління параметрами мережі, при цьому немає гарантії доставки даних. Прикладом забезпечення QoS на цьому рівні є черги FIFO (First in First out).

2. Soft QoS (Differentiated service) – модель диференційованого обслуговування. Розділяє трафік на класи, вводячи кілька рівнів QoS, забезпечує пріоритезацію трафіку і використання різних механізмів організації черг. Архітектура DiffServ припускає наявність класифікаторів і формувачів трафіку на кордоні мережі, а також підтримку функції розподілу ресурсів в ядрі мережі.

3. Hard QoS (Guaranteed service) – модель інтегрованого обслуговування.

Забезпечує наскрізну (End-to-End) якість обслуговування, гарантуючи необхідну пропускну здатність за рахунок абсолютного резервування мережевих ресурсів, використання спеціального протоколу сигналізації та більш ефективних алгоритмів управління розподілом трафіку.

Реалізація QoS в мобільних само організованих системах на рівнях вище, ніж Best Effort є комплексною проблемою, так як здатність мережі гарантувати надання деяких мережевих ресурсів в рамках заданого QoS залежить від характеристик всіх мережевих компонентів від транспортного до каналного рівнів.

Безпроводні канали передачі інформації можуть мати різні рівні сигналів, при цьому втрати пакетів можуть бути значними, а топологія мережі вкрай нестабільною і характеризуватиметься постійними обривами існуючих з'єднань.

Розглядаючи характеристики моделі Hard QoS можна відзначити, що вона неефективна стосовно MANET мереж :

1. Кількість службової інформації про стан мережі збільшується пропорційно зі зростанням кількості потоків. Підтримка актуальної інформації

на вузлах про поточний стан потоку вимагає значного обсягу пам'яті і процесорного часу, яких на мобільних вузлах зазвичай вкрай мало.

2. Пакети сигнальних протоколів можуть конкурувати за доступ до смуги пропускання з пакетами, в яких містяться дані, що погіршує використання існуючої смуги пропускання.

3. Кожен мобільний вузол повинен організовувати контроль і класифікацію трафіку і також управління чергами, що є складним завданням для малопотужних і низькоресурсних мобільних пристроїв.

Модель Soft QoS передбачає наявність певної кількості заздалегідь визначених класів даних, які диференціюються бітами TOS (Type of Service) в заголовку IP пакета і правилами пересилання пакетів на вузлах. Дана модель може бути досить просто реалізована на вузлах самоорганізованих мереж, проте для її ефективного використання всі вузли мережі повинні володіти функціоналом граничних маршрутизаторів.

Відзначимо ряд факторів, що характеризують мережі:

- відповідність принципу «наскрізної» мережі (англ. "End-to-end" principle). Принцип наскрізної якості обслуговування – це здатність мережі доставляти послуги, запитувані окремим мережним трафіком, з однієї точки мережі в іншу [34]. Мережі, побудовані за таким принципом, є нейтральними і орієнтовані лише на перенесення інформації без змін;

- інтерактивність (англ. Interaction) - це принцип організації системи, при якому основна мета її функціонального призначення досягається за рахунок інформаційного обміну елементів цієї системи. Це поняття розкриває характер і ступінь взаємодії об'єктів не тільки всередині самої системи, але і всі комунікаційні процеси з іншою системою / користувачем;

- толерантність до затримок. Одні додатки мереж в стані функціонувати тільки при суворому виконанні режиму своєчасної доставки даних за призначенням (режим реального часу). Інші додатки успішно функціонують в умовах, коли час доставки даних за призначенням не регламентується часовими рамками.



В даний час ведеться велика кількість досліджень спрямованих на пошук і реалізацію механізмів забезпечення QoS в безпроводних самоорганізованих мережах. В [35] показано, що вплив мобільності вузлів робить трафік MANET більш нестационарним, непередбачуваним. В результаті в кожному окремо взятому каналі мережі спостерігається швидка зміна інтенсивності переданих потоків і, відповідно, пропускної здатності, доступної для передачі даних. Функціонування ad-hoc-мережі ускладнюється, крім переміщення вузлів, ще й впливом деструктивних факторів, через що БСМ більшою мірою, ніж інші мережі, схильна до каналних перевантажень, втрат пакетів, розривів з'єднань. Це істотно сповільнює доставку даних і знижує її продуктивність.

Таким чином, незважаючи на те, що можливості БСМ дозволяють організувати зв'язок в умовах випадкових переміщень вузлів, застосування ad-hoc-мережі для забезпечення ефективного інформаційного обміну пов'язане з рядом складнощів (зниженням оперативності та обсягів доставкіданих). З метою їх подолання необхідно детально проаналізувати особливості передачі інформаційних потоків в мережі з динамічною топологією і здійснити пошук методів, орієнтованих на підвищення в ній ефективності інформаційного обміну.

### **1.3.1. Особливості передавання інформаційних потоків у вузлах безпроводних самоорганізованих мереж**

Специфіка функціонування БСМ полягає в тому, що в ній, на відміну від мережі з фіксованою топологією, можливі різні групи подій (рис. 1.4).

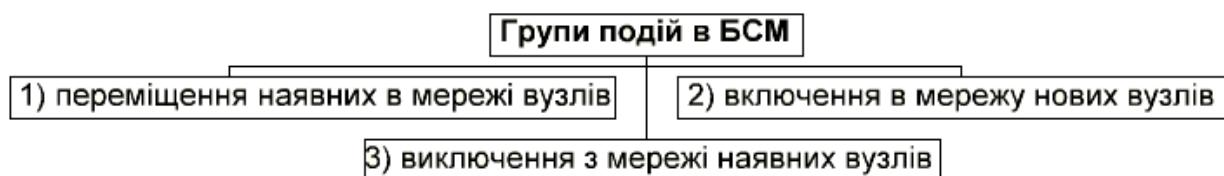


Рис. 1.4. Групи подій в БСМ

Події першої групи є можливими в БСМ завдяки мобільності її абонентів. Деструктивні чинники є причиною подій другої групи. Події третьої групи можуть бути викликані, наприклад, переміщенням в зону покриття БСМ

додаткових абонентів тощо. Все це впливає на передачу інформаційних потоків по каналах БСМ.

Специфіка пакетної передачі даних, в першу чергу, визначається наступними процесами [36]:

- 1) вибір значень параметрів повторних передач;
- 2) вибір значень параметрів відправки даних вузлами-джерелами;
- 3) вибір значень параметрів відкидання пакетів в транзитних вузлах;
- 4) вибір значень параметрів відправки підтверджень вузлами-отримувачами.

З формуванням потоків даних в БСМ безпосередньо пов'язані такі процеси [37]:

- 1) відправка даних вузлами-джерелами;
- 2) повторні передачі, викликані необхідністю повторної передачі втраченої інформації (через перевантаження і перешкоди в радіоканалах);
- 3) відкидання пакетів в транзитних вузлах для попередження перевантажень;
- 4) відправка підтверджень вузлами-отримувачами для контролю достовірності доставки даних.

Функціонування БСМ супроводжується втратами пакетів внаслідок передчасних розривів з'єднань, викликаних динамічністю мережевої топології і впливами деструктивних чинників [38]. Крім того, втрати пакетів, можуть бути викликані спотвореннями даних внаслідок перешкод в радіоканалах мережі. Динамічність топології і зовнішні деструктивні впливи призводять до випадкової зміни мережевого трафіку, що також є важливою особливістю БСМ.

Доставка інформації в MANET заснована на комутації пакетів, і абоненти БСМ мають можливість передавати по мережі різні види пакетного трафіку [39]. Інформаційні повідомлення, що передаються в мережі, утворюють мультимедійний трафік (мовні повідомлення, відео) і трафік даних (керуючі команди і сигнали, відомості про вимірювання і спостереження, текстові повідомлення, різні зображення, інша графічна і таблична інформація).

Інтенсивність передачі інформації, ініційованої роботою будь-якого мультимедійного застосування, досить висока і близька до постійного значення, тому такий вид трафіку часто називають потоковим трафіком [40, 41]. Для якісної передачі потокового трафіку необхідно мінімізувати затримку пакетів і її дисперсію (джитер), при цьому допускаються незначні втрати пакетів. При передачі даних, навпаки, затримки окремих пакетів на якість передачі не впливають, проте потрібна гарантована безпомилкова доставка кожного пакету, тобто повинна бути забезпечена достовірність доставки даних при заданому рівні оперативності. Доставка даних без помилок і втрат досягається за допомогою підтвердження приймачем успішно доставлених пакетів і повторних передач втраченої інформації, що істотно ускладнює процес передачі даних і збільшує час доставки повідомлень .

У мережах Wi-Fi базовим методом доступу до каналу є випадковий (режим розподіленого управління DCF, в основі якого лежить метод CSMA / CA). Випадковий вибір моменту початку передачі пакету є причиною можливих колізій - одночасної передачі пакетів декількома станціями , що призводить до того, що приймач не може правильно декодувати сигнал і не отримує жоден з переданих пакетів. Якщо приймач отримує пакет, він підтверджує отримання пакету за допомогою кадру АСК. Якщо станція-відправник не одержує АСК, вона повторює передачу пакета до тих пір, поки не отримає АСК або не буде досягнутий допустимий поріг спроб передачі.

У мережах, де всі станції (вузли) знаходяться в зоні радіоприйому один одного, ймовірність колізій мала, і такий метод дозволяє ефективно боротися з їх наслідками. Проте в багатокрокових мережах ймовірність колізій значно зростає через ефект прихованих станцій.

Для підвищення надійності передачі пакетів в багатокрокових мережах стандарт IEEE 802.11s вводить додатковий детермінований метод доступу – МССА (Mesh coordination function Coordinated Channel Access), заснований на попередньому резервуванню інтервалів часу, протягом яких можлива безконкурентна передача даних станцією-власником резервування [42].

Оскільки навіть резервування середовища не дозволяє гарантувати успішну передачу пакета, наприклад, через шуми в каналі.

Для скорочення накладних витрат МССА резервує не поодинокий інтервал часу, а безліч інтервалів часу, які визначається трьома параметрами: 1) тривалістю кожного зарезервованого інтервала; 2) періодичністю - числом зарезервованих інтервалів протягом одиниці часу, що називається DTIM-інтервалом; 3) зміщенням першого зарезервованого інтервалу від початку DTIM-інтервалу.

Метод МССА використовується для підвищення надійності передачі користувачьких даних. Однак в мережах WMN присутній ще один механізм резервування середовища – МВСА (Mesh Beacon Collision Avoidness), який використовується для підвищення надійності передачі біконів - кадрів, в яких передається службова інформація і які також служать для виявлення станціями один одного. Бікони посилаються кожною станцією строго періодично, 1 раз в бікон-інтервал. Для запобігання колізій біконів і підвищення надійності їх передачі МВСА забороняє станції вести будь-яку передачу в той час, як хоча б 1 станція з її двокрокового оточення передає бікон. Специфікація IEEE 802.11s детально описує механізм МВСА.

### **1.3.2. Переваги та недоліки існуючих методів маршрутизації безпроводних самоорганізованих мереж**

Дослідження в області самоорганізованих мереж активно розвиваються, у зв'язку з цим виникає багато нових напрямків досліджень, одним з основних яких є кластеризація, використання якої дозволяє збільшити термін життя мережі та зменшити її енергоспоживання. Для підвищення ефективності кластеризації використовуються різні підходи [43]: метод нечіткої логіки [44-46], колективний [47], графовий [48,49], на основі штучного інтелекту [50, 51] тощо. У [52] представлено алгоритм Fuzzy C-Means, який містить етапи формування кластерів та вибір головного вузла кластера на основі рівня енергоспоживання і центральності його місцезнаходження в кластері. В роботі

[53] представлено алгоритм ED-LEACH, який є покращенням LEACH, що дозволяє підвищити QoS на основі таких критеріїв як відстань до вузла-координатора, відстань до центру кластера, енергія вузла.

Важливе значення для надання послуг користувачам в самоорганізованих мережах має параметр QoS.

Процес обробки заявок з підтримкою якості обслуговування розглянуто в роботі [54], де запропоновано модель управління процесом обробки заявок та рекомендується побудувати процес обслуговування заявки в такий спосіб, що не було необґрунтованих затримок високопріоритетних заявок, що поступили під час обслуговування низькопріоритетних заявок великої складності.

В статті [55] пропонується метод для виявлення параметрів потоків на різних рівнях мультисервісної мережі, для яких характерний накладний принцип побудови та наявність мультисервісних потоків. В самоорганізованих мережах розташування вузлів, як правило, визначається на стадіях синтезу мережі, тому модель у вигляді багаточастинного графа може застосовуватися також і для різних видів таких мереж.

Найпростішим видом маршрутизації інформаційних потоків в самоорганізованих мережах є жадібна маршрутизація, проте вона може бути неуспішною при наявності різних топологічних неоднорідностей мережі. У роботі [56] розглядається жадібна маршрутизація на випадкових графах, які є гнучкими для відображення стану мережі. Для обчислень жадібних вкладень використовується алгоритм Терстона. У [57] розглянуто його характеристики у просторі для виконання укладки кола, показано простоту його реалізації – процес функціонування видає послідовність раціональних карт, для вибору яких потрібно знати топологічну структуру. Згідно [58] даний алгоритм дозволяє здійснювати вибір радіуса кожного кола, внаслідок чого вкладення можна зробити жадібними, проте він має велику обчислювальну складність. У [59] R. Sarkar, F. Luo та інші пропонують використовувати конформне відображення вузлів шляхом використання потоку Річчі для здійснення жадібної маршрутизації.

У роботі [60] представлено тензорний підхід для математичного опису мереж, що дозволяє сформулювати умову забезпечення QoS щодо швидкості передачі даних і допустимої затримки між вузлом-джерелом і вузлом-отримувачем.

Генетичні алгоритми є стійкими до попадання в локальні оптимуми, універсальні для вирішення задач багатоцільової оптимізації, прості в реалізації, проте використовувані процедури в алгоритмі є евристичними, що не гарантує знаходження глобального екстремуму.

В роботі [61] описана макроеволюція генетичних алгоритмів, яка полягає у створенні множини популяцій, де генетичний пошук здійснюється на основі об'єднання батьків з різних популяцій.

Генетичний алгоритм з елементами саморегуляції представлено в [62]. Його особливість полягає у нестандартній архітектурі генетичного пошуку – додавання блоку оцінки попередньої конверсії та блоку адаптації, проте це потребує більше пам'яті та збільшує складність реалізації алгоритму.

У [63] описано генетичний алгоритм із змінною структурою, тобто процес його функціонування поділяється на декілька етапів, на кожному з яких використовується певний набір генетичних операторів. Пропонований алгоритм є складніший за простий генетичний алгоритм і результат його роботи має високу залежність від вибраних етапів.

Мурашкові алгоритми легко адаптуються до змін мережі, володіють пам'яттю про всю колонію, проте час збіжності для них невизначений.

В [64] описано різні модифікації класичного мурашкового алгоритму. В [65] описано модифікований мурашковий алгоритм з вдосконаленою формулою визначення евристики мурахи, що дозволило зменшити енергоспоживання вузлів мережі.

Значного поширення в різних областях набув метод імітації відпалу, який відноситься до класу порогових алгоритмів локального пошуку. Даний алгоритм простий в реалізації, дає можливість пошуку рішень для складних нелінійних задач, універсальний, має відносну легкість адаптації та технічної

реалізації, проте він повільний при великій розмірності цільової функції. У роботі [66] представлено алгоритм надшвидкого віджигу, який дає статистичну гарантію знаходження глобального мінімуму, при цьому експоненціальне зменшення температури значно швидше, ніж у класичному методі імітації відпалу. Недоліком такого методу є тривале налаштування його параметрів для вирішення конкретної задачі.

Таким чином, враховуючи зростання кількості пристроїв в самоорганізованих мережах, удосконалення методів маршрутизації інформаційних потоків у самоорганізованих мережах шляхом покращення часових параметрів маршрутизації та передавання інформації в умовах різкого зростання динаміки потоків та нестабільності рівня шумів у радіоканалах сучасних безпроводних мереж для задоволення потреб користувачів у інформаційно-комунікаційних застосуваннях реального часу є актуальним науковим завданням.

#### **1.4. Висновки до 1-го розділу**

1. Проведено аналіз особливостей побудови безпроводних самоорганізованих мереж. Використання таких мереж породжує збільшення попиту на частотний спектр, що в умовах впровадження новітніх технологій є обмеженим. В результаті аналізу, обґрунтовано, що для вирішення такого роду проблем можна використовувати технологію когнітивного радіо, що організована на алгоритмах вторинного використання спектру без попередньої конверсії частот. Це дозволить здійснювати ефективний моніторинг спектру в умовах реального масштабу часу при низькому рівні шумів.

2. У роботі проаналізовано вплив алгоритмів маршрутизації на якість передавання інформаційних потоків у безпроводних самоорганізованих мережах. Враховуючи низькі показники вузлів БСМ по продуктивності обчислень і обсягу пам'яті, динамічно змінну топологію таких мереж, очевидно, що зберігати і підтримувати в актуальному стані інформацію про поточну конфігурацію всієї мережі в кожному вузлі неможливо. Внаслідок

цього в БСМ в основному використовуються децентралізовані локальні схеми маршрутизації, в яких кожен вузол самостійно приймає рішення про перенаправлення повідомлень, базуючись на інформації про найближчих сусідів (на основі локальних даних). Таким чином, вибір методу маршрутизації з урахуванням множини факторів та технічних умов дозволяє значно збільшити продуктивність БСМ.

3. Розглянуто основні недоліки та переваги існуючих методів маршрутизації та їх вплив на забезпечення параметрів QoS у безпроводних самоорганізованих мережах. Сформульовано основні невирішені задачі в галузі маршрутизації та забезпечення якості обслуговування в таких мережах. Важливим аспектом при передаванні даних є питання ефективності маршрутизації, яке безпосередньо впливає на збалансованість та рівномірність використання ресурсів радіоканалів самоорганізованих мереж. Внаслідок цього доцільно здійснювати удосконалення методів маршрутизації інформаційних потоків у самоорганізованих мережах в умовах різкого зростання динаміки потоків та нестабільності рівня шумів у радіоканалах.



## РОЗДІЛ 2.

### МЕТОДИ ПОКРАЩЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ЯКОСТІ НАДАННЯ ПОСЛУГ В БЕЗПРОВІДНИХ САМООРГАНІЗОВАНИХ МЕРЕЖАХ

#### 2.1. Метод локалізації вузлів мережі з використанням діаграм потужності Вороного з правильними взаємозв'язками суміжності

Сенсорні мережі – це сукупність (зазвичай мініатюрних) пристроїв з обмеженими можливостями обчислювальної та передавальної потужності, розподілених по фізичній площині. Мережа вузлів збирає дані з певної території, і вона повинна вміти інтегрувати їх та відповідати на запити, пов'язані з цими даними.

Оскільки кожен вузол, як правило, може спілкуватися лише з невеликою кількістю інших вузлів протягом невеликого проміжку часу, інформація, створена на одному вузлі, може бути направлена до іншого вузла тільки з використанням періодичних таблиць маршрутизації. Традиційні алгоритми маршрутизації базуються тільки на комбінаторному графіку з'єднання мережі, проте використання вузлів, які контролюють і визначають фізичне розташування кожного вузла мережі (наприклад, за допомогою приймача GPS), дозволяють підвищити ефективність географічної чи геометричної маршрутизації.

Розглянемо ситуацію: пакет повинен бути маршрутизований мережею від вузла-джерела до вузла призначення, координати яких відомі. Коли вузол приймає пакет, він має вирішити, який з його сусідів повинен його передати на основі метрики відстані. Ця метрика визначається на основі локальної інформації – координати поточного вузла, місця призначення та сусідів вузла. Незважаючи на цю обмежену локалізацію, алгоритм маршрутизації повинен гарантувати, що пакет дійсно прибуде до місця призначення.

Проста геометрична схема маршрутизації – це жадібна маршрутизація, при якій вузол приймає пакет, після чого пересилає його сусіду, який знаходиться найближче до вузла призначення.

Основна проблема з жадібною маршрутизацією полягає в тому, що вона може зіткнутися з локальними мінімумами, також відомими як порожнини або отвори для маршрутизації, коли поточний вузол не має сусіда ближчого до пункту призначення, ніж сам [67, 14, 15]. Коли виникає такий локальний мінімум, пакет "зупиняється", і жадібна маршрутизація не може продовжуватись, внаслідок чого передача даних не здійснюється.

Прикладом жадібної маршрутизації є жадібна Евклідова маршрутизація, яка базується на евклідовій відстані до пункту призначення, або маршрутизація на основі кутової відстані до пункту призначення [68].

Важливим питанням є розробка методу маршрутизації, який гарантуватиме доставку всіх пакетів між відповідними вузлами [69]. Цей сценарій детально вивчений Papadimitriou та Ratajczak [70], які висловили припущення, що будь-який 3-зв'язаний плоский граф допускає жадібне евклідове вкладення, а саме, жадібне вкладення для евклідової відстані.

Простим прикладом є підмножина графів з трикутниками, що реалізуються на основі теорії Делоне, оскільки триангуляції Делоне є жадібними евклідовими вкладеннями їх основного графа. Дана гіпотеза [70] не була доведена, проте Papadimitriou та Ratajczak пропонують інші жадібні схеми маршрутизації, серед якої 3D-поліградова маршрутизація, суть якої полягає у вбудовуванні 3-зв'язаного плоского графа в якості багатогранного краю дотичної до одиничної сфери в  $R^3$ .

J. Kleinberg досліджував питання про вставку мережі в гіперболічну площину та виконав жадібне вкладення в гіперболічній площині для кожного зв'язаного кінцевого графа. Зауважимо, що граф не вважається планомірним. Отримані результати Kleinberga особливо цінні у практичних реалізаціях. Крім того, представлений у роботі [71] розподілений алгоритм дозволяє мережі обчислювати власне вкладення за рахунок декількох операцій.

У роботі [72] показано як обчислити жадібне вкладення графів комбінаторних одиничних дисків в розмірі  $O(\log n)$  з обмеженим розтягуванням.

Метод Sarkara та співавторів [73] пропонує вставляти плоскі триангуляції в площину, використовуючи так звану апроксимацію потоку Річчі, а укладки кола - є класичним дискретним наближенням до конформних відображень. Проте їх вставлення не дозволяє враховувати критичних випадків жадібної маршрутизації, коли необхідно використовувати маршрутизацію «по краях» з віртуальними вузлами.

Для вирішення таких недоліків пропонується використовувати алгоритм Терстона з деякими модифікаціями для обчислення жадібного вкладення потужності вузла, а також спосіб укладки кола в моделі Пуанкаре на гіперболічній площині для удосконалення визначення віртуальних координат вузлів самоорганізованої мережі [8, 6, 13].

Здійснюємо побудову діаграми потужностей вузлів мережі. Для цього припускаємо, що потужність в точці  $x$  по відношенню до кола  $\sigma$ , яке має центр  $C$  і радіус  $r$  є дійсним числом:

$$Pow(x, \sigma_i) = \|x - c_i\|^2 - r_i^2. \quad (2.1)$$

У загальному випадку потужність кола  $\tau$ , що має центр  $c_\tau$  та радіус  $r_\tau$  відносно окружності  $\sigma$ , що має центр  $c_\sigma$  і радіус  $r_\sigma$ , є також дійсним числом:

$$Pow(\tau, \sigma_i) = \|c_\tau - c_\sigma\|^2 - r_\tau^2 - r_\sigma^2. \quad (2.2)$$

Зауважимо, що ці потужності симетричні.

Нехай  $C = \{\sigma_1, \dots, \sigma_n\}$  – множина кіл на площині з центрами  $c_i$  та радіусами  $r_i$ , а  $Pow(x, \sigma_i) = \|x - c_i\|^2 - r_i^2$  – потужність від точки  $x$  до  $\sigma_i$ ,  $s_i = \|c_i\|^2 - r_i^2$  – потужність джерела. Для кожної  $\sigma_i$  існує множина потужностей  $L(\sigma_i)$ , що складається з точок у площині, чия потужність відносно  $\sigma_i$  не більша, ніж їх потужність по відношенню до інших кіл  $C$ .

В результаті діаграма потужностей  $C = \{\sigma_1, \dots, \sigma_n\}$ , позначимо її як  $L(C)$ , представлятиме собою коміркову структуру, де коміркою виступатиме деяка область  $L(\sigma_i)$  (рис. 2.1) [13].

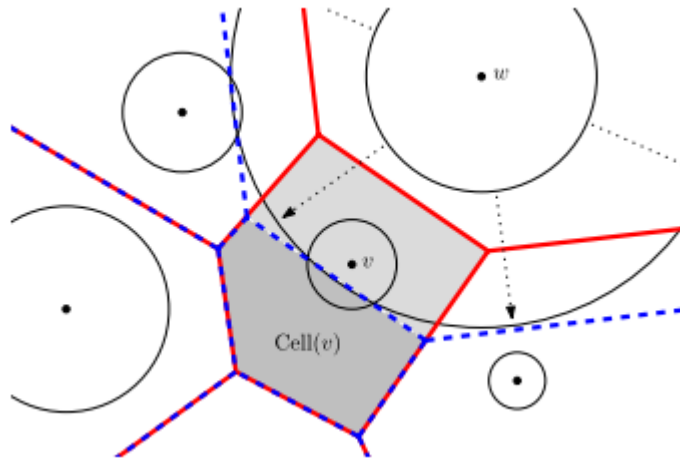


Рис. 2.1. Приклад розширення зони покриття із урахуванням діаграми потужності вузла  $w$

Якщо усі потужності комірок опуклі, і всі кола мають однаковий радіус, то їх діаграма потужності ідентична діаграмі Вороного. Таким чином, діаграми потужностей вузлів є узагальненням діаграм Вороного.

Поряд з цим узагальненням впливає той факт, що будь-яка афінна діаграма, тобто будь-яка діаграма з афінними краями між областями на площині (діаграма мінімізації), є діаграмою потужності, в тому сенсі, що існує множина кіл, діаграма потужності яких є саме данною афінною діаграмою [74].

Діаграми потужностей можна визначити як ортогональні дуали плоских графів, вбудованих в площину. Aurenhammer довів, що будь-який ортогональний подвійний лінійний графік являє собою діаграму потужності вершин графа (з відповідними колами, центрованими у вершинах) [74]. Якщо одне з цих ортогональних дуальностей отримується з усіма радіусами, то планарний граф – граф Делоне.

Набір діаграм також еквівалентний набору регулярних вкладень, які можна отримати як проекцію краю структури опуклого багатогранника в площину  $R^3$ . Це узагальнення того факту, що діаграми Вороного отримані як проекція реберної структури опуклих багатогранників, що є дотичними до одиниці параболоїда [75]. У подвійному налаштуванні тріангуляції Делоне еквівалентні проекціям площини опуклої оболонки набору точок параболоїда (в

$R^3$ ) або стереографічним проєкціям до площини опуклої оболонки набору точок на сферу (в  $R^3$ ).

Таким чином, маршрутизація визначатиметься як набір вузлів, де вузли вкладені як кола в площину, а функції потужності кола використовуються як функції відстані, а саме: для маршруту з відстанню  $t$  до пункту призначення, з вершини  $v$  здійснюємо переміщення до сусідньої вершини  $u$  так, що  $u = \arg \min_{w \in N(v)} Pow(w, t)$ , де  $N(v)$  – усі сусіди вершини  $v$ .

Будь-який 3-зв'язаний плоский граф містить вкладення, тобто «упаковані графи», кожен з яких містить кола з власними діаграмами потужностей. Враховуючи плоску триангуляцію графа  $G(V, E)$ , укладка  $G$ -кола являє собою набір з  $C$  кіл у площині з бієкцією  $\gamma: V \rightarrow C$  такими, що  $\gamma(v)$  і  $\gamma(w)$  зовнішньо дотичні, якщо і тільки якщо  $\{v, w\}$  – границя  $G$ . Укладка  $G$ -кола вважається локально однозначною, якщо для будь-якої вершини  $v \in V$  кола, що відповідає  $v$  і її сусіднім в  $G$ , є взаємно незв'язані внутрішні грані. Враховуючи плоскість триангуляції  $G(V, E)$  та будь-який розподіл радіусів до граничних вершин  $G$ , існує (в евклідовій та гіперболічній площині) принципово унікальне локально-однолітне укладення для кола  $G$ , граничні кола якого мають такі ж значення, як їх радіуси.

Нехай  $G$  – комбінаторний замкнутий диск, тоді існує принципово унікальне однорівневе коло укладки  $P_G$ , що міститься в одиничному диску так, що будь-яке граничне коло внутрішньо дотичне до одиничного диска. Називаємо таку укладку як укладку  $G$ -кола одиничного диска. Враховуючи 3-зв'язаний планарний граф  $G(V, E)$ , укладка  $G$ -кола являє собою набір  $C$  кіл у площині з бієкцією  $\gamma: V \rightarrow C$  такими, що  $\gamma(v)$  і  $\gamma(w)$  зовнішньо тангенціальні тоді і тільки тоді, коли  $\{v, w\}$  – край  $G$  і такий, що для кожного з  $G$  існує коло  $c(f)$ , яке ортогональне для всіх кіл  $\gamma(w_i), 1 \leq i \leq n$ .

Для обчислення укладки кола існують різні методи. Пропонуємо для чисельного обчислення використовувати алгоритм Терстона. Суть даного

алгоритму полягає у встановленні значення граничних радіусів та оновленні всіх внутрішніх радіусів, щоб задовольнити місцеву унівалентність.

Цей крок повторюється до моменту, поки не досягнеться деяка помилка, пов'язана з локальною помилкою однозначності (вимірюється як кутова помилка).

На цьому етапі процесу розташування потрібно перетворити значення радіуса в плоскі координати центрів. Зауважимо, що цей алгоритм працює лише для триангуляції. Однак він може бути узагальнений на більш загальні 3-зв'язні площинні графи.

Представимо алгоритм Терстона послідовністю так званих функцій відображення кола (картографічних функцій), які відображають вершини  $V$  в колах на площині. Позначимо  $\phi_G$  - функцію, яка вказує вершини для укладки граничного кола, що є унікальною до деякої ізометрії гіперболічної площини, а саме, перетворення Мебіуса.

Було вибрано алгоритм Терстона, оскільки це надзвичайно простий алгоритм і його можна розподілити прямолінійно. Проте основним недоліком цього алгоритму є лише наближення бажаної укладки кола, обчислення точної укладки вимагало б нескінченного числа кроків.

У роботі пропонується визначення точної укладки кола, яка забезпечується певною кількістю кроків.

Для того, щоб зупинити ітерації алгоритму Терстона, використовується умова припинення, яка гарантує, що результат містить діаграму потужності з правильними взаємозв'язками суміжності.

Цього достатньо, щоб здійснити жадібну маршрутизацію. Проте ми повинні переконатися, що алгоритм може бути розподілений, включаючи перевірку умови завершення [13].

Для будь-якої вершини  $v \in V$  вважаємо, що властивість  $LPD(v, \varphi)$  (Local Power diagram) виконується тоді і тільки тоді, коли  $w_1 \dots w_n$  є сусідами в  $G$  (в

цьому порядку), тоді комірка  $Cell_G(v)$  містить  $p(v)$  і комірки, що прилягають до неї, такі, як на рис. 2.2 –  $w_1 \dots w_n$ .

Якщо  $\forall v \in V, LPD(v, \varphi)$ , тоді обмеження діаграми потужності  $\varphi(V)$  по випуклій оболонці  $\epsilon$  і його граф суміжності –  $G$ .

Це задовольняє LPD при кожній вершині, коли  $G$  – граф по сусідству з діаграмою потужності. Зауважимо, що це тількиу випадку, коли  $G$  є триангуляцією.

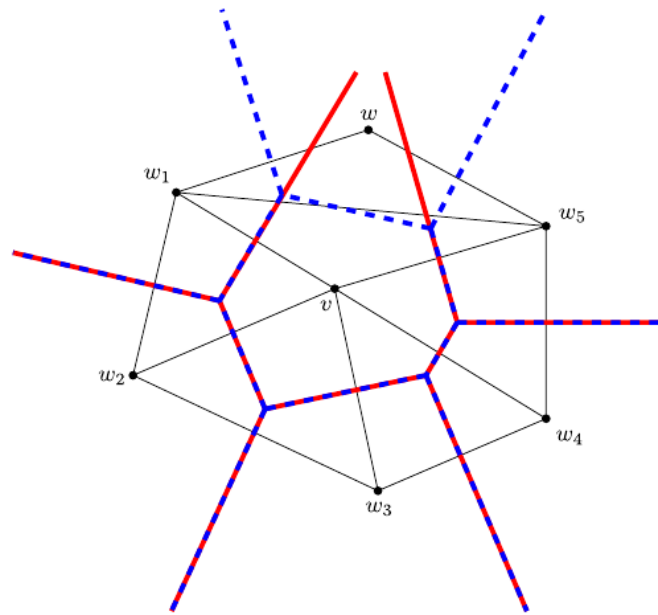


Рис.2.2. У міру віддалення  $w_4$  від  $v$ ,  $LPD(v, \varphi)$  стає нефункціональною (діаграма пунктирної лінії перетворюється на суцільну лінію)

Пропонований алгоритм полягає у використанні алгоритму Терстона для обчислення укладки кола в моделі Пуанкаре для гіперболічної площини, ініціалізованої з нескінченними радіусами для всіх крайових кіл.

Робота алгоритму Терстона зупиняється, як тільки умова LDP виконується (або умова GLPD, якщо граф не є триангуляцією, а загальний 3-зв'язаний плоский граф) [13].

Основні кроки алгоритму полягають у наступному:

- 1) встановити всі граничні радіуси до нескінченності і всі внутрішні радіуси до 1;

2) оновити всі внутрішні радіуси, застосовуючи  $N$  кроків алгоритму Терстона в гіперболічній площині;

3) зафіксувати положення двох сусідніх дисків та розібрати мережу для обчислення евклідового розташування кругів на одиничному диску Пуанкаре у представленні гіперболічної площини;

4) Якщо  $LPD(v, \varphi)$  (або GLPD – у нетріангульованому випадку) для деяких  $v$  не виконується, повертаємось до пункту 2. В іншому випадку повертаємо поточний стан мережі.

Крім того, мережа повинна мати змогу виявляти стан, при якому  $LPD(v, \varphi)$  задовольняється на всіх вузлах (етап 4), відповідно це буде точкою, коли робота алгоритму закінчується.

Це ускладнює той факт, що він задовольняється при подальших ітераціях (через активність у сусідніх вузлах), проте наступна лема доводить, що в кінцевому підсумку алгоритм буде збігатися, а саме досягти стану, в якому  $LPD(v, \varphi)$  задовольняється для всіх  $v$ .

Тоді цей стан може бути виявлений стандартними розподіленими алгоритмічними методами.

Умови LPD та GLPD є відкритими умовами в околиці укладки кола в тому сенсі, що для всіх  $G$  та обмеження кола укладки  $\phi_G$  існує така дистанція  $\epsilon > 0$ , що для всіх функцій відображення кола  $\varphi$   $d(\phi, \phi_G) < \epsilon \implies \forall v \in V, GLPD(v, \varphi)$ , якщо  $G$  є 3-зв'язаним планарним графом.

У випадку укладки кола, два сусідні кола мають загальну діаграму потужності границі позитивної довжини, а відповідне вставлення центрів завжди строго опукле.

Узагальнюючи вищесказане, на рис. 2.3 представлено блок-схему запропонованого алгоритму локалізації вузлів самоорганізованої мережі.



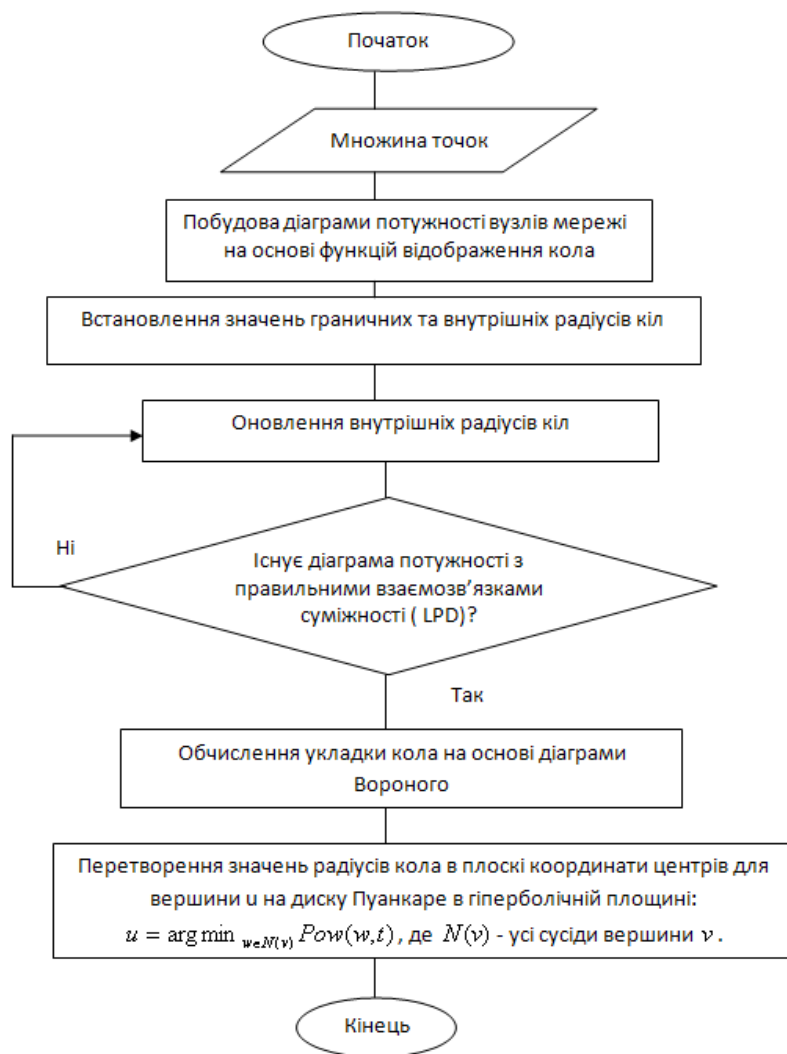


Рис. 2.3 Блок-схема запропонованого алгоритму локалізації вузлів

## 2.2. Кластеризація сенсорних вузлів як спосіб підвищення ефективності маршрутизації

Сьогодні тема моделювання та оптимізації роботи безпроводних сенсорних мереж (БСМ) викликає інтерес багатьох вчених [76-79]. Це викликано в першу чергу тим, що апаратні засоби і протоколи, що лежать в основі таких мереж, досить нові і швидко розвиваються. Мікромініатюризація і розвиток мікроелектроніки дозволило створити прийнятно-передавальні пристрої і мікроконтролери, що здатні працювати від батарей живлення кілька років [80,81].

В даний час дослідження в цій області ведуться в основному по розробці нових протоколів зв'язку [82-84]. Однак, при збільшенні кількості сенсорних

вузлів класичне застосування комунікаційних протоколів: набору правил і процедур, що регулюють порядок здійснення зв'язку, - втрачає свою ефективність. При проектуванні безпроводних сенсорних мереж неможливо перенести програмне забезпечення, яке добре протестовано і налагоджено в лабораторних умовах для невеликої мережі, на реальну мережу. Це пов'язано з тим, що динамічні процеси, які відбуваються в безпроводних сенсорних мережах, істотно змінюються при масштабуванні систем, а БСМ часто працюють при досить змінному рівні завадозахищеності. Наявність великої кількості транзитних вузлів, які ретранслюють повідомлення (пакети), істотно впливає на оптимальність вибраних параметрів протоколів передачі даних.

Проведений вище аналіз дозволив сконцентрувати увагу на завданнях, пов'язаних з кластеризацією БСМ [85-88].

Кластеризація є одним з найважливіших методів створення БСМ. Функціонування кластеризованої БСМ (рис. 2.4) в значній мірі залежить від алгоритму вибору головного вузла, основним в якому є вимоги щодо забезпечення максимальної тривалості життєвого циклу мережі і максимального покриття території [4]. Слід відзначити, що в кластерних БСМ алгоритм вибору головного вузла фактично збігається з вибором і функціонування протоколу маршрутизації повідомлень [89]. У загальному вигляді вимоги до алгоритму вибору головного вузла можуть бути сформульовані наступним чином:

1. Алгоритм повинен бути масштабованим і ефективно функціонувати в кластерах і мережах будь-якого розміру.
2. Алгоритм повинен мінімізувати обчислювальну складність для вузлів, таким чином, продовжуючи життя мережі.
3. Алгоритм повинен бути якомога простішим і незалежним від апаратних можливостей вузлів.
4. Алгоритм повинен обмежити кількість необхідних передач, таким чином, збільшуючи термін експлуатації мережі.

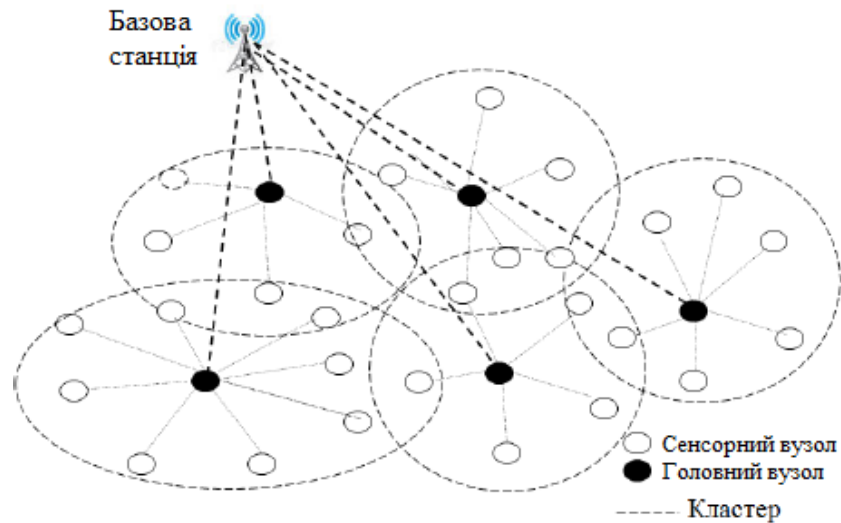


Рис. 2.4. Приклад кластерної БСМ

Протоколи маршрутизації на основі кластеризації складаються з двох фаз, які в свою чергу діляться на етапи: вибір головного вузла кластера СН (Cluster Head), формування кластера, агрегування даних і передача даних [90].

Сенсорні вузли, відповідно до виконуваних ними функціями в алгоритмах кластеризації, можуть бути згруповані в наступні чотири категорії [91]:

- **Головний вузол кластера (СН):** Координація групи вузлів, розташованих в межах кластера, агрегація даних від членів кластера і передача зібраних або агрегованих даних на наступний вузол є основними функціями СН.
- **Базова станція (BS):** З огляду на високі можливості обробки інформації, БС може бути координатором мережі і / або приймаючим вузлом, де всі агреговані дані обробляються відповідно до додатка БСМ і вимогам кінцевого користувача.
- **Релейний вузол RN (Relay node):** Транзитні вузли в багатокрокових мережах виконують функції передачі зібраних або агрегованих даних іншими вузлами до місця призначення.
- **Типовий вузол GN (General node):** Більшість вузлів в мережі, які забезпечують тільки збір даних.

Рис 2.5 ілюструє два варіанти кластеризації. У першому випадку (а) всі головні вузли кластера передають інформацію безпосередньо на базову

станцію. Для другого варіанту кластеризації (б) утворюється багатокрокова мережа, яка передбачає, що від частини сенсорних вузлів передача даних на базову станцію здійснюється через інші головні вузли кластерів або через спеціально виділені транзитні вузли.

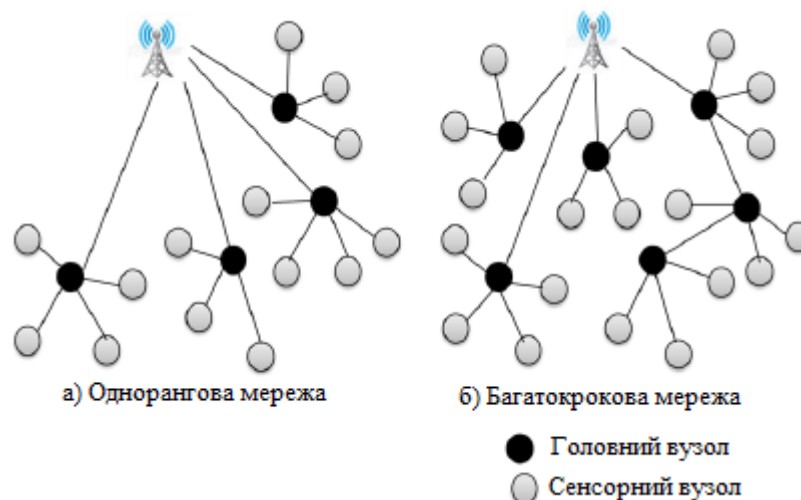


Рис.2.5. Варіанти кластеризації безпроводних мереж

До теперішнього часу розроблено досить багато алгоритмів вибору головного вузла, в основному для БСМ зі стаціонарними сенсорними вузлами. У той же час, цілий ряд проблем, пов'язаних з розробкою ефективних алгоритмів кластеризації для мобільних мереж, стійких до відмов алгоритмів, ще потребує вирішення.

Оскільки кластеризація використовується для БСМ з досить високою щільністю, важливою є також розробка методики розміщення сенсорних вузлів, що забезпечує покриття необхідної території.

### 2.2.1. Формалізація алгоритму k-means для вирішення задач кластеризації в безпроводній сенсорній мережі

Для вирішення задач кластеризації в безпроводній сенсорній мережі пропонуємо використати відомий алгоритм кластеризації k-середніх із певними удосконаленнями.

Алгоритм k середніх (англ. K-means) – один з алгоритмів, що вирішує завдання кластеризації. Цей алгоритм є неієрархічним ітераційним методом

кластеризації [92], який отримав велику популярність завдяки своїй простоті, наочності реалізації і досить високій якості роботи [93]. Основна ідея алгоритму k-means полягає в тому, що дані довільно розбиваються на кластери, після чого ітеративно переобчислюють центр мас для кожного кластера, отриманого на попередньому кроці, потім вектори розбиваються на кластери знову відповідно до того, який з нових центрів виявився ближчим по обраній метриці [94].

Мета алгоритму полягає в поділі  $n$  спостережень на  $k$  кластерів таким чином, щоб кожне спостереження належало тільки одному кластеру, розташованому на найменшій відстані від спостереження.

В якості міри близькості використовується Евклідова відстань:

$$p(x, y) = \|x - y\| = \sqrt{\sum_{p=1}^n (x_p - y_p)^2}, \quad (2.3)$$

де  $x, y \in R^n$ .

Розглянемо ряд  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ ,  $x_i \in R^d$ ,  $i = 1, \dots, n$  з  $n$  спостережень. Алгоритм k-means розбиває  $X$  на  $k$  наборів  $S_1, S_2, \dots, S_k$ , таким чином, щоб мінімізувати суму квадратів відстаней від кожної точки кластера до його центру (центр мас кластера). Введемо позначення,  $S = \{S_1, S_2, \dots, S_k\}$  Тоді дія алгоритму k-means рівносильна пошуку:

$$\arg \min_S \sum_{i=1}^k \sum_{x \in S_i} p(x, \mu_i)^2 \quad (2.4)$$

де  $\mu_i$  - центри кластерів,  $i = 1, \dots, k$ ,  $p(x, \mu_i)$  - функція відстані між  $x$  і  $\mu_i$ .

Кроки алгоритму:

1. Ініціалізація кластерів. Вибирається довільна множина точок  $\mu_i, i = 1, \dots, k$ , що розглядаються як початкові центри кластерів  $\mu_i^{(0)} = \mu_i, i = 1, \dots, k$ .

2. Розподіл векторів по кластерам (рис. 2.6). Для кожної ітерації  $t$  обирається  $\forall x_i \in X, i=1, \dots, n : x_i \in S_j \Leftrightarrow j = \arg \min_k \rho(x_i, \mu_k^{(t-1)})^2$ . Розподіл векторів по кластерам передбачає обчислення відстаней між кожним вектором  $x_i \in X, i=1, \dots, n$  і центрами кластера  $\mu_j, j=1, \dots, k$  (рис. 2.7). Таким чином, даний крок передбачає  $kn$  обчислень відстаней між  $d$ -мірними векторами.

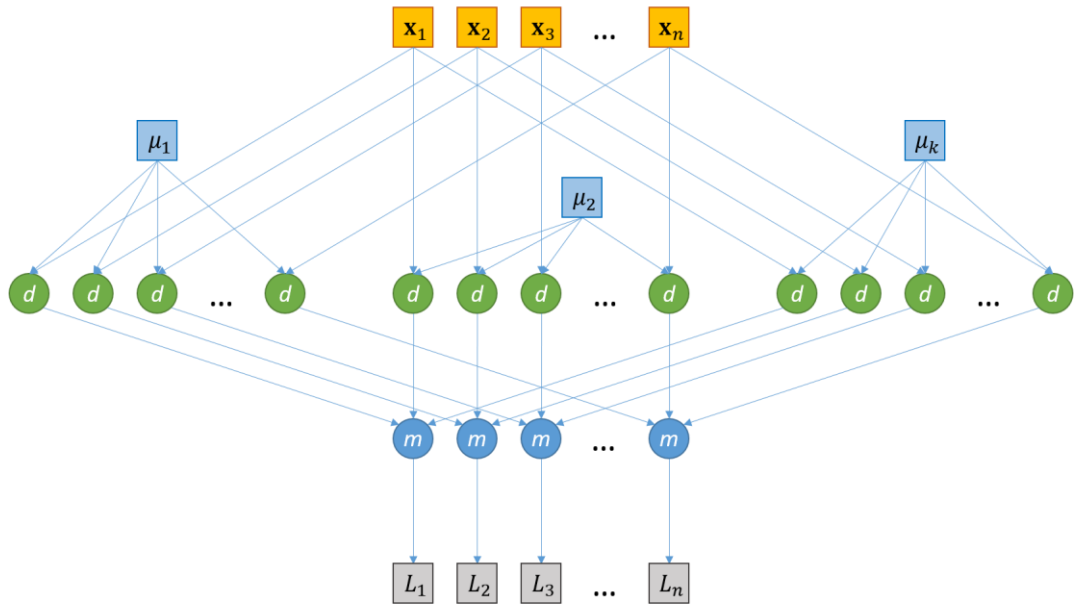


Рис. 2.6 Схема розподілу векторів по кластерам.  $d$  – обчислення відстані між векторами;  $m$  – обчислення мінімуму

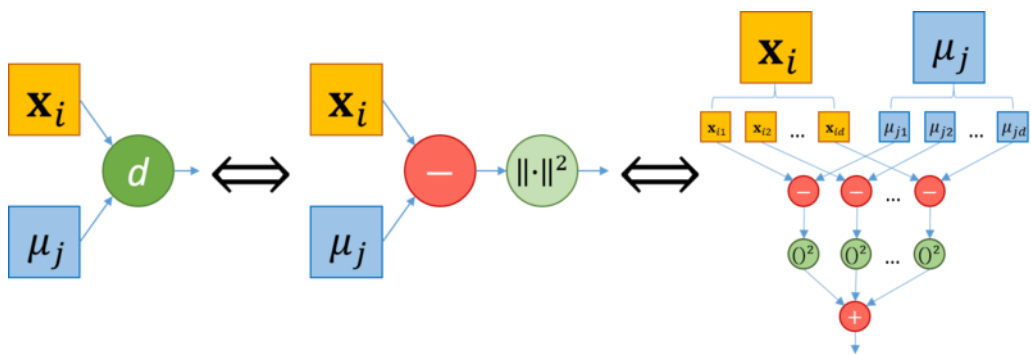


Рис. 2.7. Схема обчислення відстані між вектором і центром кластера

3. Перерахунок центрів кластерів. Для кожної ітерації  $t$   $\forall i=1, \dots, k : \mu_i^{(t)} = \frac{1}{|S_i|} \sum_{x \in S_i} x$ . Якщо  $\exists i \in \overline{1, k} : \mu_i^{(t)} \neq \mu_i^{(t-1)}$ , тоді переходимо до

повторної перевірки центру кластера, в протилежному випадку – алгоритм припиняє свою роботу.

Таким чином, центр кластера знайдено.

Перерахунок центрів кластерів передбачає  $k$  обчислень центрів мас  $\mu_i$  множин  $S_i, i = 1, \dots, k$  (рис. 2.8).

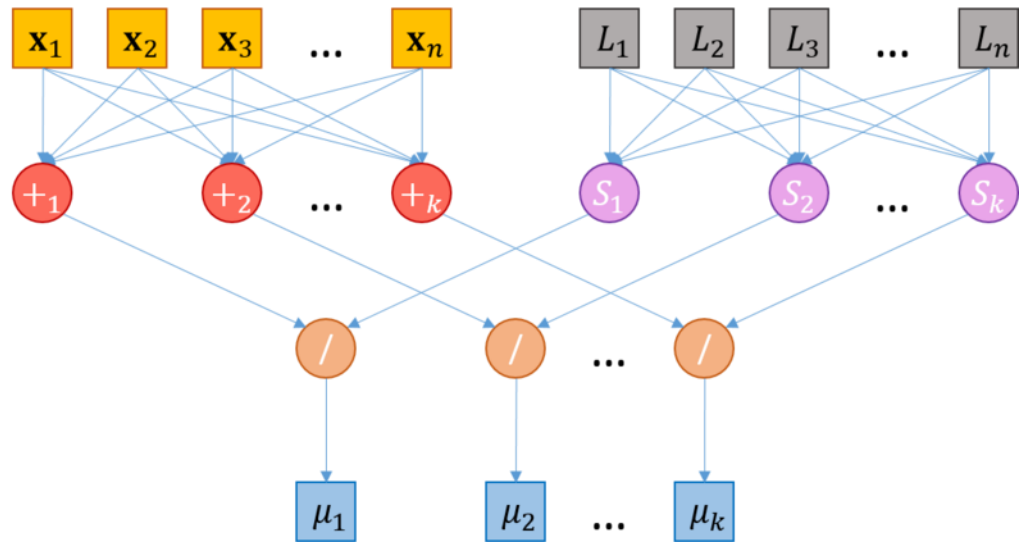


Рис. 2.8. Схема перерахунку центрів кластерів

Для ініціалізації центрів мас  $\mu_1, \dots, \mu_k$  використовуємо метод випадкового поділу (Random Partitioning).

Для кожного вектора  $x_i \in X, i = 1, \dots, n$ , вибирається випадковим чином кластер  $S_1, S_2, \dots, S_k$  і здійснюється обчислення значення  $\mu_1, \dots, \mu_k$  (Евклідова відстань).

Позначимо  $\Theta_{centroid}^{d,m}$  – часову складність обчислення центроїда кластера, число елементів якого дорівнює  $m$  в  $d$ -вимірному просторі, та  $\Theta_{dis\ tan\ ce}^d$  – часова складність обчислення відстані між двома  $d$ -мірними векторами.

Для ініціалізації центрів  $k$  кластерів потужністю  $m$  в  $d$ -вимірному просторі визначається

$$\Theta_{init}^{k,d,m} = k * \Theta_{centroid}^{d,m} \cdot \quad (2.5)$$

На рис 2.9 представлена блок-схема алгоритму k-means.

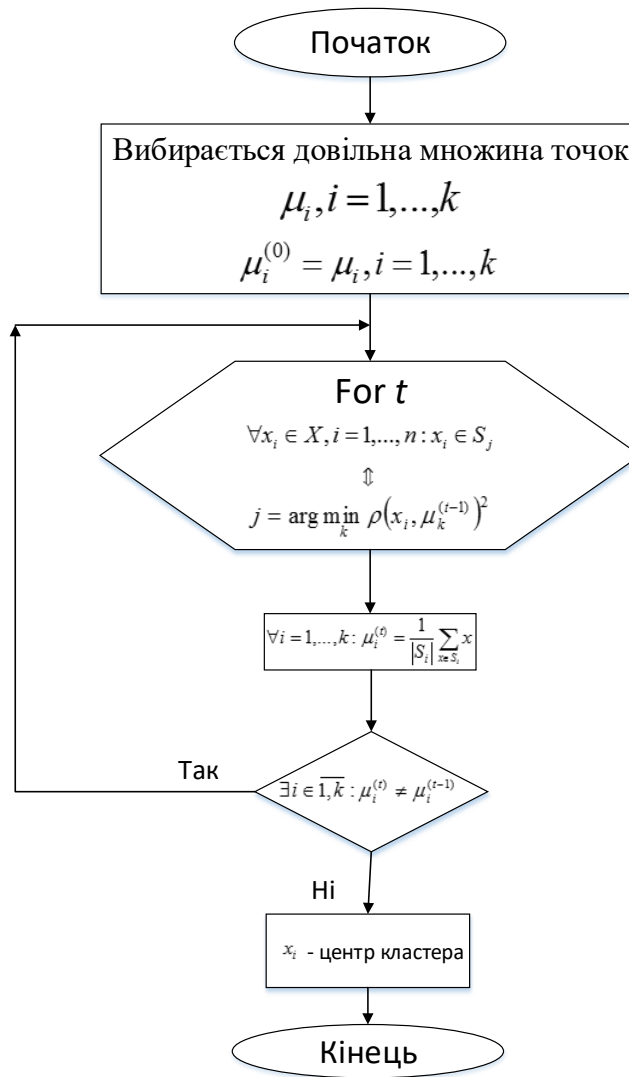


Рис. 2.9 Блок-схема стандартного алгоритму k-means

Для розподілу  $d$  мірних векторів по  $k$  кластерах -  $\Theta_{distribute}^{k,d}$  - для кожного вектора  $x_i \in X, i = 1, \dots, n$  визначається  $k$  відстаней до центрів кластерів  $\mu_1, \dots, \mu_k$ :

$$\Theta_{distribute}^{k,d} = n * k * \Theta_{distance}^d \quad (2.6)$$

Для перерахунку центрів  $k$  кластерів розміру  $m$  в  $d$ -вимірному просторі визначається  $k$  центрів кластерів  $\mu_1, \dots, \mu_k$ :

$$\Theta_{recenter}^{k,d,n} = k * \Theta_{centroid}^{d,m}, m \leq n. \quad (2.7)$$

Припустимо, що алгоритм зійшовся за  $i$  ітерацій, тоді часова складність алгоритму визначається як

$$\Theta_{k-means}^{d,n} \leq \Theta_{init}^{k,d,n} + i * (\Theta_{distribute}^{k,d} + \Theta_{recenter}^{k,d,n}). \quad (2.8)$$



Підставивши відповідні формули для розрахунку визначимо, що часова складність алгоритму k-means кластеризації  $n$  d-мірних векторів на  $k$  кластерів за  $i$  ітерацій :

$$\Theta_{k\text{-means}}^{d,n} \leq kd + ikd(n+1) \approx O(ikdn). \quad (2.9)$$

### 2.2.2. Розробка методу кластеризації з урахуванням моделі розповсюдження сигналу

Для самоорганізованої безпроводної мережі використання тільки алгоритму кластеризації k-means недостатньо. Не слід забувати про процеси поширення сигналів по радіоканалу і врахування відношення потужностей сигнал-шум, що призводить до збільшення втрат інформації.

Існують емпіричні і теоретичні (розрахункові) моделі розповсюдження сигналу [95]. Серед емпіричних моделей можна виділити 2 групи:

1. Статистичні моделі потребують тільки загального опису типу будівлі.
2. Одно- або багатопроменеві моделі оцінюють рівень сигналу і засновані на оцінці втрат на шляху проходження сигналу.

Моделі вибирають в залежності від рівня потужності. Для цього необхідно визначити втрату потужності при ідеальних умовах і без обліку наявності декількох можливих траєкторних сигналів, які можуть описуватися за формулою Фріїса [96]:

$$\frac{P_R}{P_T} = G_T G_R \left( \frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2, \quad (2.10)$$

де  $d$  – відстань між передавальним і приймальним вузлами;

$P_T$  – потужність передавальної антени на відстані  $d$  в дБм;

$P_R$  – потужність приймальної антени в дБм;

$G_T$  – коефіцієнт підсилення передавальної антени;

$G_R$  – коефіцієнт підсилення приймальної антени;

$\lambda$  – довжина хвилі.

Формула (2.10) виражена в децибелах при коефіцієнтах посилення, рівних одиниці, величина втрат визначається як

$$L = 10 \log\left(\frac{P_R}{P_T}\right) = 20 \log\left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right). \quad (2.11)$$

Із (2.11) обчислюємо втрату потужності сигналу у вільному просторі:

$$L = 32,45 + 20 \log(d) + 20 \log(f). \quad (2.12)$$

Статистична модель One slope [97] описує залежність збільшення втрати потужності сигналу з відстанню, з усередненим урахуванням перешкод:

$$L(d) = L_{FS} + 10n \log\left(\frac{d}{d_0}\right), \quad (2.13)$$

де  $d_0 = 1$  м;

$L_{FS}$  – втрати у вільному просторі на відстані  $d_0$ ;

$n$  – коефіцієнт, що залежить від типу приміщення, кількості перешкод і їх матеріалу.

Для оцінки втрат у досліджуваній безпроводній самоорганізованій мережі пропонуємо використати однопроменеву модель Motley [98]. Вона дозволяє враховувати втрати потужності сигналу при проходженні через перешкоди та відслідковувати рівень BER при проходженні через кожен вузол мережі:

$$L = L_M + 10n \log(d) + k_w L_w. \quad (2.14).$$

Формула (2.15) представлена для випадку, коли вузли мережі знаходяться в будівлі.

$$L = L_{FS} + 10n \log(d) + \sum k_{w_i} L_{w_i} + L_F n^{\left(\frac{n+2}{(n+1)-b}\right)}, \quad (2.15)$$

де  $L_M$  – виміряна втрата потужності сигналу на відстані 1 м;

$k_{w_i}$  – кількість пройдених вузлів;

$L_{w_i}$  – втрата потужності сигналу при проходженні через вузол  $i$ ;

$L_F$  – втрата потужності сигналу при проходженні через підлогу;

$n$  – кількість пройдених сигналом підлог;

$b$  – емпіричний параметр.

Враховуючи модель розповсюдження сигналу, алгоритм кластеризації набуде змін. Формування кластеру  $i$ , відповідно, знаходження його центроїда, буде відбуватися до моменту, поки не буде знайдено усі найближчі по відстані вузли з максимальним значенням потужності сигналу.

Удосконалений алгоритм кластеризації представлено на рис. 2.10.

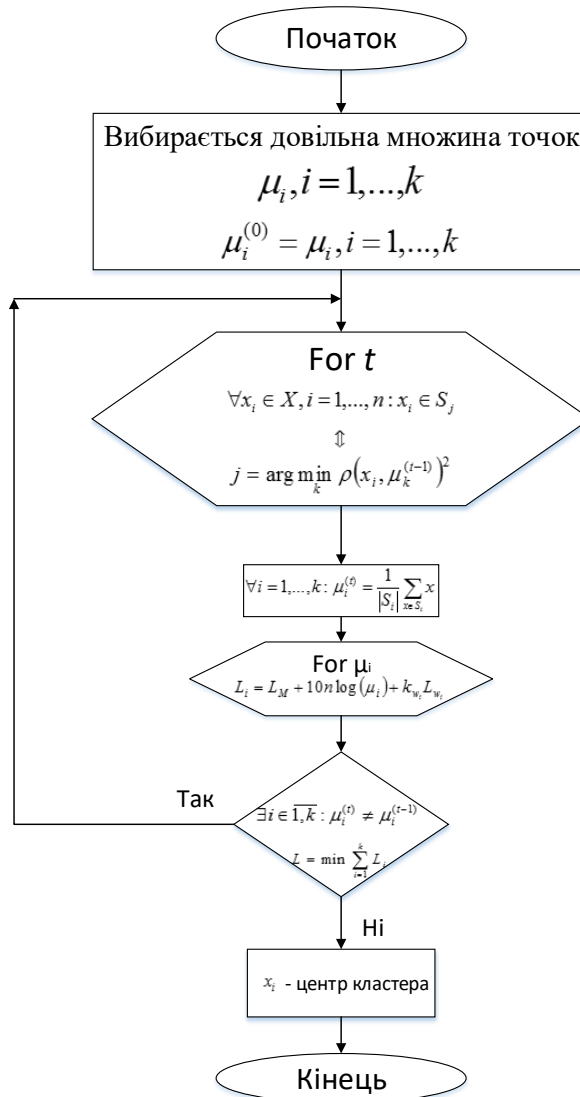


Рис. 2.10. Блок-схема удосконаленого алгоритму кластеризації вузлів самоорганізованої мережі

### 2.3. Визначення стану телекомунікаційної мережі з використанням моделі тензорного представлення її топологічної структури

У зв'язку з постійним збільшенням об'ємів інформаційних потоків та кількості віртуальних вузлів у Cloud, встановлення найбільш оптимального маршруту між вузлом-джерелом і вузлом-отримувачем є ускладнено. В якості показника для визначення такого маршруту може бути навантаження, час передачі даних, пропускна здатність тощо. В більшості випадків маршрутизація розглядається в Евклідовому просторі, наприклад в [99], математичний апарат цього простору описано в [100]. Випадки перевантаження каналів зв'язку, помилкове налаштування елементів мережі тощо утворюють структурні неоднорідності, внаслідок чого не встановлюється необхідний маршрут, тому процес передавання даних ускладнюється [9]. Для переходу з Евклідового простору в гіперболічний, і навпаки, використовуються потоки Річчі [6,8], що здійснюють деформацію метрики Рімана з збереженням властивостей мережі [101-104]. Для реалізації цього необхідний метричний тензор, за допомогою якого можна визначити такі важливі параметри як символ Крістофеля, тензори Рімана, Річі, скаляр кривизни простору [2].

Розглянемо  $n$ -мірну систему координат. Нехай компонентами такої системи виступають різні параметри мережі, наприклад, навантаження між вузлами. Кількість двосторонніх зв'язків між вузлами на віртуальному рівні мережі визначається як  $n_{\max} = m(m-1)$ , де  $m$  - кількість вузлів. У випадку відсутності навантаження на деяких зв'язках між вузлами, позначимо їх як  $w$ , система складатиметься з  $n = n_{\max} - w$  координат. Центр системи координат  $O$  відповідає стану мережі, коли  $w = n_{\max}$ .

Введемо поняття радіус-вектор  $\vec{r}$ , який з'єднує початок системи координат  $O$  з точкою, що відповідає стану мережі:

$$\vec{r} = x^i \cdot \vec{e}_i = x_i \cdot \vec{e}^i, \quad (2.16)$$

де  $x_i$  та  $x^i$  – коваріантні та контрваріантні компоненти відповідно;

$\bar{e}_i$  та  $\bar{e}^i$  – коваріантні та контрваріантні орти, що зв'язані між собою співвідношенням:

$$\bar{e}^k \bar{e}_m = \delta_m^k, \quad (2.17)$$

де  $\delta$  – символ (тензор) Кронекера.

Зв'язок між коваріантними та контрваріантними компонентами здійснюється з використанням наступних формул:

$$x^i = g^{ij} \cdot x_j; \quad x_i = g_{ij} \cdot x^j, \quad (2.18)$$

де  $g^{ij} = \bar{e}^i \cdot \bar{e}^j$  – метричний контрваріантний тензор;

$g_{ij} = \bar{e}_i \cdot \bar{e}_j$  – метричний коваріантний тензор.

Стан мережі можна представити одночасно в коваріантній і контрваріантній системі координат в квадратичній формі з врахуванням (2.16) та (2.17) у вигляді:

$$\bar{r}^2 = x^i \cdot x_i = g_{ij} \cdot x^i \cdot x^j = g^{ij} \cdot x_i \cdot x_j. \quad (2.19)$$

Зміна навантаження між вузлами відбувається систематично, тому спостерігається зміна стану мережі, яку, з врахуванням (2.18), можна представити як:

$$(d\bar{r})^2 = dx^i \cdot dx_j = g_{ij} \cdot dx^i \cdot dx^j = g^{ij} \cdot dx_i \cdot dx_j. \quad (2.19)$$

Необхідно зазначити, що  $\bar{e}_i$  та  $\bar{e}^i$  також постійно змінюються, і це можна представити як:

$$\bar{e}_i = \frac{\partial \bar{r}}{\partial x^i} = \partial_i \bar{r}; \quad \bar{e}^i = \frac{\partial \bar{r}}{\partial x_i} = \partial^i \bar{r}. \quad (2.20)$$

При зміні навантаження відбувається його перерозподіл у каналах, що описується коефіцієнтом зв'язності (символом Крістофеля) першого  $\Gamma_{ij}^k$  та другого  $\Gamma_{k,ij}$  роду, які в загальному випадку записуються як.

$$\Gamma_{ij}^k = \bar{e}^k \partial_i \bar{e}_j; \quad \Gamma_{k,ij} = \bar{e}_k \partial_j \bar{e}_i. \quad (2.21)$$

Оскільки наш простір є викривлений, то доцільно розглядати коваріантне диференціювання:

$$D\bar{r} = \partial_k \bar{r} dx^k = \bar{e}_j (\partial_k x^j + x^i \Gamma_{ik}^j) dx^k = \bar{e}_j (D_k x^j) dx^k = \bar{e}_j D_k x^j, \quad (2.22)$$

де  $D_k x^j$  – коваріантний диференціал,

$D_k x^j$  – коваріантна похідна, яка для  $x^j$  буде мати такий вигляд:

$$D_k x^j = \partial_k x^j + x_i \Gamma_{jk}^i. \quad (2.23)$$

Зміна радіуса-вектора від послідовності змін стану мережі визначається як:

$$(D_m D_k - D_k D_m) x^i dx^k dx^m \bar{e}_i = R_{j,mk}^i x^j dx^k dx^m \bar{e}_i, \quad (2.24)$$

де  $R_{j,mk}^i$  – тензор Рімана або тензор кривизни, який визначають за допомогою символів Крістофеля:

$$R_{j,mk}^i = \partial_m \Gamma_{jk}^i - \partial_k \Gamma_{jm}^i + \Gamma_{pm}^i \Gamma_{jk}^p - \Gamma_{pk}^i \Gamma_{jm}^p. \quad (2.25)$$

В (2.24) враховано, що:

$$(D_m D_k - D_k D_m) x^i = R_{j,mk}^i x^j. \quad (2.26)$$

Тензор кривизни  $R_{j,mk}^i$  можна згорнути по парі індексів, отримавши тензор другого рангу, наприклад, по першому і третьому індексу. Внаслідок цього отримується тензор Річчі:

$$R_{jk} = R_{j,ik}^i = \partial_i \Gamma_{jk}^i - \partial_k \Gamma_{ji}^i + \Gamma_{pi}^i \Gamma_{jk}^p - \Gamma_{pk}^i \Gamma_{ji}^p. \quad (2.27)$$

Ще одна згортка даного тензору призводить до скаляру, який називається скалярною кривизною простору:

$$R = g^{jk} R_{jk}. \quad (2.28)$$

Враховуючи (2.26), зміну симетричного метричного тензора в ріманівській геометрії можна визначити за допомогою потоку Річчі:

$$\frac{dg_{ij}}{dt} = -2R_{ij}. \quad (2.29)$$

Розглянемо деякі варіанти визначення метричного тензора. Зазначимо, що компоненти метричного тензора визначаються з наступної формули:

$$g_{ij} = \bar{e}_i \cdot \bar{e}_j = \cos \theta_g, \quad (2.30)$$

де  $\theta_g$  – кут між  $\bar{e}_i$  і  $\bar{e}_j$ .

Для геометрії Рімана кут між  $x_i$  і  $x_j$  визначається за допомогою  $g_{ij}$ :

$$\cos \theta_g = \frac{\langle x_i, x_j \rangle_g}{\sqrt{\langle x_i, x_i \rangle_g \langle x_j, x_j \rangle_g}}. \quad (2.31)$$

В Евклідовому просторі для визначення  $\cos \theta_g$  використаємо теорему косинусів:

$$x'^2 = x_i^2 + x_j^2 + 2x_i x_j \cos \theta_g, \quad (2.32)$$

звідки знаходимо:

$$\cos \theta_g = \frac{x_i^2 + x_j^2 - x'^2}{2x_i x_j}. \quad (2.33)$$

Для представлення гіперболічного простору пропонується використовувати диск Пуанкаре, який являє собою одиничний диск на комплексній площині  $|z| < 1$ ,  $z = x + iy$  з Ріманівською метрикою  $ds^2 = \frac{4dzd\bar{z}}{(1-z\bar{z})^2}$ .

При здійсненні повороту в гіперболічному просторі використовується перетворення Мебіуса:

$$z \rightarrow \exp^{i\theta} \frac{z - z_0}{1 - z\bar{z}_0}.$$

В даному випадку кути між ортами (компоненти метричного тензора) визначаються дискретною метрикою за законом гіперболічного косинуса:

$$\cos \theta_g = \frac{\cosh x' - \cosh x_i \cosh x_j}{\sinh x_i \sinh x_j} \quad (2.34)$$

Модель диску Пуанкаре використовується для обчислення відстаней у гіперболічному просторі. Нехай поверхня  $s$  представлена множиною точок, що

задовольняють нерівність  $\sum_{i=1}^n x_i < 1$ , де  $x_i$  - координата, а  $n$  – розмірність. Тоді

метрика Рімана виглядає як:

$$ds^2 = \frac{4\sum_i^n x_i^2}{(1 - \sum_i^n x_i^2)^2}. \quad (2.35)$$

Нехай  $z_\omega$  та  $z_\xi$  – дві точки диску Пуанкаре, відповідно геодезика проходить через  $z_\psi$  та  $z_\zeta$  і перетинає одиничне коло в точках  $z_\omega$  та  $z_\xi$ , де  $z_\omega$  знаходиться ближче до  $z_\psi$ , а  $z_\xi$  до  $z_\zeta$ . Гіперболічна відстань між  $z_\omega$  та  $z_\xi$  визначається як:

$$d(z_\omega, z_\xi) = \left( \ln \frac{(z_\omega - z_\psi)(z_\xi - z_\zeta)}{(z_\xi - z_\psi)(z_\omega - z_\zeta)} \right)^{-1}. \quad (2.36)$$

Відповідно, опишемо перетворення Мебіуса для диска Пуанкаре у вигляді зсуву:

$$F_c(z) = c + \frac{r^2}{z + c}, \quad (2.37)$$

де  $c$  – центр кола;

$r$  – радіус кола.

Отже, топологію мережі можна представити на канонічному одиничному диску з круглими отворами, де вузли трансформуються до вигляду віртуальних координат [2].

## 2.4. Застосування моделі тензорного представлення топологічної структури мережі та її вплив на передавання і управління інформаційними потоками

Розглянемо визначення метричного тензору для двох випадків, які представлені на рис 2.11.

Нехай мережа складається з трьох вузлів (рис. 2.11 а): А, В і С. Зазначимо, що між кожною парою вузлів існує двосторонній зв'язок, тобто  $\overrightarrow{AB} \neq \overrightarrow{BA}$ . Позначимо:  $\overrightarrow{AB} = \vec{c}$  і  $\overrightarrow{BA} = \vec{c}'$ , оскільки вони протилежно направлені.



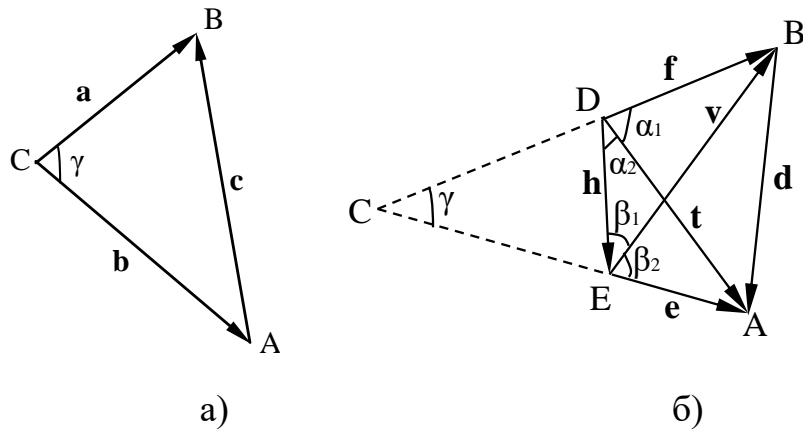


Рис. 2.11. Визначення кута між векторами: а) коли точка (вузол вхідний або вихідний) є спільна; б) коли вектори не мають спільних точок

Для рис. 2.11 а визначимо компоненту метричного тензора векторів  $\vec{a}$  і  $\vec{b}$  за допомогою (2.34) [10]:

$$g_{ab} = g_{a^*b^*} = \cos\gamma = (\vec{a}^2 + \vec{b}^2 - \vec{c}^2) / 2\vec{a}\vec{b}, \quad (2.38)$$

$$g_{ab^*} = g_{a^*b} = \cos\gamma = (\vec{a}^2 + \vec{b}^2 - \vec{c}'^2) / 2\vec{a}\vec{b}. \quad (2.39)$$

Для (2.38), (2.39) використані індекси  $a, a^*$  та  $b, b^*$  відповідають векторам  $\vec{a}$  та  $\vec{b}$  відповідно, причому прийнято, що коли пара індексів одночасно немає або має позначку «\*», то згідно з (2.34)  $x'$  відповідає  $\vec{c}$ , а в іншому випадку –  $\vec{c}'$ .

Компоненти метричного тензора для векторів  $\vec{a}$  і  $\vec{a}'$  будуть мати наступний вигляд [10]:

	$a$	$a^*$	$a'$	$a'^*$	
$a$	1	1	-1	-1	(2.40)
$a^*$	1	1	-1	-1	
$a'$	-1	-1	1	1	
$a'^*$	-1	-1	1	1	

Зрозуміло, що добуток компоненти метричного тензора одного вектора на інший дорівнює одиниці ( $\vec{e}_i^2 = 1$ ), а для протилежно направлених:  $-1$ , наприклад:

$$g_{aa'} = (\vec{a}^2 + \vec{a}'^2 - (\vec{a} + \vec{a}')^2) / 2\vec{a}\vec{a}' = -1. \quad (2.41)$$

Представимо компоненти метричного тензора для векторів  $\vec{a}$  та  $\vec{b}$  :

	$b$	$b^*$	$b'$	$b'^*$
$a$	$(\vec{a}^2 + \vec{b}^2 - \vec{c}^2)/2\vec{a}\vec{b}$	$(\vec{a}^2 + \vec{b}^2 - \vec{c}^2)/2\vec{a}\vec{b}$	$(\vec{a}^2 + \vec{b}'^2 - \vec{c}^2)/2\vec{a}\vec{b}'$	$(\vec{a}^2 + \vec{b}'^2 - \vec{c}^2)/2\vec{a}\vec{b}'$
$a^*$	$(\vec{a}^2 + \vec{b}^2 - \vec{c}^2)/2\vec{a}\vec{b}$	$(\vec{a}^2 + \vec{b}^2 - \vec{c}^2)/2\vec{a}\vec{b}$	$(\vec{a}^2 + \vec{b}'^2 - \vec{c}^2)/2\vec{a}\vec{b}'$	$(\vec{a}^2 + \vec{b}'^2 - \vec{c}^2)/2\vec{a}\vec{b}'$
$a'$	$(\vec{a}'^2 + \vec{b}^2 - \vec{c}^2)/2\vec{a}'\vec{b}$	$(\vec{a}'^2 + \vec{b}^2 - \vec{c}^2)/2\vec{a}'\vec{b}$	$(\vec{a}'^2 + \vec{b}'^2 - \vec{c}^2)/2\vec{a}'\vec{b}'$	$(\vec{a}'^2 + \vec{b}'^2 - \vec{c}^2)/2\vec{a}'\vec{b}'$
$a'^*$	$(\vec{a}'^2 + \vec{b}^2 - \vec{c}^2)/2\vec{a}'\vec{b}$	$(\vec{a}'^2 + \vec{b}^2 - \vec{c}^2)/2\vec{a}'\vec{b}$	$(\vec{a}'^2 + \vec{b}'^2 - \vec{c}^2)/2\vec{a}'\vec{b}'$	$(\vec{a}'^2 + \vec{b}'^2 - \vec{c}^2)/2\vec{a}'\vec{b}'$

(2.42)

Розглянемо мережу з чотирьох вузлів: А, В D і Е (рис. 2.11 б), для якої визначимо компоненту метричного тензора векторів  $\vec{e}$  і  $\vec{f}$ , що не мають спільних точок.

Оскільки їх не можна визначити за допомогою (2.34), то для цього нам необхідно знайти кут  $\angle C$  шляхом використання теореми косинусів для чотирьохкутників [2]:

$$\cos \angle C = (\vec{d}^2 + \vec{h}^2 - \vec{v}^2 - \vec{t}^2) / 2\vec{e}\vec{f}. \quad (2.43)$$

Представимо компоненти метричного тензора для векторів  $\vec{e}$  та  $\vec{f}$  [2]:

	$f$	$f^*$	$f'$	$f'^*$
$e$	$(\vec{d}^2 + \vec{h}^2 - \vec{v}^2 - \vec{t}^2)/2\vec{e}\vec{f}$	$(\vec{d}^2 + \vec{h}^2 - \vec{v}^2 - \vec{t}^2)/2\vec{e}\vec{f}$	$(\vec{d}^2 + \vec{h}^2 - \vec{v}^2 - \vec{t}^2)/2\vec{e}\vec{f}'$	$(\vec{d}^2 + \vec{h}^2 - \vec{v}^2 - \vec{t}^2)/2\vec{e}\vec{f}'$
$e^*$	$(\vec{d}^2 + \vec{h}^2 - \vec{v}^2 - \vec{t}^2)/2\vec{e}\vec{f}$	$(\vec{d}^2 + \vec{h}^2 - \vec{v}^2 - \vec{t}^2)/2\vec{e}\vec{f}$	$(\vec{d}^2 + \vec{h}^2 - \vec{v}^2 - \vec{t}^2)/2\vec{e}\vec{f}'$	$(\vec{d}^2 + \vec{h}^2 - \vec{v}^2 - \vec{t}^2)/2\vec{e}\vec{f}'$
$e'$	$(\vec{d}^2 + \vec{h}^2 - \vec{v}^2 - \vec{t}^2)/2\vec{e}'\vec{f}$	$(\vec{d}^2 + \vec{h}^2 - \vec{v}^2 - \vec{t}^2)/2\vec{e}'\vec{f}$	$(\vec{d}^2 + \vec{h}^2 - \vec{v}^2 - \vec{t}^2)/2\vec{e}'\vec{f}'$	$(\vec{d}^2 + \vec{h}^2 - \vec{v}^2 - \vec{t}^2)/2\vec{e}'\vec{f}'$
$e'^*$	$(\vec{d}^2 + \vec{h}^2 - \vec{v}^2 - \vec{t}^2)/2\vec{e}'\vec{f}$	$(\vec{d}^2 + \vec{h}^2 - \vec{v}^2 - \vec{t}^2)/2\vec{e}'\vec{f}$	$(\vec{d}^2 + \vec{h}^2 - \vec{v}^2 - \vec{t}^2)/2\vec{e}'\vec{f}'$	$(\vec{d}^2 + \vec{h}^2 - \vec{v}^2 - \vec{t}^2)/2\vec{e}'\vec{f}'$

(2.44)

де прийнято, що при використанні індексів  $f^*$  і  $f'^*$  в (2.44) замість  $\vec{h}$  використовуємо  $\vec{h}'$ , а для індексів  $e^*$  і  $e'^*$  в (2.44) замість  $\vec{d} - \vec{d}'$ .

Також прийнято, що діагональні компоненти визначаються як:

$$\vec{v} = (\vec{v} + \vec{v}') / 2, \quad (2.45)$$

$$\vec{t} = (\vec{t} + \vec{t}') / 2. \quad (2.46)$$

Для визначення метричного контраваріантного тензора використовується наступне співвідношення:

$$g^{ij} = \frac{1}{g} \frac{\partial g}{\partial g_{ij}}, \quad (2.47)$$

де  $g = \det |g_{ij}|$  – визначник метричного коваріантного тензора.

Розглянемо випадок, коли навантаження між вузлами можна описати за допомогою експоненціального закону розподілу.

Зокрема, згідно рис. 2.11а навантаження між кластерами мережі представимо у такому вигляді:

$$CB: 1 - e^{-at};$$

$$CA: 1 - e^{-bt};$$

$$AB: 1 - e^{-ct}.$$

З (2.42) компоненти метричного тензора  $g_{ab}$  будуть визначатися як:

$$g_{ab} = \frac{(1 - e^{-at})^2 + (1 - e^{-bt})^2 - (1 - e^{-ct})^2}{2(1 - e^{-at})(1 - e^{-bt})}. \quad (2.48)$$

Для (2.29) згідно [2]:

$$\begin{aligned} \frac{dg_{ab}}{dt} = & \frac{((1 - e^{-at})^2 + (1 - e^{-bt})^2 - (1 - e^{-ct})^2)}{2(1 - e^{-at})(1 - e^{-bt})} \left[ \frac{ae^{-at}}{(1 - e^{-at})} + \frac{be^{-bt}}{(1 - e^{-bt})} \right] + \\ & + \frac{ae^{-at}(1 - e^{-at}) + be^{-bt}(1 - e^{-bt}) - ce^{-ct}(1 - e^{-ct})}{2(1 - e^{-at})(1 - e^{-bt})}. \end{aligned} \quad (2.49)$$

## 2.5. Висновки до 2-го розділу

1. Незважаючи на обмежену локалізацію, алгоритм маршрутизації повинен гарантувати, що пакет буде доставлений до місця призначення, адже при досягненні локального мінімуму пакет "зупиняється", і жадібна маршрутизація не може продовжуватись, внаслідок чого передача даних не здійснюється. Для покращення процесу визначення місцезнаходження вузла у розділі пропонується метод локалізації вузлів мережі, який базується на алгоритмічному підході Терстона з використанням діаграми потужності Вороного з правильними взаємозв'язками суміжності. Застосування даного методу дає змогу підвищити точність визначення віртуальних координат при застосуванні канонічного одиничного диску Пуанкаре, покращуючи якість розв'язання завдань маршрутизації в евклідовому просторі.

2. У зв'язку з високою щільністю користувачів важливим аспектом є розробка методики розміщення сенсорних вузлів, що забезпечує необхідне покриття певної території. У розділі удосконалено метод кластеризації сенсорних вузлів для зменшення тривалості пошуку маршруту між довільною їх парою, який передбачає визначення центроїда кластера із урахуванням моделі поширення сигналу в радіоканалі. Суть алгоритму полягає у розбитті множини елементів векторного простору на заздалегідь відоме число кластерів. На кожній ітерації переобчислюють центроїд для кожного кластера, отриманого на попередньому кроці, потім вектори розбиваються на кластери знову відповідно до того, який з нових центрів виявився ближчим за метрикою, яка формується нелише на основі розрахунку Евклідової відстані між вузлами і з врахуванням моделі поширення сигналу. В якості оцінки втрат у досліджуваній безпроводній самоорганізованій мережі пропонується використовувати однопроменеву модель Motley-Keenan, яка дозволяє враховувати втрати потужності сигналу та відслідковувати рівень BER при проходженні через кожен вузол мережі. Формування кластеру  $i$ , відповідно, знаходження його центроїда, буде відбуватися до моменту, поки не буде знайдено усі найближчі по відстані вузли з максимальним значенням потужності сигналу.

3. Для визначення стану телекомунікаційної мережі пропонується використовувати модель тензорного представлення її топологічної структури на основі криволінійної системи координат. Пропонується збільшити кількість компонент метричного тензора для представлення метрики у симетричному тензорному полі, яка застосовується для опису деформації Ріманової метрики, що використовується у потоках Річчі. Використання даної моделі дає змогу здійснювати моніторинг та фіксацію станів топологічної структури після кластеризації, на основі яких працюватимуть моделі маршрутизації, а також підвищити точність формування таблиць маршрутизації в конкретні моменти часу.

## РОЗДІЛ 3.

### МОДЕЛЮВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗПОДІЛУ ІНФОРМАЦІЙНИХ ПОТОКІВ В МЕРЕЖАХ ІЗ САМООРГАНІЗАЦІЄЮ

#### 3.1. Дослідження ефективності локалізації вузлів мережі із використанням діаграм потужностей Вороного

Для дослідження точності визначення віртуальних координат вузлів та ефективності маршрутизації проведемо моделювання запропонованого алгоритму у п. 2.1 в програмному середовищі MATLAB. Дослідження проводилося на випадкових трикутних графах місткістю 40 - 50 вершин кожен [106].

В результаті моделювання отримано жадібні вкладення діаграми потужності для кожної з точок після 100, 200, 300 ітерацій

Вважаємо, що точна укладка кола здійснюється, якщо кола, які повинні бути дотичні, мають помилку на відстані між їх центрами в межах 1% від найменшого з двох радіусів. Це дозволить порівняти кількість ітерацій, необхідних для введення жадібних вкладень потужності з кількістю ітерацій, необхідних для отримання точної укладки.

Рис. 3.1 та 3.2 демонструють жадібні вкладення діаграм потужності вузлів та їх точну укладку, сформовану для одного вхідного графа [13].

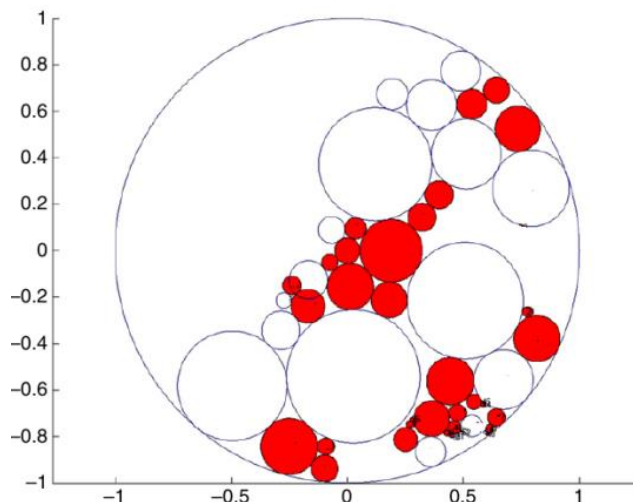


Рис. 3.1. Жадібні вкладення діаграм потужності після 6 ітерацій (кольорові кола - ті, які задовольняють LPD)

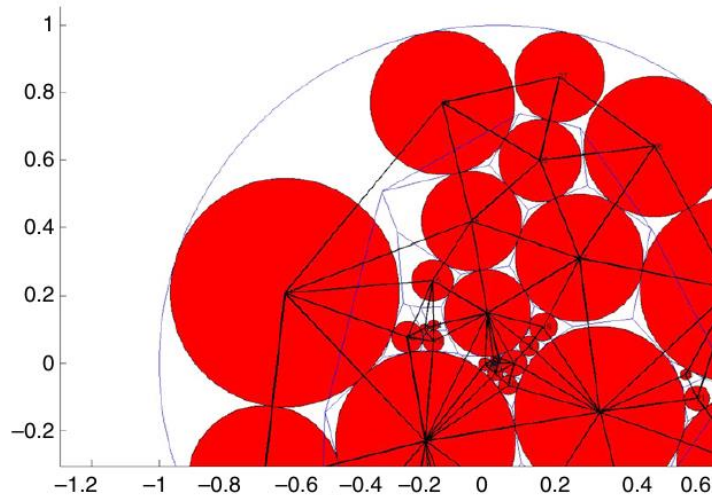


Рис. 3.2. Жадібні вкладення діаграм потужності після 32 ітерацій (LPD виконується для всіх точок )

Зауважимо, що висока неоднорідність цих випадкових графів, тобто коротка петля ребер може зв'язати область, що містить велику кількість вершин (тобто граф містить невеликі відрізки), є причиною відносно низької ефективності алгоритму.

Цей тип налаштування не є реалістичним у випадку сенсорних мереж, де очікується, що планарний графік буде підграфом реалістичного графічного зв'язку, такого як граф одиничного диска.

Для перевірки масштабованості алгоритму змодельовано його роботу на множині випадкових триангуляцій, сформованих за допомогою позиціонування  $n$  випадкових точок на одиничній площі, і здійснено обчислення їх триангуляції Делоне.

Експеримент проводився для триангуляції з 50 до 500 вершин, що генерує 100 триангуляцій кожного розміру.

На рис. 3.3 показано кількість ітерацій до збіжності, усередненої за всіма триангуляціями одного розміру. Це вказує на те, що число ітерацій  $T_i$  лінійне відносно кількості вершин  $N$ .

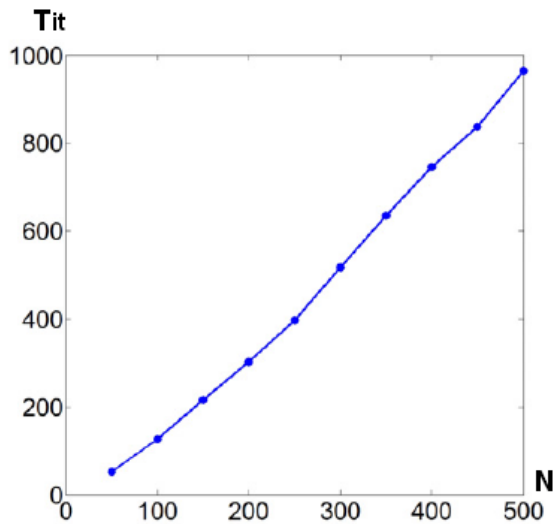


Рис. 3.3. Середня кількість ітерацій до конвергенції

На рис. 3.4 середнє відношення коефіцієнта еластичності ( $K_{еласт}$ ) відповідно, усереднене по всіх парах вершин по всіх триангуляціям одного розміру. Відповідно до рис. 3.4,  $K_{еласт}=1,25$ .

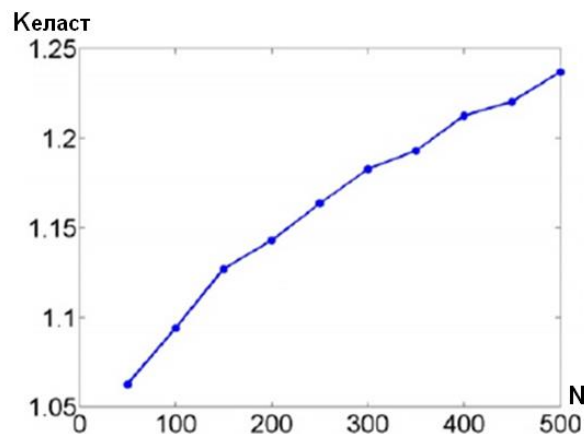


Рис. 3.4. Середній коефіцієнт еластичності маршруту маршрутизації

### 3.2. Оцінка ефективності впровадження методу кластеризації сенсорних вузлів з урахуванням моделі розповсюдження сигналу

Для дослідження процесів передавання даних у безпроводних самоорганізованих мережах у роботі розроблено програмний стимулятор, основою якого є принцип імітаційного моделювання з дискретними подіями. Симулятор дає змогу досліджувати поведінку самоорганізованих мереж в умовах високого рівня шуму та визначати умови, при яких тривалість пошуку маршруту та передавання даних у мережі будуть найкращими.

Логічно симулятор складається з трьох функціональних частин, а саме: система моделювання, мережа та вузол (рис. 3.5).



Рис. 3.5. UML-діаграма розробленого симулятора

Система моделювання включає в себе абстрактні події, ядро моделювання та опрацювання подій, засоби створення і ініціалізації мережної конфігурації, сценарії проведення експериментів, засоби управління моделюванням та візуалізації результатів моделювання.

Мережа складається з площини передавання, площини управління та системи моніторингу (рис. 3.6).



Рис. 3.6. Схема функціонування системи управління мережею



Площина передавання даних мережі агрегує мережні вузли та містить інформацію про параметри радіоканалу.

Площина управління містить алгоритми забезпечення мобільності, здійснення конфігурації та кластеризації мережних вузлів.

Окремою частиною мережі є система моніторингу, яка по своїй суті хоча і відноситься до площини управління, проте є незалежним виділеним компонентом.

Система моніторингу використовує площину керування мережею для комунікації з усіма мережними вузлами та збору необхідних параметрів функціонування мережі та передавання даних.

Основним елементом площини передавання даних мережі є вузол, який характеризується позицією в просторі та складається з двох основних частин - площин управління та передавання даних (рис. 3.7).

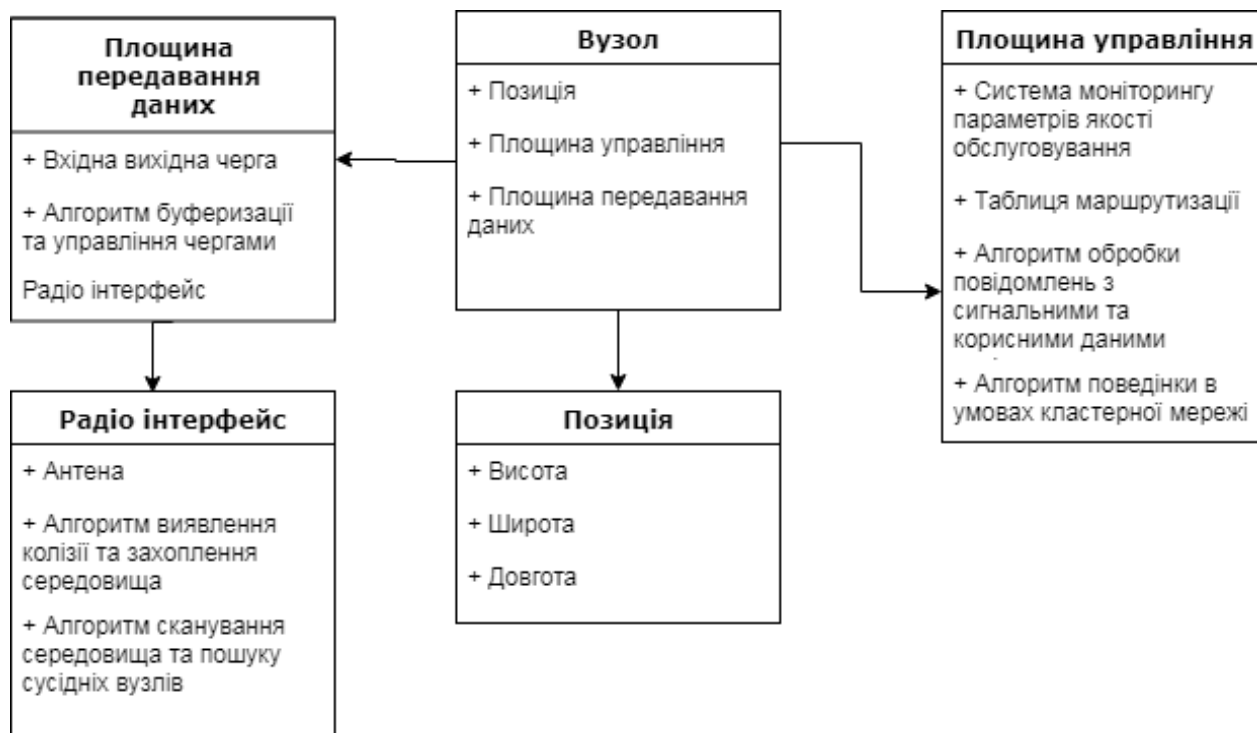


Рис. 3.7. Схема функціонування вузла мережі

Саме площина управління відповідає за поведінку вузла та здійснює опрацювання повідомлень відповідно до встановлених протоколів передавання даних.

Будь-яке повідомлення передається радіоканалом з урахуванням його параметрів та може бути переданим з помилками у випадку низького рівня відношення сигнал/шум.

Кожен вузол здійснює генерування повідомлень з корисними даними.

Для передавання повідомлення іншому вузлу в мережі система управління генерує запит, що передається в площину передавання даних, яка в свою чергу використовує радіоінтерфейс для сканування радіоканалів та виявлення вузлів, що знаходяться в межах досяжності для передавання.

Процедура пошуку сусідніх вузлів також відбувається з заданим інтервалом і всі знайдені вузли зберігаються в спеціальному списку.

Для подальшої передачі повідомлення система управління здійснює виклик площини передавання даних, в якому параметром виступає саме повідомлення.

Для площини передавання даних тип повідомлення немає значення, алгоритм опрацювання усіх повідомлень є однаковим.

Площина передавання даних за допомогою радіоінтерфейсу прослуховує радіоканали.

У випадку виявлення передавання у потрібному радіоканалі одним з сусідніх вузлів, площина передавання даних очікує певний час після проходження якого знову прослуховує радіоканал.

Якщо радіоканал вільний, то система передавання даних розпочинає передачу повідомлення до наступного вузла.

Площина передавання містить вхідні та вихідні черги повідомлень. Вихідна черга повідомлень дає змогу площині управління зробити запит на відправку повідомлення і продовжити виконання власних функцій.

Після відправки даних іншому вузлу площина передавання даних вибирає з вихідної черги наступне повідомлення і розпочинає процедуру передавання. Це буде здійснюватися до того моменту, поки вихідна черга не буде порожньою.

Очевидно, що зі збільшенням кількості сусідніх вузлів, збільшується ймовірність передавання повідомлення одним з сусідів.

Отже, зростає ймовірність виникнення колізій та середня тривалість очікування вузлом на момент, коли радіоканал звільниться і можна буде передавати власне повідомлення.

Це в першу чергу негативно впливає на функціонування мережі в цілому, оскільки тривалість передавання сигнальних повідомлень зростає./

Таким чином, відповідно збільшується і час конвергенції протоколів маршрутизації та адаптації мережі до нових умов радіоканалу.

Система моніторингу мережі, за посередництва системи управління, «спілкується» з усіма вузлами та отримує від них необхідну інформацію про тривалість пошуку маршрутів, частоту виникнення колізій та стан радіоканалів.

Для збору інформації система управління зчитує з вузлів кожен секунду з метою вчасного отримання даних для підвищення якості результатів моніторингу.

Система управління симулятором дає змогу користувачеві налаштувати велику кількість параметрів моделювання, а саме: параметри локації, кількість вузлів, параметри радіоканалів, протоколи пошуку маршрутів та передавання даних, алгоритми кластеризації.

Також ця система забезпечує візуалізацію результатів моніторингу та допомагає оцінити наскільки та чи інша конфігурація мережі є ефективною.

На рис. 3.8 представлено схему функціонування симулятора мережі.

Розроблена модель дозволить перевірити адекватність запропонованих методів та алгоритмів, адже усі процеси, які генеруються, максимально наближені до умов роботи реальної мережі.

Перший етап, який дозволяє перевірити даний симулятор – ефективність запропонованого алгоритму кластеризації.

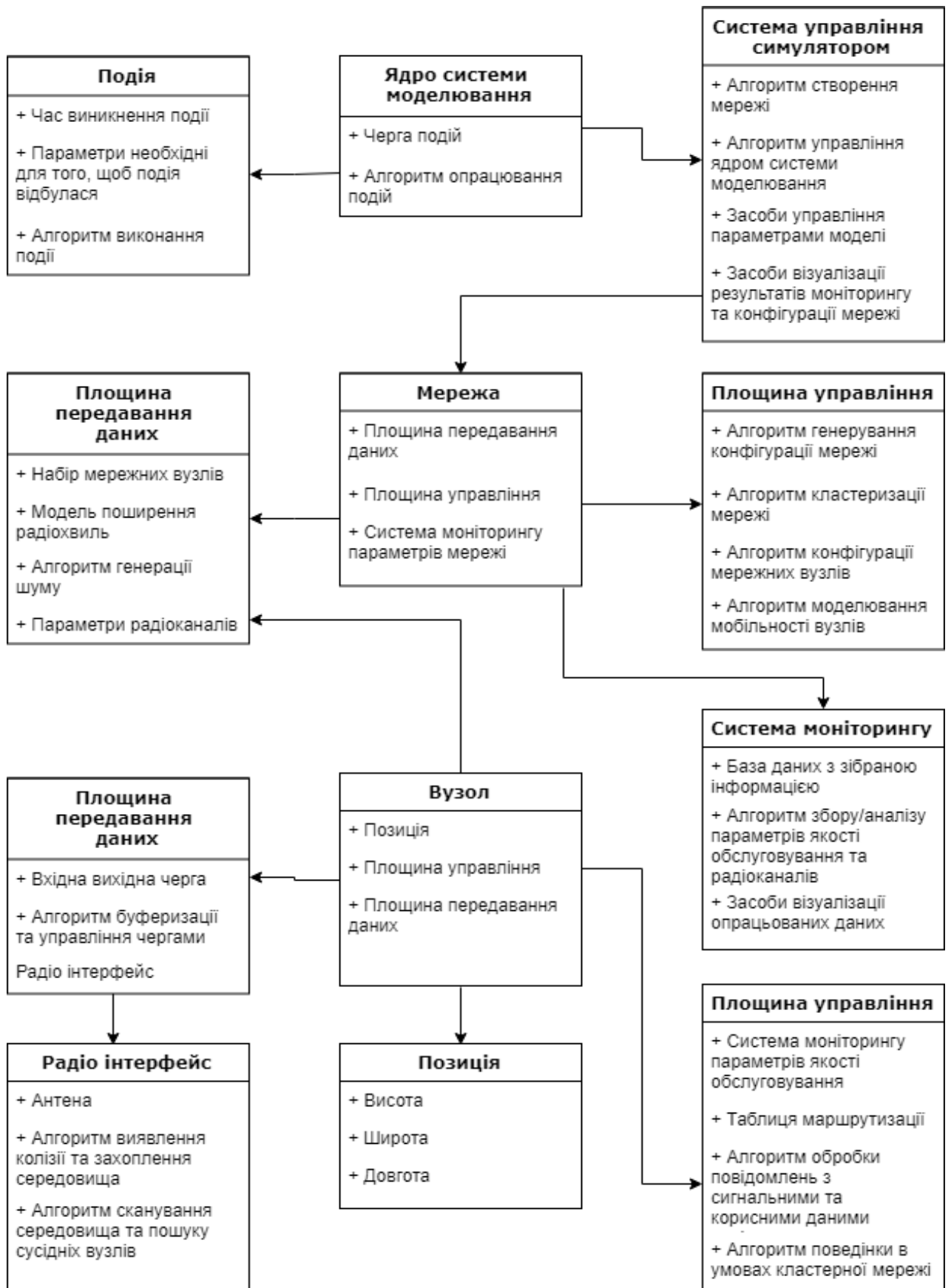


Рис. 3.8. Схема функціонування симулятора мережі

Дослідження проводилось для 20 вузлів, розміщених на площині випадковим чином (рис. 3.9). Потужність випромінювання – 20 дБм, мінімальна чутливість приймача – 65 дБм. Повідомлення генерувалися протягом 1000 с, розмір кожного з них – 500 байт. Середня тривалість обробки повідомлення одним вузлом становить 1 с.

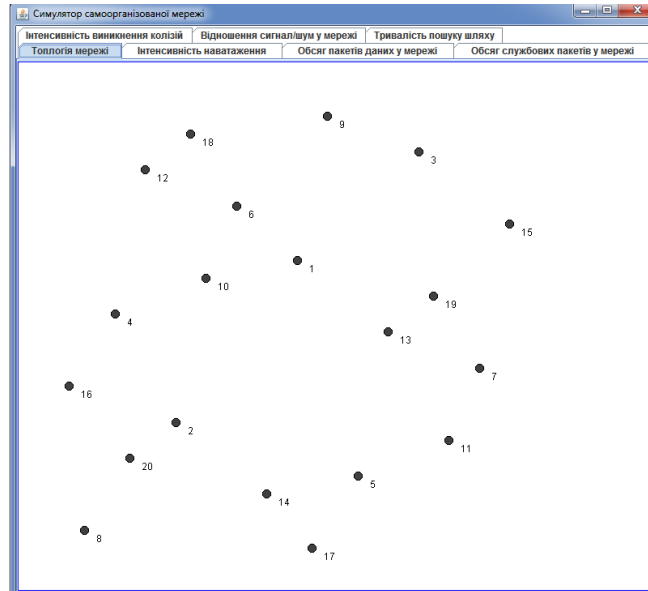


Рис. 3.9. Топологія досліджуваної мережі

На рис. 3.10 і 3.11 показано інтенсивність поступленого навантаження на розглянуту мережу та обсяг переданих повідомлень, відповідно.

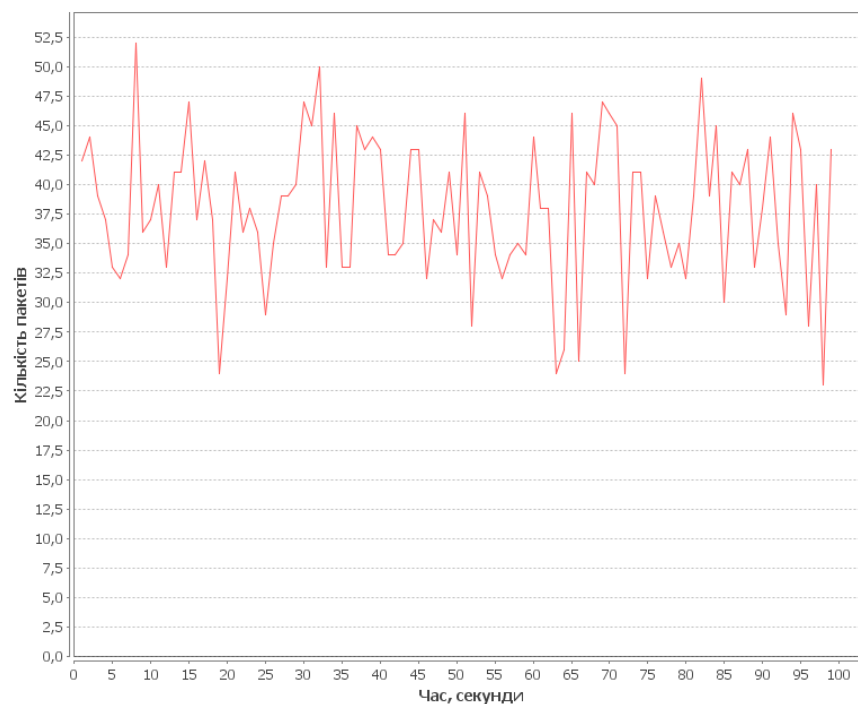


Рис. 3.10. Інтенсивність поступленого навантаження

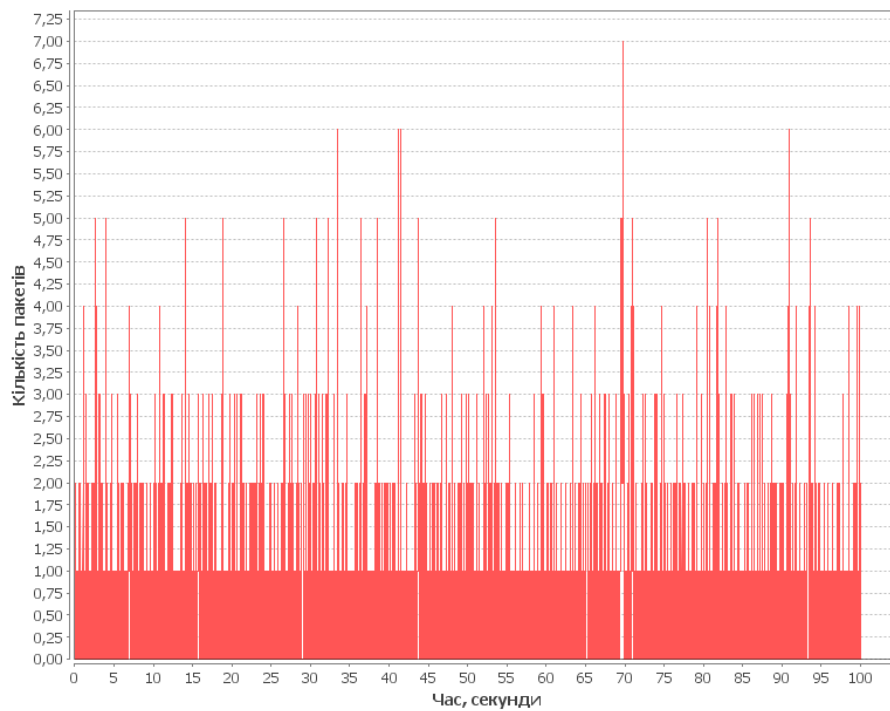


Рис. 3.11. Обсяг переданих повідомлень у досліджуваній мережі

Перевагою розробленої моделі є можливість проводити оцінку відношення сигнал/шум між кожною парою вузлів та усереднити його значення в мережі (рис. 3.12).

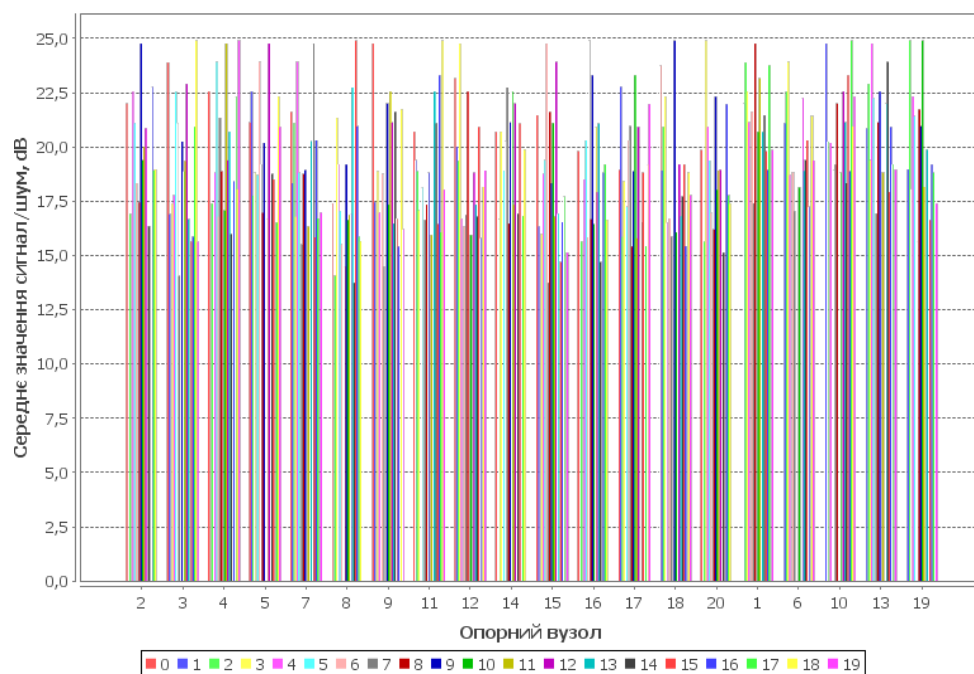


Рис. 3.12. Оцінка середнього рівня сигнал/шум в мережі

Як видно з рис 3.13, середнє значення сигнал/шум на першому вузлі становить 17 дБм, а на 19 – 16 дБм.

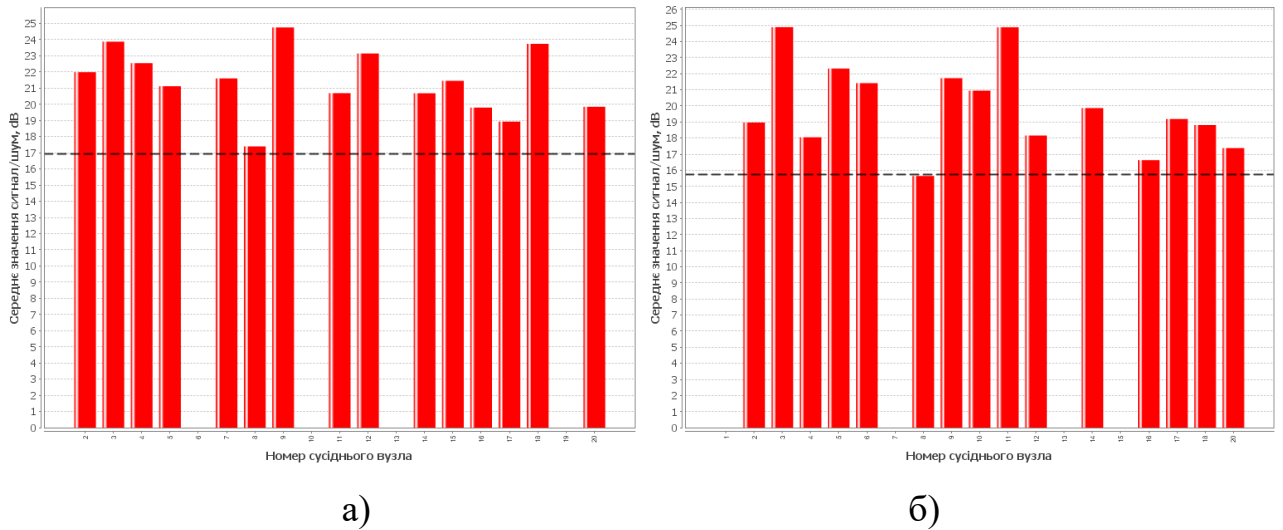


Рис. 3.13. Оцінка середнього рівня сигнал/шум від а) 1 вузла; б) 19 вузла до всіх інших вузлів мережі

Згідно представлених значень найближчим по потужності до вузла 1 є вузол 9, тоді як для 19 вузла – 3 та 11.

На рис. 3.14 представлено оцінку тривалості пошуку маршруту у досліджуваній мережі з використанням алгоритму кластеризації k-means.

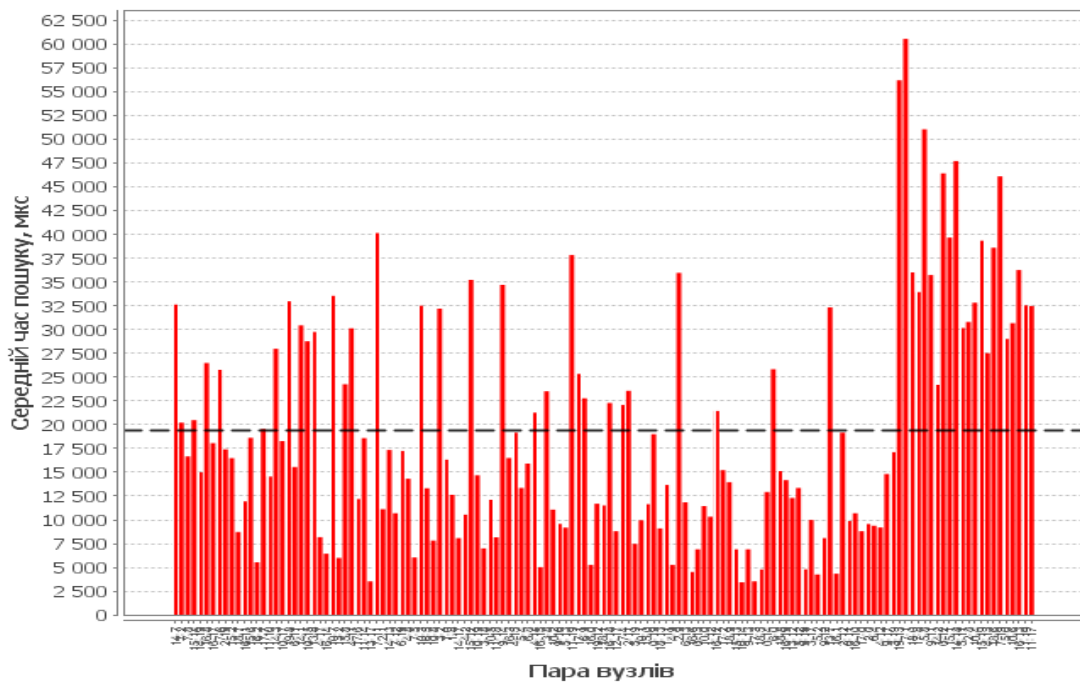


Рис. 3.14. Оцінка тривалості пошуку маршруту у досліджуваній мережі з використанням алгоритму кластеризації k-means

Оцінка тривалості пошуку маршруту у досліджуваній мережі без кластеризації між довільно взятою парою вузлів показала, що середній час

пошуку маршруту займає близько 18500 мкс, що є досить тривалим та збільшує час передачі повідомлень кінцевому користувачу (вузлу призначення).

Після ввімкнення розробленого у п. 2.2 алгоритму кластеризації спостерігається значне покращення часових характеристик роботи мережі.

Мережа розділена на чотири кластери відповідно до значень Евклідової відстані та максимізації середнього рівня сигнал/шум (рис. 3.15).

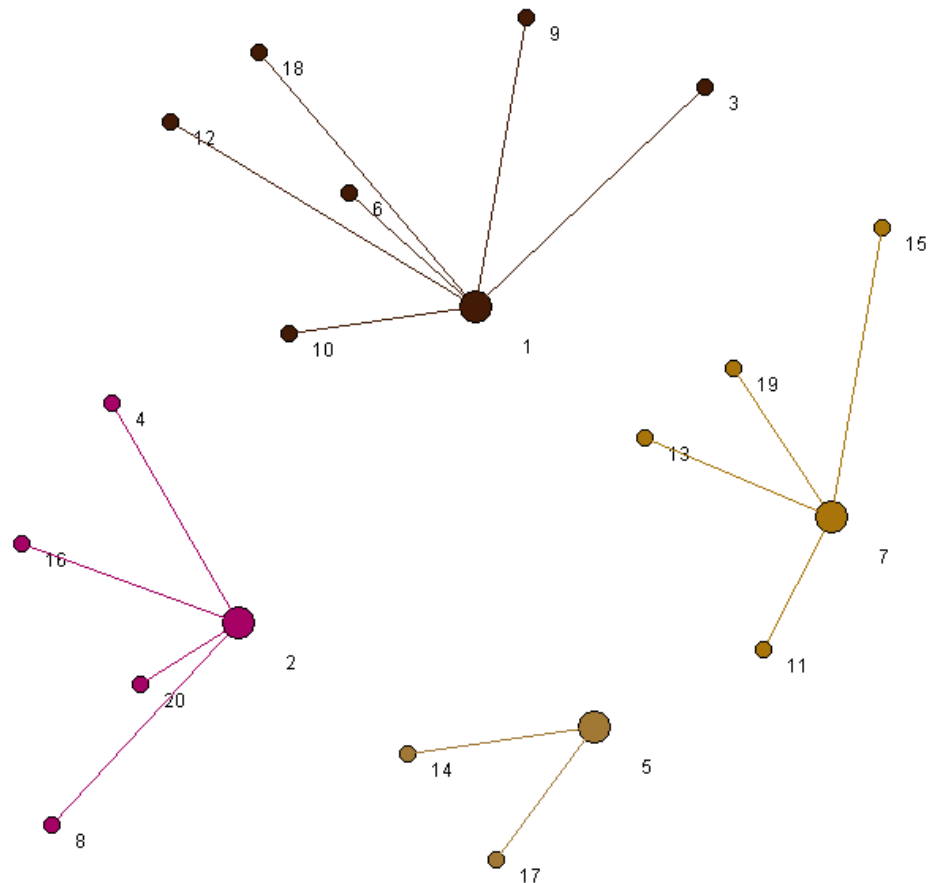


Рис. 3.15. Топологія досліджуваної мережі після кластеризації

Це дало змогу підвищити інтенсивність поступлення даних та зменшити тривалість обробки повідомлень у досліджуваній мережі, що показано на рис. 3.16 та 3.17 відповідно.



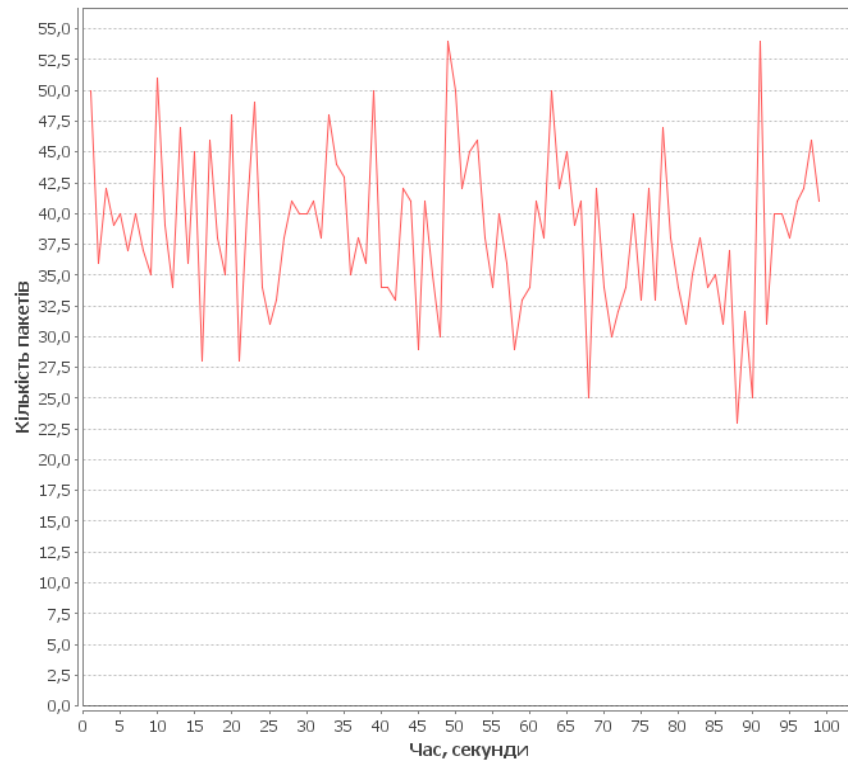


Рис. 3.16. Інтенсивність поступлення даних у досліджуваній мережі

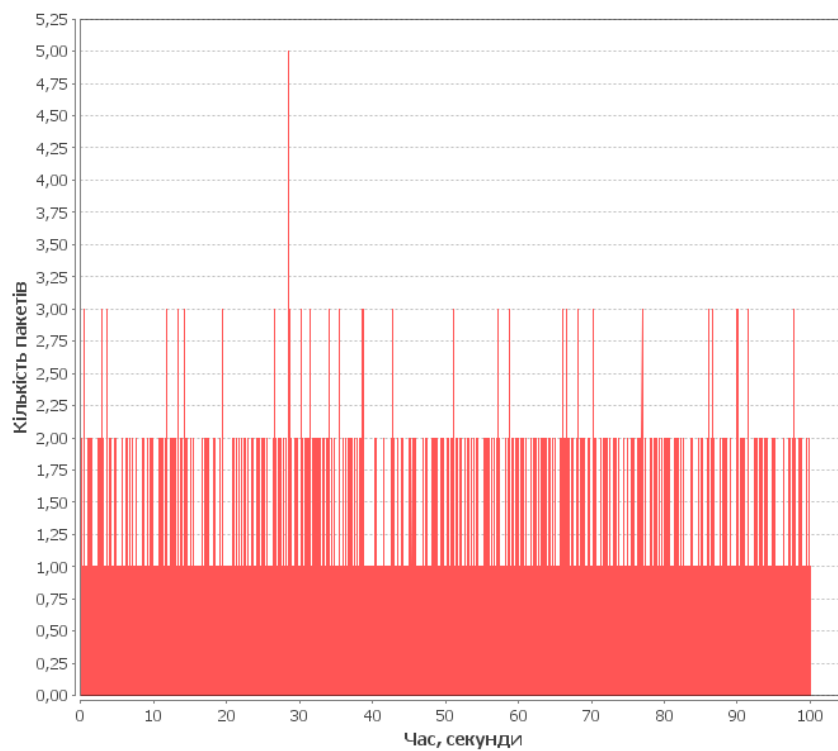


Рис. 3.17. Обсяг переданих повідомлень у мережі після використання пропонуваного алгоритму кластеризації

Оцінка тривалості пошуку маршруту у досліджуваній мережі з пропонуваним алгоритмом кластеризації між довільно взятою парою вузлів показала, що середній час пошуку маршруту зменшився у 4,5 рази і становить

4100 мкс (рис 3.18), що підтверджує ефективність запропонованого алгоритму кластеризації та дозволяє зменшити час передачі повідомлень кінцевому користувачу самоорганізованої безпроводної мережі.

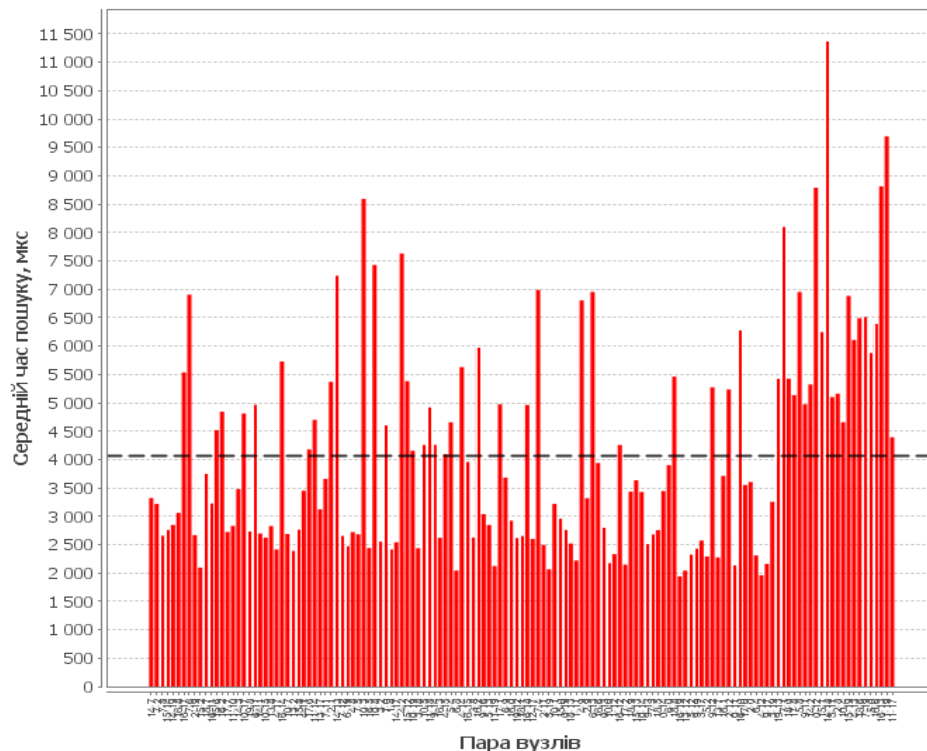
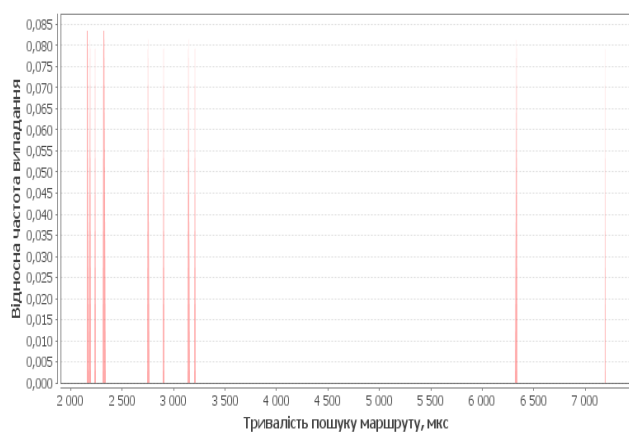


Рис. 3.18. Оцінка тривалості пошуку маршруту у досліджуваній мережі із впровадженням запропонованого алгоритму кластеризації

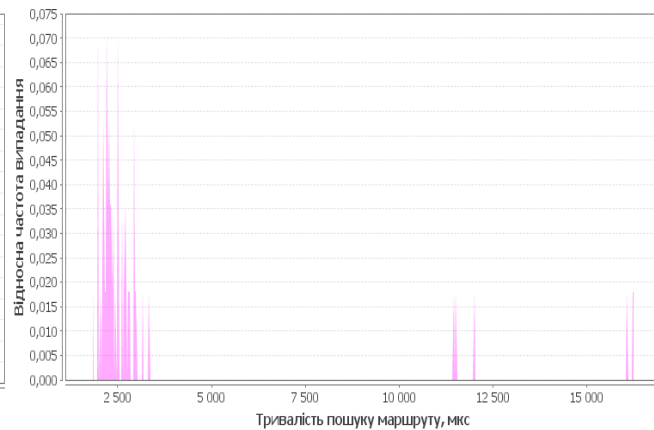
Якщо говорити про загальну ефективність кластеризації, то необхідно зазначити, що чим більша кількість вузлів – тим більша тривалість пошуку маршруту, оскільки для розрахунку метрики необхідно враховувати не лише відстань між кожною окремою парою вузлів, але й тривалість обробки та передавання кожним окремо взятим вузлом.

Розглянемо випадок, коли у мережі функціонують від 4 до 17 вузлів в межах 4 кластерів з такими ж параметрами, як описано вище.

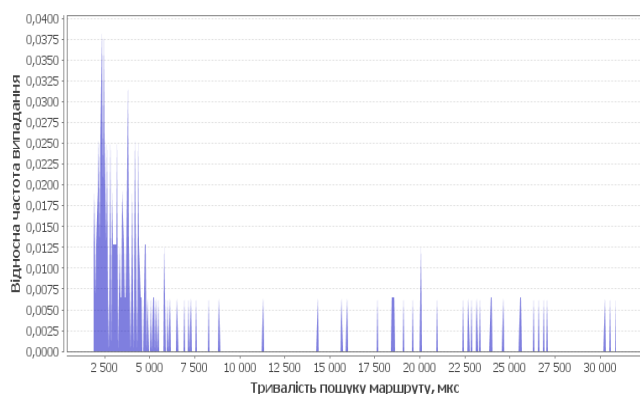
На рис. 3.19 представлено оцінку тривалості пошуку маршруту в залежності від кількості вузлів при стандартному алгоритмі кластеризації.



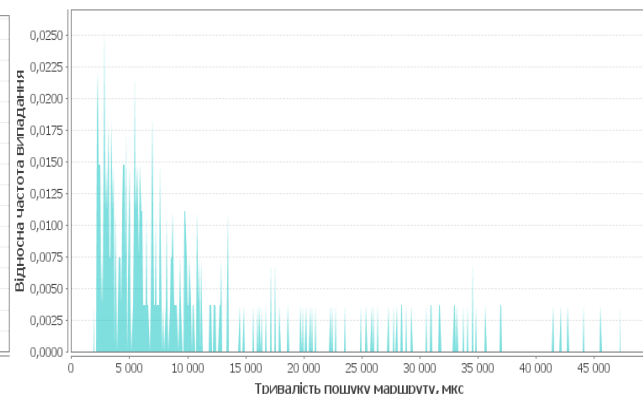
а) 4 вузли



б) 8 вузлів



в) 13 вузлів



г) 17 вузлів

Рис. 3.19. Оцінка тривалості пошуку маршруту в залежності від кількості вузлів при стандартному алгоритмі кластеризації

Із наведених графічних залежностей видно, що при наявності 4 вузлів в мережі тривалість пошуку найкоротшого маршруту між довільно взятою парою вузлів може тривати і до 6,5 с, тоді як для 17 вузлів – пошук може займати до 45 с.

Це зумовлено нерівномірністю надходження запитів на вузли мережі, низькою ефективністю використання ресурсів каналів зв'язку, високим рівнем бітових помилок.

На рис. 3.20 представлено узагальнену характеристику тривалості пошуку маршруту в залежності від розміру мережі.

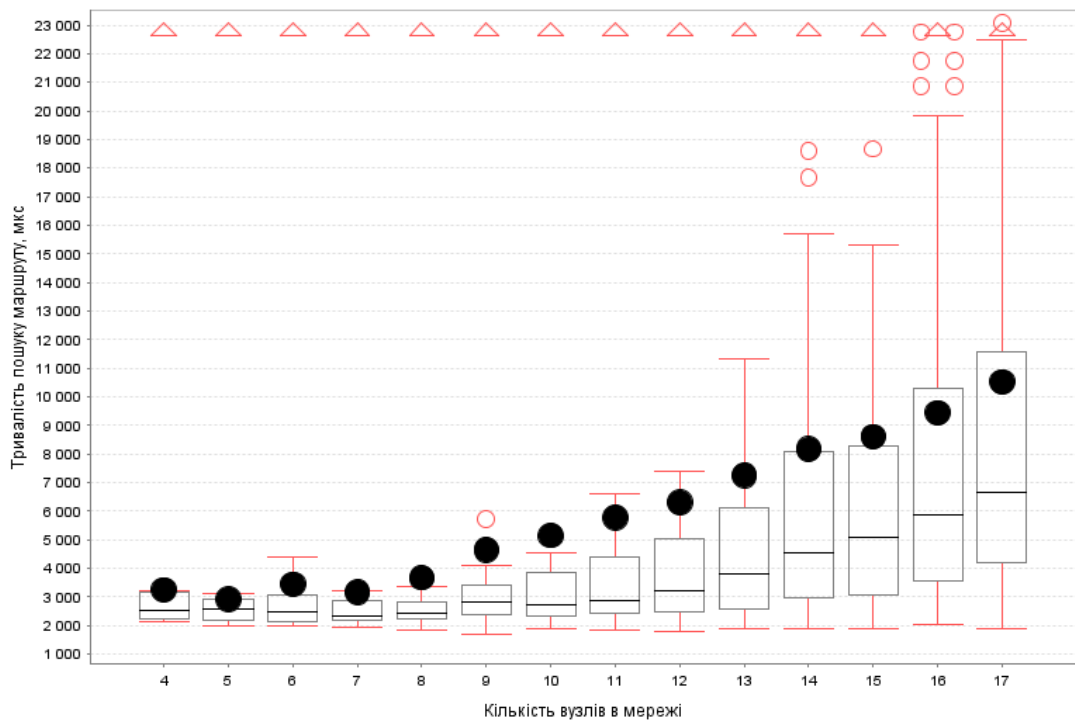
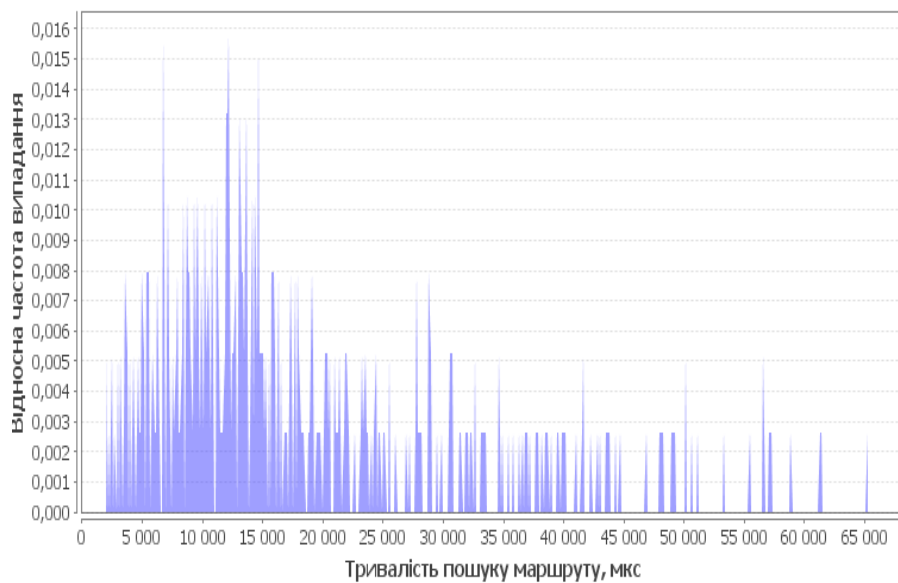
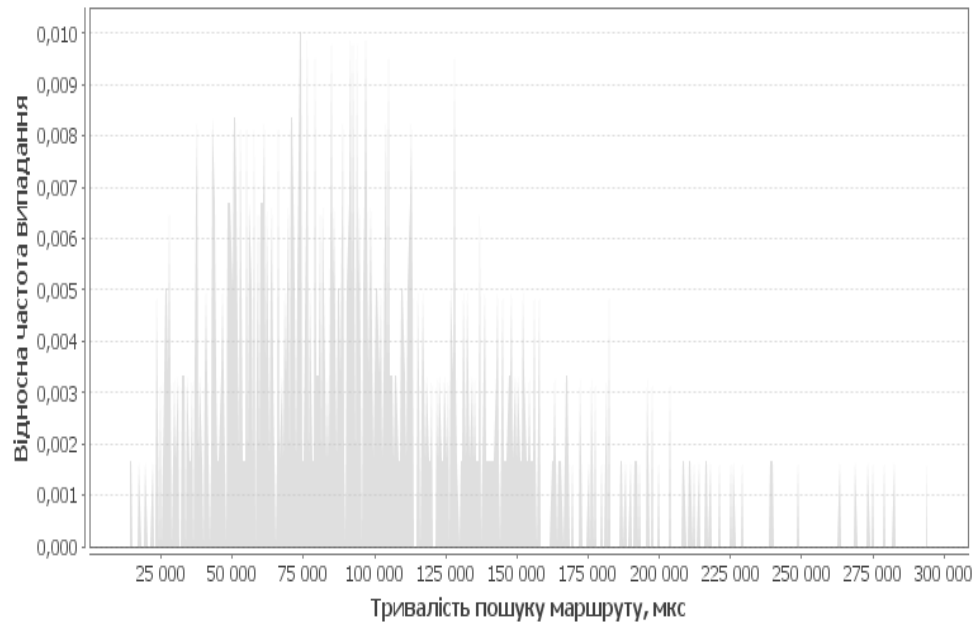


Рис. 3.20. Узагальнена характеристика тривалості пошуку маршруту в залежності від розміру мережі

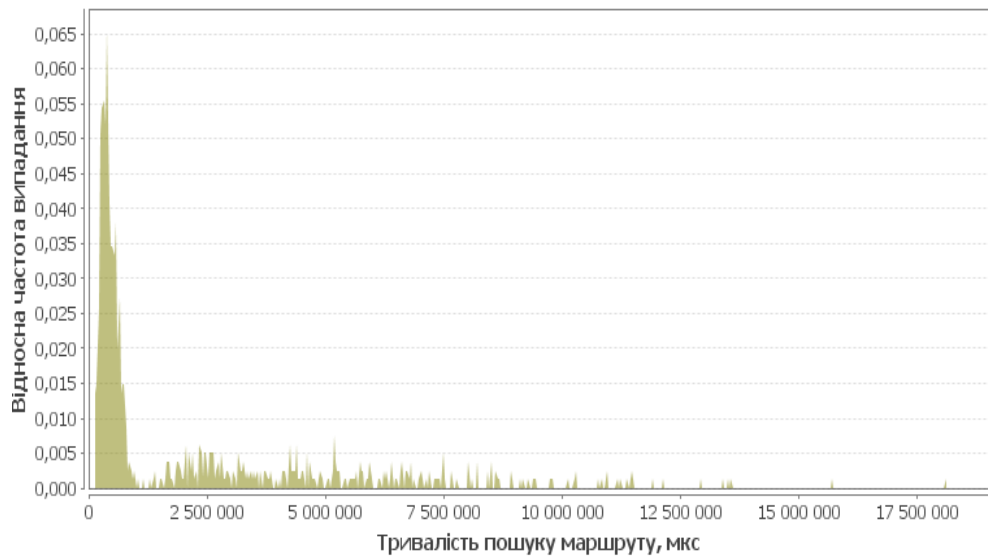
На основі результатів дослідження можна зробити наступний висновок: при збільшенні кількості вузлів мережі (для прикладу 20, 25, 30 вузлів та 6 кластерів) тривалість пошуку маршруту зростатиме за експоненційним законом, що призведе до збільшення часу надання послуг кінцевим користувачам (рис. 3.21).



а) 20 вузлів



б) 25 вузлів



в) 30 вузлів

Рис. 3.21. Оцінка тривалості пошуку маршруту при масштабуванні мережі

На рис. 3.22 представлено узагальнену характеристика тривалості пошуку маршруту в процесі масштабування мережі.

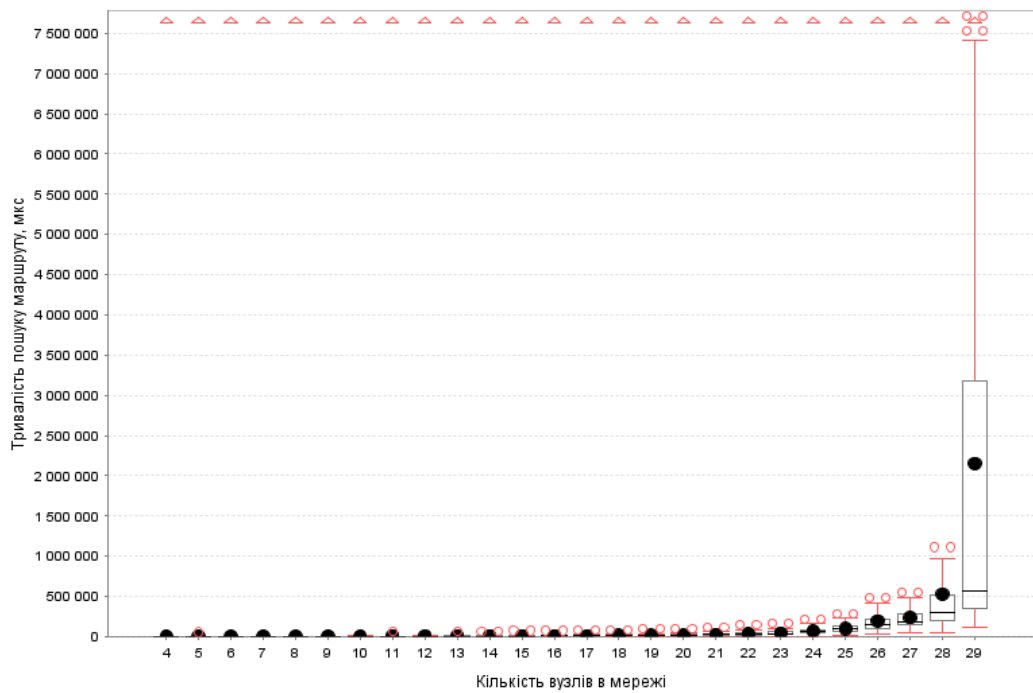


Рис. 3.22. Узагальнена характеристика тривалості пошуку маршруту в процесі масштабування мережі

Рис. 3.23 демонструє оцінку тривалості пошуку маршруту при функціонуванні 18 вузлів мережі при впровадженні запропонованого алгоритму кластеризації.

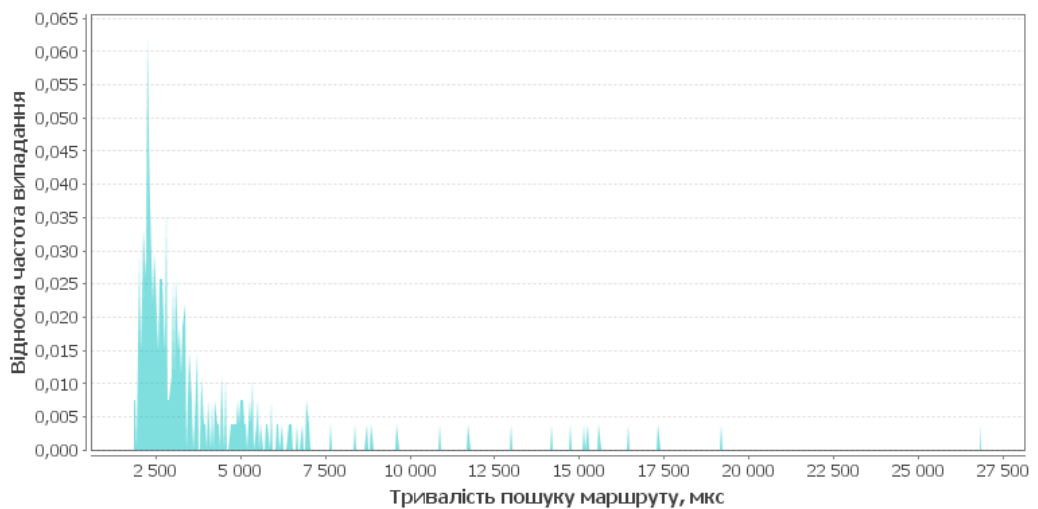


Рис. 3.23. Оцінка тривалості пошуку маршруту при функціонуванні 18 вузлів при впровадженні запропонованого алгоритму кластеризації

Впровадження розробленого алгоритму кластеризації дозволить зменшити тривалість пошуку маршруту при такій же конфігурації мережі. Як бачимо з рис. 3.23, при функціонуванні 18 вузлів (мережа розділяється на таку ж

кількість кластерів) затримка на передавання даних зменшується до 27,5 с, тобто у 1,6 разів.

На рис. 3.24 представлена узагальнена характеристика тривалості пошуку маршруту для цього випадку.

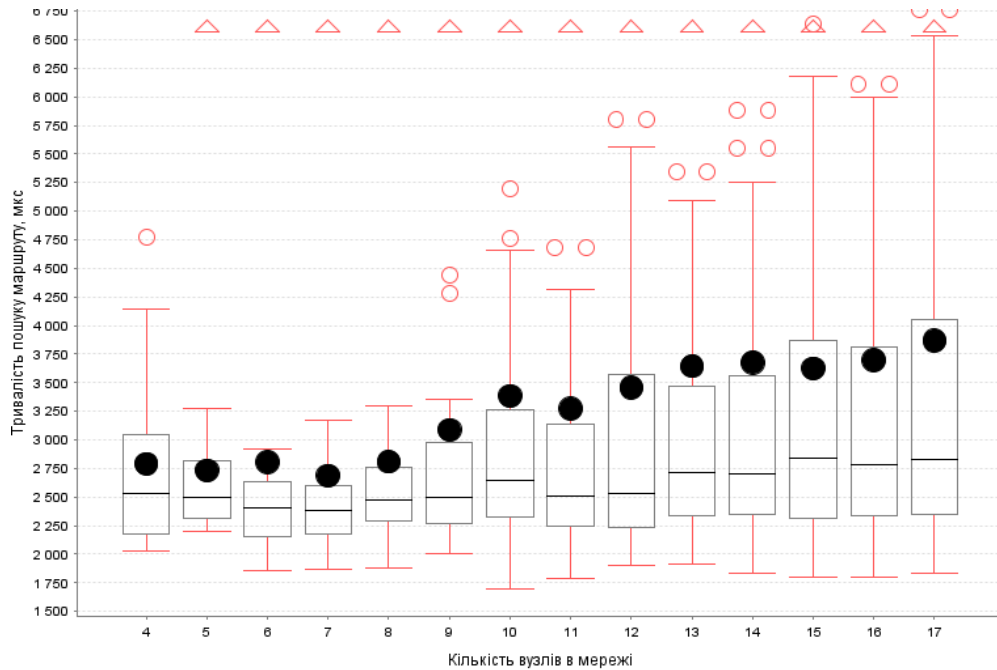


Рис. 3.24. Узагальнена характеристика тривалості пошуку маршруту для мережі із 18 вузлами

На рис. 3.25, 3.26 представлено результати моделювання тривалості пошуку маршруту для 30 вузлів мережі при впровадженні запропонованого алгоритму кластеризації.

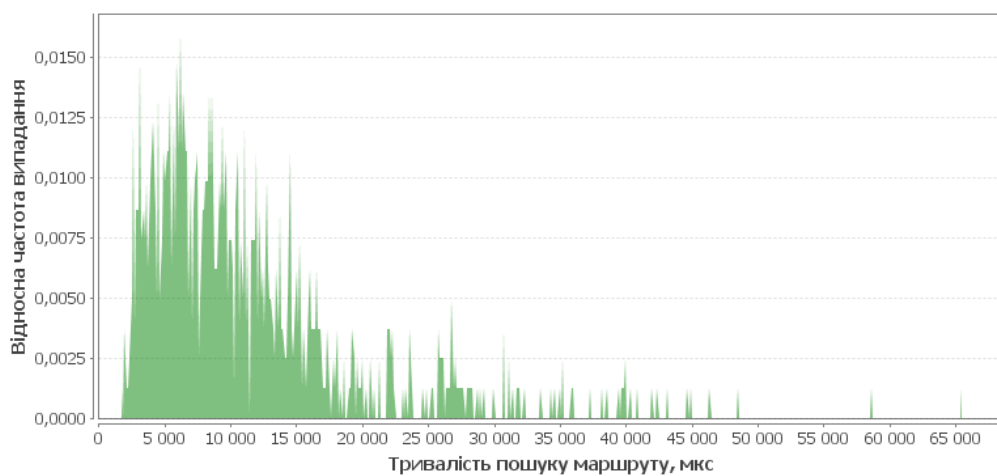


Рис. 3.25. Оцінка тривалості пошуку маршруту при функціонуванні 30 вузлів при впровадженні запропонованого алгоритму кластеризації

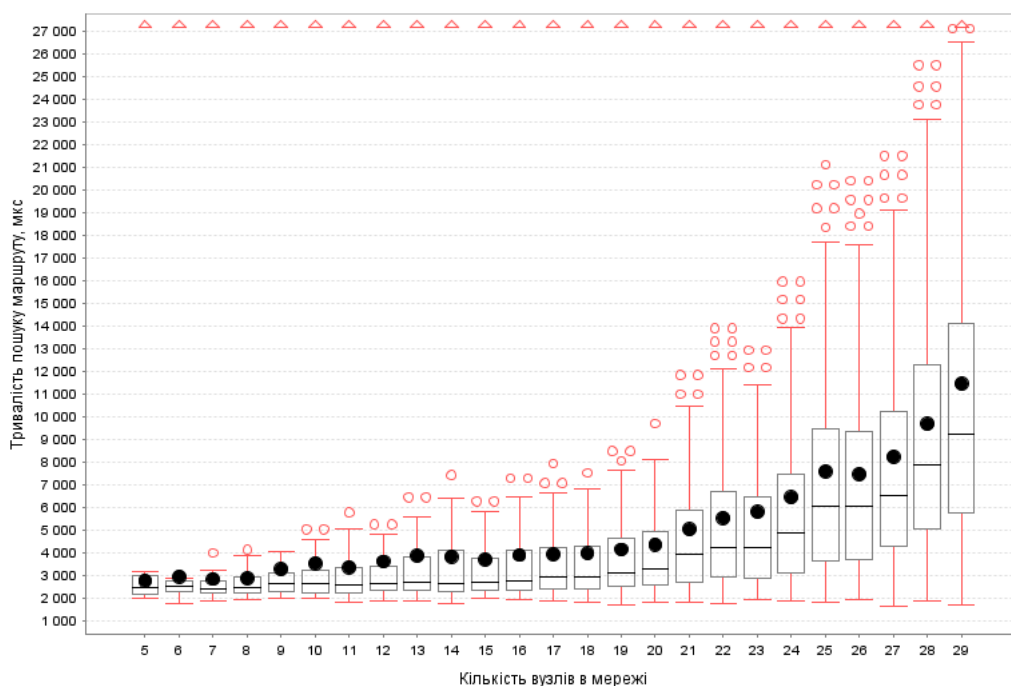


Рис. 3.26. Узагальнена характеристика тривалості пошуку маршруту для мережі із 30 вузлами

Безперечно чим більша мережа, тим більша затримка на передавання даних від вузла-джерела до вузла-отримувача. Однак впровадження ефективного методу кластеризації із врахуванням Евклідової відстані і рівня сигнал /шум дозволяє зменшити цей час передавання фактично у 4 рази (рис. 3.23, 3.24).

### 3.3. Модель маршрутизації самоорганізованих mesh-мереж з використанням шлюзів

У наш час розвиток телекомунікаційних мереж відбувається у напрямку використання mesh-топології [107]. Можливість організації за допомогою mesh-топології локальних і міських мереж, що легко інтегруються в глобальні мережі, є привабливим фактором [108, 109]. Завдяки самоорганізованій архітектурі для mesh-мереж характерно наступне:

- стійкість мережі при виході з ладу певного вузла;
- оперативне масштабування;
- зв'язок вузлів «кожен з кожним».



В самоорганізованій мережі немає необхідності у використанні централізованого управління мережею, кожен вузол має обчислювальний процесор та мережевий інтерфейс і є рівноправним учасником комунікації.

Топологія мережі передбачає два варіанти передачі даних: прямий зв'язок між вузлом-джерелом і вузлом-отримувачем або транзитне передавання даних між ними. Підєднавшись до mesh-мережі, вузол отримує дані про такі характеристики комунікаційного каналу як потужність сигналу, пропускна здатність, затримка тощо. На основі цих даних відбувається формування оптимального маршруту.

Таким чином, кожен вузол створює актуальний список маршрутів. У випадку виходу з ладу певного вузла, решта вузлів здійснює оновлення таблиць маршрутизації для визначення найбільш актуального маршруту.

Якщо вузли знаходяться на значній відстані один від одного, то збільшується негативний вплив завад та інших факторів на процес передачі даних.

Пропускна здатність безпроводних каналів є вищою для вузлів, які знаходяться на невеликих відстанях. Таким чином, доцільно використовувати більшу кількість вузлів, відстань між якими є незначною, що не потребує високих значень потужності сигналу, і дозволить підвищити пропускну здатність каналів [111].

При наявності у mesh-мережі зростаючої кількості вузлів значення їх сумарної пропускну здатності також збільшується [112]. Проте це дійсно тільки при наявності невеликої кількості переходів ( «стрибків») при передачі інформації, в протилежному випадку – виникає необхідність у великій кількості прийомопередавачів, внаслідок чого така перевага анулюється.

В процесі функціонування mesh-мережі приховують від кінцевого користувача алгоритми пошуку оптимального маршруту передачі даних. Особлива увага приділяється пошуку маршрутів, які забезпечують надійність процесу передачі та обробку даних проміжним вузлом.

Для вибору маршруту використовуються різні метрики. Наприклад, числова метрика дозволяє визначити наскільки оптимальною є передача даних.

Високу ефективність забезпечує метрика з формуванням маршруту як

$$V = \{V_1, V_2, \dots, V_L\}, \quad (3.1)$$

де  $V$  – маршрут передачі даних;

$V_i$  – адреса вузла в мережі;

$L$  – кількість вузлів в маршруті.

Числова метрика  $M$  визначається як :

$$M = \alpha \frac{-L}{N} + \beta \sum_{i=1}^L \left( \begin{array}{l} 0, R_{V_i} < R \\ \frac{R_{V_i}}{R}, R_{V_i} \geq R \end{array} + \gamma \frac{\sum_{i=1}^L S_{V_i}}{S_{\max}} \right), \quad (3.2)$$

де  $\alpha, \beta, \gamma$  – вагові коефіцієнти;

$N$  – загальна кількість вузлів, які може « бачити » певний вузол мережі;

$R_{V_i}$  – оцінка продуктивності вузла  $V_i$ ;

$R$  – оцінка необхідного об'єму ресурсів для здійснення обробки повідомлення;

$S_{V_i}$  – швидкість прийому даних вузлом  $V_i$ ;

$S_{\max}$  – нормований коефіцієнт.

Коефіцієнти  $\alpha, \beta, \gamma$  використовуються для визначення необхідних характеристик маршруту. Їх значення підбираються емпірично, оскільки вони залежать від структури мережі, проте при їх підборі має виконуватись умова:  $\alpha + \beta + \gamma = 1$ .

Високе значення параметру  $\alpha$  забезпечує мінімальну кількість переходів між вузлами мережі, внаслідок чого зменшується величина затримки передачі даних на проміжних вузлах.

Збільшення значення коефіцієнта  $\beta$  забезпечує кращу обробку даних на вузлах мережі. Значення коефіцієнта  $\gamma$  характеризує швидкість передачі пакетів у мережі.

Розгортання низькошвидкісних безпроводних мереж не потребує попередньої підготовки, тому для них доцільно використовувати самоорганізацію, яка дозволяє здійснювати автоматичне підключення вузла до мережі, визначати оптимальні маршрути передачі даних, забезпечувати функціональність мережі при виході з ладу деяких вузлів.

Відповідно до стандарту IEEE 802.15.4, для вузла мережі характерно два типи адрес: 1– фізична, яка не змінюється та надається виробником; 2– логічна, яка отримується при підключенні до мережі.

Ідентифікація користувача здійснюється на основі фізичної адреси. Логічна адреса надається вузлом-координатором, при її використанні вузол є рівноправним учасником мережі.

При підключенні до мережі вузол виконує наступні дії:

1. Посилає запит на підключення до мережі з певним ідентифікатором мережі PANid (Personal Area Network Identifier).
2. Отримує відповіді на запит протягом інтервалу часу  $t_{відп}$ ;
3. Здійснює вибір найкращої відповіді, якщо така відсутня, то відбувається перехід до пункту 7.
4. Надсилає вузлу, від якого поступила найкраща відповідь, повідомлення про підключення.
5. Очікує протягом інтервалу часу  $t_{встан.час}$  для підтвердження від вибраного вузла. У випадку його відсутності відбувається перехід до пункту 7.
6. Здійснює завершення процедури підключення до мережі.
7. Очікує протягом  $t_{підключення}$ , перехід до пункту 1.

Вибір вузла може здійснюватись на основі багатьох факторів, таких як найменша довжина маршруту, найкраща якість зв'язку тощо.

Інший вузол мережі (той, який надіслав найкращу відповідь на запит) виконує наступні дії:

1. Формується логічна адреса.
2. Відбувається резервування логічної адреси.

3. Відправлення логічної адреси вузлу, який надсилав запит.
4. Очікування протягом  $t_{\text{відповідь}}$  повідомлення про підключення. Якщо таке повідомлення не поступило, то відбувається перехід до пункту 7.
5. Відправлення вузлу, який підключається, підтвердження.
6. Запам'ятовування факту підключення вузла.
7. Звільнення раніше зарезервованої логічної адреси.

### 3.3.1. Маршрутизація повідомлень в одношлюзових безпроводних самоорганізованих мережах деревоподібної топології

Один з методів маршрутизації в безпроводних самоорганізованих мережах деревоподібної топології дозволяє вузлу отримувати інформацію про місцезнаходження іншого вузла шляхом використання логічної адреси, яка відображає місце вузла в дереві.

Адреси будь-яких вузлів, один з яких є нащадком іншого, пов'язані наступним відношенням:

$$A_H = A_B m + j, j = \overline{1, m}, \quad (3.3)$$

де  $A_H$  – адреса нащадка;

$A_B$  – адреса «батька»;

$m$  – максимальна кількість нащадків, які може мати один вузол;

$j$  – номер нащадка в межах простору адреси його «батька».

Вузол-координатор має адресу 0, він може функціонувати зразу після підключення до мережі, проте іншим вузлам потрібна логічна адреса. Відправляти відповідь на запити таких вузлів можуть вузли, які мають вільні адреси для нащадків, тобто в яких кількість підключених нащадків ще не становить  $m$ . Адреса підключеного вузла визначається як :

$$A_p = \text{int} \left( \frac{A-1}{m} \right), \quad (3.4)$$

де  $\text{int}$  – ціла частина числа.

Маршрут від вузла з адресою  $A_{SRC}$  до вузла з адресою  $A_{DEST}$  містить вхідну та вихідну ланки (рис. 3.27).

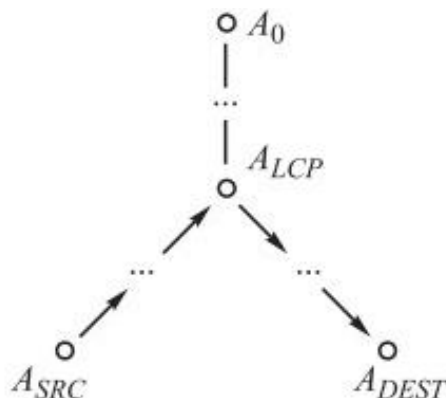


Рис.3.27. Структура маршруту передачі даних

Як бачимо з рис. 3.27, вузли з адресами  $A_{SRC}$  і  $A_{DEST}$  перетинаються у вузлі з адресою  $A_{LCP}$ , який є «батьком» для вузла-джерела і вузла-отримувача. В якості такого вузла може бути і координатор мережі – вузол з адресою  $A_0$ , в його пам'яті має зберігатись фізична та логічна адреса, ідентифікатор мережі, модуль мережі, кількість підключених нащадків.

### 3.4.2. Багатошлюзова безпроводна самоорганізована мережа

Для обміну інформацією з навколишнім світом в БСМ використовується шлюз, що має канал зв'язку із зовнішніми мережами.

Через шлюз відбувається передача інформації, яка поступила від вузлів безпроводної мережі.

Застосування декількох шлюзів підвищує надійність мережі, зменшує обсяги інформаційних потоків через маршрутизатори, розширює площу для надання послуг.

В одношлюзових безпроводних самоорганізованих мережах вузол-координатор виконує функції шлюзу (рис. 3.28).

Сукупність вузлів, які обслуговує один шлюз, утворює кластер.

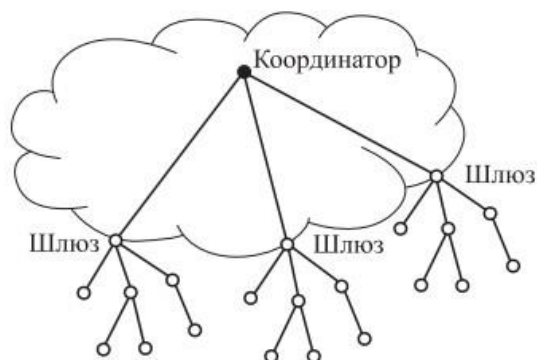


Рис. 3.28. Топологія багатошлюзової мережі

Удосконалена модель маршрутизації полягає у схемі перепризначення вузлам логічних адрес і способі визначення наступного вузла в маршруті передачі повідомлення.

*Призначення логічних адрес.* Вузли отримують логічні адреси у відповідності щодо положення вузла в дереві.

Нехай  $K$  – максимальна кількість вузлів одного кластеру (з врахуванням шлюзу). Координатору присвоюється логічна адреса 0. Шлюзи запитують власну логічну адресу за допомогою мережі Інтернет.

Координатор здійснює призначення логічних адрес шлюзам від 1 з кроком  $K$ :

$$A_{ш_i} = Ki + 1, \quad (3.5)$$

де  $A_{ш_i}$  – адрес шлюзу з номером  $i$ .

Шлюз  $A_{ш_i}$  після отримання адреси здійснює формування кластеру. Адреси вузлів знаходяться в діапазоні від  $A_{ш_i} + 1$  до  $A_{ш_i} + K - 1$ .

Адрес  $A_i^j$  будь-якого вузла в кластері з номером  $i$  визначається як:

$$A_i^j = A_{ш_i} + j, \quad j = \overline{0, K-1}, \quad (3.6)$$

де перший доданок визначається номером кластера, другий – порядковим номером вузла в кластері.

Якщо вузол з адресою  $A_i^j$  певного кластера з номером  $i$  є прямим нащадком вузла з адресою  $A_{ш_i}$  того ж кластера, то між цими адресами існує наступний зв'язок:

$$A_i^j = A_{ш_i} + (A_{н_i} - A_{ш_i})m + j, j = \overline{1, m}. \quad (3.7)$$

При цьому є умова обмеження – логічні адреси не повинні виходити за межі кластеру:

$$A_i^j < A_{ш_i} + K. \quad (3.8)$$

Для покращення обчислювальної ефективності значення  $K$  вибиратиметься так, щоб воно було степенем числа 2:

$$K = 2^k, \quad (3.9)$$

де  $k$  – ціле число.

При зверненні вузла для отримання логічної адреси, шлюз або інший підключений до мережі вузол кластера, формує адресу, використовуючи (3.6) та враховуючи обмеження (3.8).

Номер кластера визначається на основі логічної адреси вузла:

$$i = \text{int} \left( \frac{A-1}{K} \right), A > 0. \quad (3.10)$$

Адреса батьківського вузла з адресою  $A$  з кластера з номером  $i$  визначається:

$$A_p = \text{int} \left( \frac{A - Ki - 1}{m} \right) + Ki + 1, Ki + 1 < A < K(i + 1) + 1, \quad (3.11)$$

або 0, якщо вузол є одним з шлюзів :  $A_p = 0, A = Ki + 1$ .

Для процесу маршрутизації в безпроводній мережі самоорганізація полягає в автоматичній побудові маршрутів на основі інформації про фактичну наявність зв'язків між вузлами. Внаслідок програмного чи апаратного збою відбувається втрата логічної адреси вузла. Ще однією причиною цього може бути відсутність зв'язку з мережею протягом певного часу.

Розглянуті випадки призводять до фактичної втрати зв'язку з мережею, внаслідок чого виникає необхідність у новому підключенні. При виникненні такого збою вузол-координатор здійснює відправлення службових повідомлень [113]. Після цього шлюзи виконують ретрансляцію широкомовного службового повідомлення. При отриманні такого повідомлення від батьківського вузла,

вузол надсилає його всім своїм нащадкам з певним інтервалом. Якщо вузол не отримав повідомлення від батьківського вузла, то потрібно здійснити є повторне підключення до мережі.

Після реконфігурації мережа зазнає наступних змін: логічні адреси вузлів змінюються, вузли можуть обирати інші батьківські вузли, при цьому певні маршрути будуть неактуальними, проте формуються нові маршрути, внаслідок чого зв'язність мережі зберігається.

### **3.4. Оцінка доцільності впровадження пропонованої моделі маршрутизації та її вплив на параметри QoS**

Одним з перспективних напрямків розвитку телекомунікаційних систем є мобільні безпроводні епізодичні мережі. Основною функцією таких мереж є забезпечення зв'язності мережі.

При використанні додатків, які функціонують в режимі реального часу (наприклад, відео), швидке відновлення маршрутів є критично важливим з точки зору зв'язності [114]. Термін «зв'язність» епізодичної мережі означає можливість адаптації до змін в її структурі, виконання заданих функцій протягом певного часу, незважаючи на різні фактори. Забезпечення зв'язності є важливою складовою алгоритму маршрутизації епізодичної мережі.

SAM – це самоадаптований алгоритм маршрутизації, для якого характерними є:

- створення маршруту здійснюється без використання адрес проміжних вузлів;
- для забезпечення зв'язності використовується метод локального відновлення маршруту;
- розподіл навантаження відбувається на основі рішення вузла про участь в маршруті.

Самоадаптований алгоритм маршрутизації здійснює пошук оптимального маршрута між двома користувачами епізодичної мережі. Цей алгоритм не створює таблиці маршрутизації, вузли не мають інформації про



місцезнаходження інших вузлів в мережі. В момент, коли потрібно встановити зв'язок, відбувається розсилання пакетів у всіх напрямках: від кожної точки до всіх сусідніх точок, при цьому використовуються наступні поля пакетів:

- унікальний ідентифікатор з'єднання, використання якого дозволяє позбавлятися від копій пакетів;
- метрика прямого маршруту, яка дозволяє здійснити вибір маршруту для викликаючого вузла;
- метрика зворотнього маршруту, яка дозволяє проміжному вузлу приймати рішення щодо ретрансляції пакета;
- час життя пакета, значення якого використовується для відкидання пакетів, що «заблукали»;
- номер пакета – для визначення копій пакетів та зворотніх пакетів від вузла призначення до вузла-джерела.

Зміна поля пакету відбувається при проходженні через кожен вузол маршруту. Після поступлення пакету до вузла призначення відбувається порівняння значень поля пакетів «метрика прямого маршруту», які прийшли різними маршрутами, на основі цього вибирається маршрут з найменшим значенням такого поля. Відповідно це і буде оптимальний маршрут для передачі даних.

Проміжні вузли визначають свою приналежність до вибраного маршруту на основі «метрики зворотнього маршруту». Пошук маршруту та передача даних відбувається одночасно, внаслідок чого зменшується тривалість передачі даних користувача. В цьому методі немає необхідності в адмініструванні мережі та наявності мережевої інфраструктури, оскільки така мережа має здатність до самоорганізації. Побудова «виживаючої» мережі може відбуватись як традиційними, так і нетрадиційними способами. При нетрадиційному способі використовується техніка «локального відновлення маршруту» для відновлення зв'язків в мережі. При цьому область відновлення є областю, де повинен розміщуватись ретранслятор (рис. 3.29).

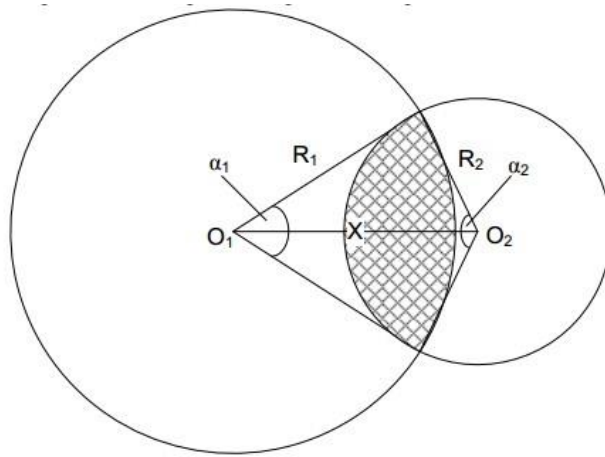


Рис. 3.29. Область можливої ретрансляції

На рис. 3.29 точками  $O_1$  та  $O_2$  позначено місцезнаходження вузлів 1 та 2,  $R$  – радіус дії зони кожного з них. Заштрихована зона являє собою можливе місцезнаходження проміжного вузла, який буде ретранслювати дані між вузлами  $O_1$  та  $O_2$ .

Площу даної області можна визначити як:

$$S = S_1 + S_2 - S_{\Delta}, \quad (3.12)$$

де  $S_1$  – площа сектора з кутом  $\alpha_1$ ;

$S_2$  – площа сектора з кутом  $\alpha_2$ ,

$S_{\Delta}$  – площа трикутника зі сторонами  $R_1, R_2, X$ .

Кути  $\alpha_1$  і  $\alpha_2$  також залежні від значення  $X$  і розраховуються як:

$$\alpha_1 = \arccos\left(\frac{(R_1^2 + X^2 - R_2^2)^2}{2R_1^2 X^2} - 1\right), \quad (3.13)$$

$$\alpha_2 = \arccos\left(\frac{(R_2^2 + X^2 - R_1^2)^2}{2R_2^2 X^2} - 1\right). \quad (3.14)$$

Отже, площа зони ретрансляції визначається як :

$$S = \frac{\pi}{360} \left( R_1^2 \arccos\left(\frac{(R_1^2 + X^2 - R_2^2)^2}{2R_1^2 X^2} - 1\right) + R_2^2 \arccos\left(\frac{(R_2^2 + X^2 - R_1^2)^2}{2R_2^2 X^2} - 1\right) \right) - \frac{1}{2} \sqrt{(X + R_1 + R_2)(X + R_1 - R_2)(X + R_2 - R_1)(R_1 + R_2 - X)}. \quad (3.15)$$

Відстань між вузлами обмежена наступною нерівністю:

$$R_{\min} < X < R_1 + R_2, \quad (3.16)$$

де  $R_{\min}$  – це найменше значення з двох радіусів  $R_1$  та  $R_2$ .

При  $X = R_1 + R_2$  площа прямує до нуля. При  $X \leq R$  існує пряма зв'язність між вузлами 1 та 2, внаслідок чого немає необхідності у використанні вузла ретрансляції. При  $X > R$  для забезпечення зв'язності між вузлами 1 та 2 необхідно використати ретранслятор.

Площа області можливої ретрансляції обмежена нерівністю:

$$0 \leq S \leq R^2 \frac{8\pi - 3\sqrt{3}}{12}. \quad (3.17)$$

Область відновлення маршруту дозволяє здійснювати відновлення маршруту, не використовуючи розсилання додаткових пакетів для створення маршруту.

У роботі здійснено моделювання мобільної безпроводної епізодичної мережі, яка складається з 10 вузлів, у середовищі OPNET Modeler 14.0. Площа досліджуваної території – 1,6 км<sup>2</sup>. Сценарій моделювання включає передачу голосових повідомлень між вузлами через ретранслятори, які переміщуються зі швидкістю 10-15 м/с, що призводить до руйнування маршруту.

У результаті проведеного моделювання отримано діаграми загальної пропускної здатності, затримки та навантаження на мережу (рис. 3.30 – 3.32) та графіки кількості переданих і отриманих пакетів (рис.3.33, 3.34).

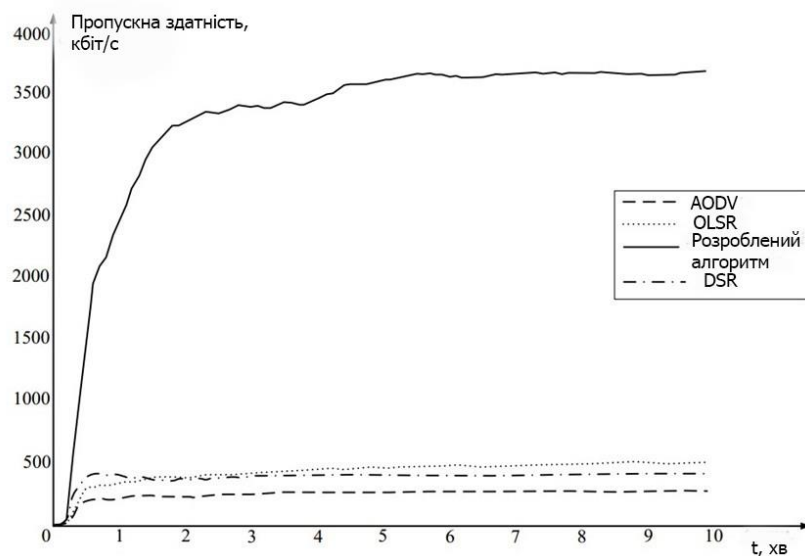


Рис. 3.30. Загальна пропускна здатність мережі

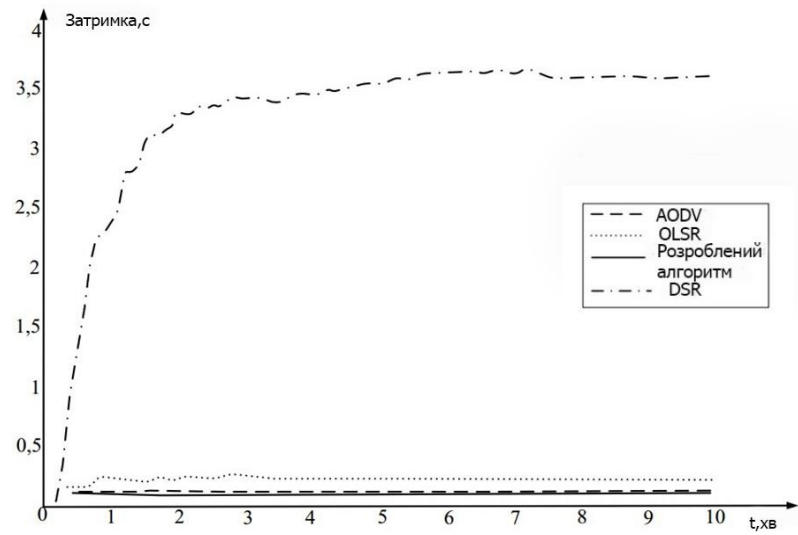


Рис. 3.31. Середня затримка при передачі голосових даних

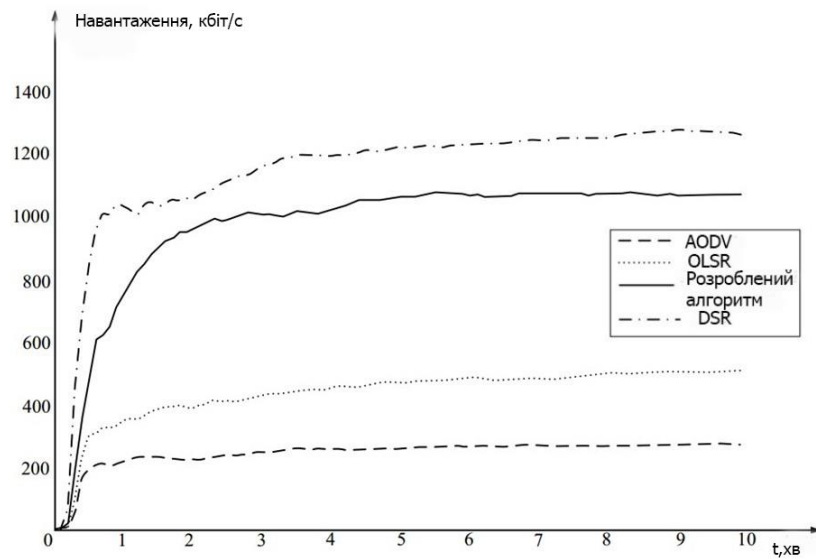


Рис. 3.32. Середнє навантаження на мережу

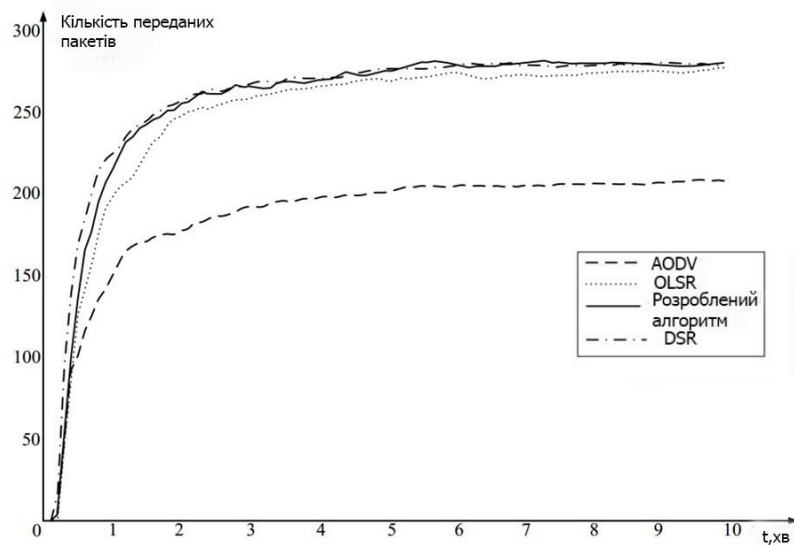


Рис. 3.33. Кількість переданих пакетів при передачі голосових даних

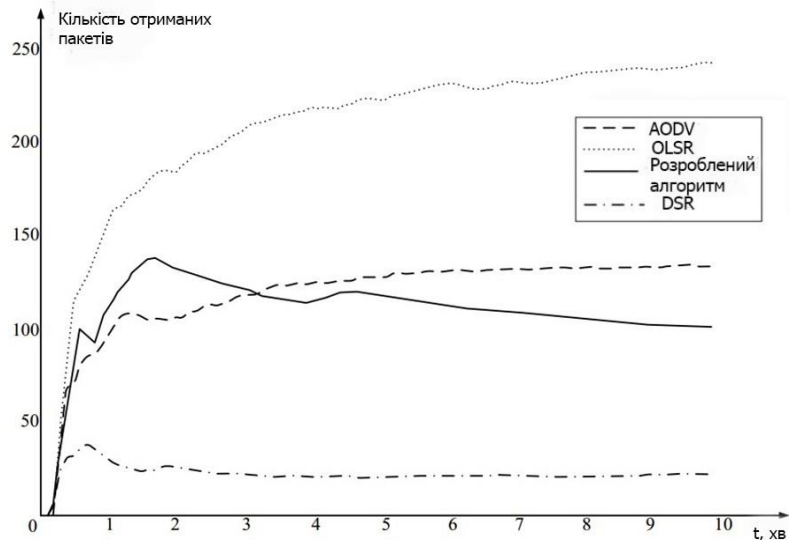


Рис. 3.34. Кількість отриманих пакетів при передачі голосових даних

Відповідно до представлених результатів моделювання, затримка при передачі 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 пропускну здатності каналів з 500 кбіт/с до 3500 кбіт/с.

Незначне збільшення навантаження на мережу в порівнянні з іншими розглянутими протоколами маршрутизації не призводить до серйозних затримок при передачі голосових даних, проте зменшує кількість втрат пакетів. Результати проведеного дослідження дозволяють визначити додаткові вимоги до протоколів маршрутизації та ефективніше використовувати безпроводні мобільні епізодичні мережі для передачі голосових даних.

Отже, удосконалена модель зони перекриття кластерів у самоорганізованих мережах на основі схеми перепризначення логічних адрес мережним вузлам, які функціонують у цих кластерах, дає змогу забезпечити необхідний рівень якості обслуговування у разі програмних чи апаратних збоїв.

### 3.5. Висновки до 3-го розділу

1. Для оцінки ефективності методу локалізації вузлів самоорганізованої мережі, який базується на алгоритмічному підході Терстона з використанням

діаграми потужності Вороного з правильними взаємозв'язками суміжності, використано імітаційну модель мережі із жадібною маршрутизацією. В результаті роботи моделі отримано залежність, аналіз якої свідчить про максимізацію відношення коефіцієнта еластичності, усередненого по всіх парах вершин та триангуляціям одного розміру, що дає змогу пришвидшити процес ініціалізації вузлів мережі та підвищити точність визначення віртуальних координат, покращуючи якість розв'язання завдань маршрутизації в евклідовому просторі. Після проведення моделювання із застосуванням удосконаленого методу локалізації вузлів отримано значення середнього коефіцієнту еластичності мережі на рівні 1,25, що дає змогу покращити процес збіжності мережі та надання сервісу кінцевому користувачу.

2. Для дослідження процесів передавання даних у безпроводних самоорганізованих мережах у роботі розроблено програмний симулятор, який дозволяє досліджувати поведінку самоорганізованих мереж в умовах високого рівня шуму та визначати умови, при яких тривалість пошуку маршруту та передавання даних у мережі будуть найкращими. На основі аналізу отриманих результатів можна стверджувати, що завдяки впровадженню методу локалізації вузлів та розробленого алгоритму кластеризації тривалість пошуку маршруту між довільно взятою парою вузлів зменшилась у 4,5 разів, що дає змогу зменшити час передачі повідомлень кінцевому користувачеві самоорганізованої безпроводної мережі.

3. У зв'язку із нерівномірністю надходження запитів на вузли мережі, низькою ефективністю використання ресурсів каналів зв'язку та високим рівнем бітових помилок, тривалість пошуку найкоротшого маршруту між довільною парою вузлів збільшується. Впровадження розробленого алгоритму кластеризації дозволить зменшити тривалість пошуку маршруту при такій же конфігурації мережі з 45 до 27,5 с, тобто у 1,6 разів. При масштабуванні мережі результати дослідження показали, що врахування Евклідової відстані і рівня сигнал / шум дозволяє зменшити час передавання фактично у 4 рази.

4. Удосконалено модель зони перекриття кластерів у самоорганізованих мережах із застосуванням схем перепризначення логічних адрес мережним вузлам, які функціонують у цих кластерах, що дає змогу забезпечувати необхідний рівень якості обслуговування у разі програмних чи апаратних збоїв.

На основі результатів моделювання видно, що затримка при передачі голосових даних зменшується на 5% у порівнянні з алгоритмами AODV та OLSR. Завдяки можливості локального відновлення маршруту при збільшенні швидкості пересування вузлів вдалося досягти зменшення часу зв'язності між вузлами та підвищити ефективність використання пропускнуої здатності каналів з 500 кбіт/с до 3500 кбіт/с.

## РОЗДІЛ 4.

### ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ МАРШРУТИЗАЦІЇ ІНФОРМАЦІЙНИХ ПОТОКІВ У САМООРГАНІЗОВАНИХ МЕРЕЖАХ

Завдання оптимізації маршруту передавання даних є суттєвою складовою сучасних самоорганізованих мереж. В останні роки інтенсивно розвивається науковий напрямок «Природні обчислення», в якому закладені принципи природних механізмів прийняття рішень [115, 116]. Генетичні алгоритми дозволяють здійснювати швидку генерацію розв'язків поставленої задачі, уникаючи повного перебору та значно зменшуючи часові витрати. У випадку використання традиційних методів оптимізації і пошуку рішення навіть незначна зміна параметрів середовища передавання даних призводить до необхідності повторного виконання всіх обчислень. Робота генетичних алгоритмів базується на природній еволюції і техніці “виживає найбільш пристосований”, при якій найкращі рішення виживають і змінюються до досягнення найкращого результату [117] – у нашому випадку, найоптимальнішого маршруту передавання даних. При зміні топології мережі, наприклад, через відмову вузла, у випадку використання класичних методів оптимізації необхідно розглядати мережу з новою топологією, у той час, як у випадку генетичного алгоритму деяка корисна інформація зберігається в пам'яті з минулого популяції (безлічі потенційних рішень) і її можна використовувати. Це дозволяє еволюційним методам маршрутизації адаптуватися до умов, що змінюються. Такий підхід дозволяє розробляти алгоритми маршрутизації, які продовжують працювати, навіть коли змінюється топологія мережі, внаслідок чого генетичні алгоритми можуть значно підвищити продуктивність функціонування самоорганізованих мереж [118].

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, особливо в умовах, коли таких маршрутів є декілька.



#### 4.1. Генетичний алгоритм маршрутизації потоків

Один з підходів забезпечення оптимізації маршруту передавання даних – використання генетичного алгоритму.

Генетичні алгоритми аналізують популяцію хромосом, які представляють комбінацію елементів з певної множини, і оптимізують цільову функцію, оцінюючи кожен хромосому.

Кожна хромосома представляє собою маршрут, який оцінюється за допомогою цільової функції (фітнес-функції), що представляє «вартість» даного маршруту. В якості такої функції пропонується використовувати параметр QoS – час доставки даних від вузла-джерела до вузла-отримувача (вузла-координатора).

На рис. 4.1 представлено блок-схему запропонованого генетичного алгоритму [1].

Запропонований модифікований генетичний алгоритм маршрутизації, при його впровадженні у самоорганізовані мережі, працює наступним чином:

1. Створюємо множину маршрутів між вузлом-координатором і вузлами мережі –  $T$  та множину усіх транзитних вузлів –  $R$ .

2, Для пошуку найкращого маршруту за даним алгоритмом з множини  $T$  вибираємо множину  $M$  ( $M$  є підмножиною множини  $T$ ).

Вибір множини  $M$  можна здійснювати за трьома критеріями, а для цього множину  $T$  розбиваємо на підмножини  $T_i$ , де кожна підмножина має однакову кількість транзитних вузлів:

- Вибираємо з множини  $T$  маршрути, які містять всі елементи  $R$ .
- Вибираємо з множини  $T$  маршрути, які містять всі елементи  $R$ , необхідною умовою при цьому, є те, щоб в утвореній множині  $M$  був хоча б один маршрут кожної підмножини  $T_i$ .

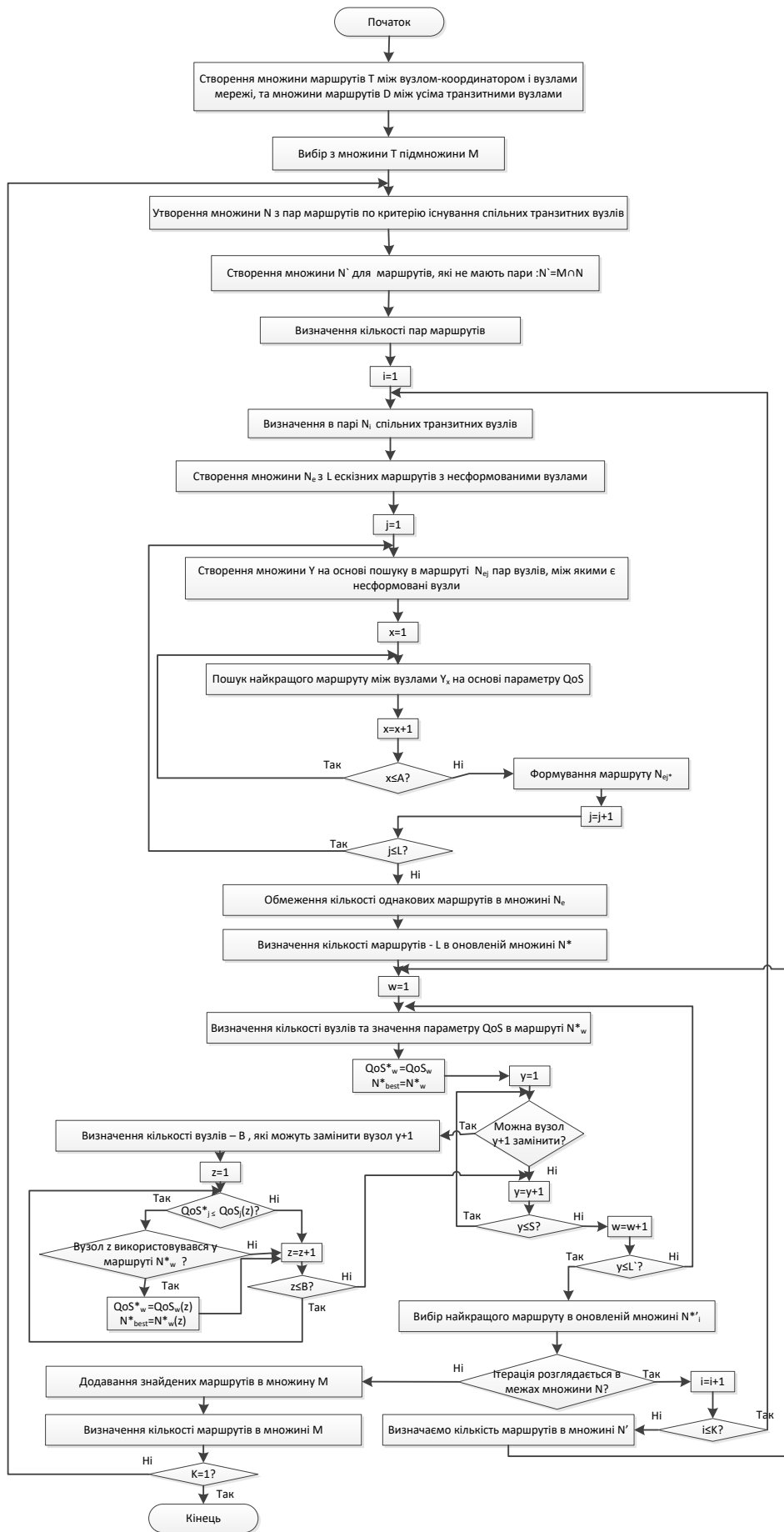


Рис. 4.1. Детальна блок-схема модифікованого генетичного алгоритму [1]

- З кожної підмножини  $T_i$  вибираємо маршрути, які містять всі елементи  $R$ , що присутні в підмножині  $T_i$ , причому кількість маршрутів з  $T_i$  має бути не менше двох.

3. З множини  $M$  утворюємо пари маршрутів по критерію існування спільних транзитних вузлів, внаслідок чого утворюється множина  $N$  - множина вибраних пар маршрутів. Для таких маршрутів має бути спільним як мінімум один транзитний вузол.

4. Створюємо множину  $N'$  для маршрутів, які не мають пари:  $N' = M \cap N$ .

5. Визначаємо кількість пар маршрутів –  $K$ .

6. Приймаємо, що  $i = 1$ , де  $i$  – пара маршрутів.

7. Визначаємо для певної пари  $N_i$  спільні транзитні вузли.

8. Створюємо множину  $N_e$  з  $L$  ескізними маршрутами з несформованими вузлами.

Для прикладу розглянемо два маршрути  $A$  і  $B$ , які мають однаковий вузол - джерело і вузол - отримувач. На основі цієї пари маршрутів утворюються ескізні маршрути:

- А1-маршрут на основі маршруту  $A$ , де спільні транзитні вузли замінюються несформованими вузлами, а інші транзитні вузли залишаються без змін.
- А2-маршрут на основі маршруту  $A$ , де спільні транзитні вузли залишаються без змін, а інші замінюються несформованими вузлами.
- В1-маршрут на основі маршруту  $B$ , де спільні транзитні вузли замінюються несформованими вузлами, а інші транзитні вузли залишаються без змін.
- В2-маршрут на основі маршруту  $B$ , де спільні транзитні вузли залишаються без змін, а інші замінюються несформованими вузлами.

Під ескізним маршрутом розуміється маршрут, в якому наявні несформовані вузли.

Під несформованими вузлами розуміються вузли, які можна замінити для оптимізації маршруту.

9. Приймаємо  $j = 1$ , де  $j$  – ескізний маршрут.

10. Здійснюємо пошук в маршруті  $N_{ej}$  пари вузлів, між якими є несформовані вузли, внаслідок чого утворюється множина  $Y$  (множина вузлів, між якими є несформовані вузли) з кількістю пар вузлів  $A$ .

11. Приймаємо  $x = 1$ , де  $x$  – номер пари в ескізному маршруті.

12. Здійснюємо пошук найкращого маршруту між вузлами  $Y_x$  з множини  $D$  на основі значення QoS.

13. Приймаємо  $x = x + 1$ .

14. Перевіряємо чи  $x \leq A$ .

14.1. Якщо умова виконується, то переходимо до пункту 12.

14.2. Якщо умова не виконується, то переходимо до пункту 15.

15. Визначення маршруту  $N_{ej}^*$  - маршрут, який утворений на основі ескізного маршруту  $N_{ej}$ .

16. Приймаємо  $j = j + 1$ .

17. Перевіряємо чи  $j \leq L$ .

17.1. Якщо так, то переходимо до пункту 10.

17.2. Якщо ні, то переходимо до наступного пункту.

18. Здійснюємо пошук однакових маршрутів в множині  $N_e^*$  - множина маршрутів  $N_{ej}^*$ . При наявності двох або більше однакових маршрутів зменшуємо їх кількість до одного. Після чого визначаємо кількість маршрутів -  $L'$  в множині  $N^*$ , яка є оновленою внаслідок видалення однакових маршрутів.

19. Приймаємо  $w = 1$ , де  $w$  – номер маршруту в  $N^*$ .

20. Визначаємо кількість всіх вузлів у маршруті  $N_j^*$  -  $S$  і параметру  $QoS_j$  для маршруту  $N_j^*$ .

21. Приймаємо, що  $QoS_j^* = QoS_j$ , де  $QoS_j^*$  – найкраще значення QoS маршруту  $N_{best}^*$  після проведеної певної кількості ітерації за даним алгоритмом,  $N_{best}^* = N_j^*$ , де  $N_{best}^*$  – маршрут з найкращим значенням QoS.

22. Приймаємо, що  $y = 1$ , де  $y$  – вузол маршруту  $N^*w$

23. Перевіряємо чи можна замінити вузол  $y + 1$ .

23.1. Якщо так, то переходимо до пункту 24.

23.2. Якщо ні, то переходимо до пункту 31.

24. Вводимо множину  $E$  – множина вузлів, які можуть замінити вузол  $y + 1$ , з кількістю  $B$ .

25. Приймаємо  $z = 1$ , де  $z$  – елемент з множини  $E$ .

26. Перевіряємо чи виконується умова  $QoS_j^* \leq QoS_j(z)$ .

26.1. Якщо так, то переходимо до пункту 27.

26.2. Якщо ні, то переходимо до пункту 29.

27. Перевіряємо чи вузол  $z$  використовувався у маршруті  $N_j^*$ .

27.1. Якщо так, то переходимо до пункту 28.

27.2. Якщо ні, то переходимо до пункту 29.

28. Приймаємо, що  $QoS_j^* = QoS_j(z)$ ,  $N_{best}^* = N_j^*(z)$ , де  $N_j^*(z)$  –

29. Приймаємо, що  $z = z + 1$ .

30. Перевіряємо чи виконується умова  $z \leq B$ .

30.1. Якщо так, то переходимо до пункту 26.

30.2. Якщо ні, то переходимо до пункту 31.

31. Приймаємо, що  $y = y + 1$ .

32. Перевіряємо чи  $y \leq S$ .

32.1. Якщо так, то переходимо до пункту 23.

32.2. Якщо ні, то переходимо до пункту 33.

33. Приймаємо  $j = j + 1$ .

34. Перевіряємо чи  $y \leq L'$ .

34.1. Якщо так, то переходимо до пункту 35.

- 34.2. Якщо ні, то переходимо до пункту 20.
35. Вибираємо найкращий маршрут в оновленій множині  $N_i^{**}$  - множина маршрутів після мутації
36. Перевіряємо чи ітерація розглядається в межах множини  $N$ . ( ітерація-повтор попередніх етапів алгоритму)
  - 36.1. Якщо так, то переходимо до пункту 37.
  - 36.2. Якщо ні, то переходимо до пункту 41.
37. Приймаємо  $i = i + 1$ .
38. Перевіряємо чи виконується умова  $i \leq K$ .
  - 38.1. Якщо так, то переходимо до пункту 7.
  - 38.2. Якщо ні, то переходимо до пункту 39.
39. Визначаємо кількість маршрутів -  $L'$  в множині  $N'$ .
40. Приймаємо  $j = 1$  і  $u = 1$  і переходимо до пункту 20.
41. Об'єднуємо всі знайдені маршрути в множину  $M$ .
42. Визначаємо кількість маршрутів –  $F$  в множині  $M$ .
43. Перевіряємо чи  $K = 1$ .
  - 43.1. Якщо ні, то переходимо до пункту 3.
  - 43.2. Якщо так, то алгоритм завершує роботу.

#### **4.2. Маршрутизація інформаційних потоків з використанням мурашкового алгоритму**

Ідея мурашкового алгоритму базується на моделюванні поведінки колонії мурах, які здійснюють пошук шляху (маршруту) від мурашника до їжі за допомогою хімічної регуляції. Важливою властивістю мурашкових алгоритмів з точки зору завдання маршрутизації є їх адаптивність – якщо певний маршрут стає недоступним, то система здатна швидко знаходити відповідну заміну. Таким чином, такий алгоритм можна використовувати для знаходження найкоротшого маршруту між вузлом-джерелом і вузлом-отримувачем при

наявності різних неоднорідностей мережі, перевантажень вузлів тощо. Розглянемо детальніше цей процес.

Мураха здійснює вибір маршруту на основі довжини шляху  $l_i$ ,  $i = \overline{1, n}$ , де  $n$  - кількість маршрутів з поточного вузла-джерела, які залежать від кількості феромон, що залишаються на  $i$ - му маршруті іншими мурахами. При досягненні вузла призначення мураха позначає маршрут свого руху феромонами, добавляючи певну прибавку на його кожній ділянці:  $\Delta\tau = \frac{Q}{L}$ , де  $Q$  - параметр, значення якого вибирається того ж порядку, що і довжина оптимального шляху,  $L$  - довжина пройденого шляху. При цьому на інших маршрутах здійснюється випаровування феромону:  $\tau_i(t) = \gamma_i(t-1) + \Delta\tau$ , де  $t$  - дискретний час (номер ітерації),  $\gamma \in [0;1]$  - параметр, значення якого впливає на швидкість випаровування феромона (коефіцієнт оновлення): при  $\gamma = 0$  відбувається повне його випаровування, при  $\gamma = 1$  - зберігається його значення. Очевидно, що маршрути, які найчастіше використовуються, тобто найоптимальніші, зокрема розглядаємо найкоротші, містять найбільшу кількість феромонів.

Таким чином, для кожної мурахи визначається ймовірність переходу між вузлами, що з'єднує ребро  $i$ :

$$p_i = \frac{(\tau_i)^\alpha (\eta_i)^\beta}{\sum_{j=1}^n (\tau_j)^\alpha (\eta_j)^\beta}, \quad (4.1)$$

де  $\eta_i$  - привабливість ребра  $i$ ;

$\alpha$  - параметр, який контролює вплив  $\tau_i$ ;

$\beta$  - параметр, який контролює вплив  $\eta$ .

На основі вищесказаного запропоновано модифікований мурашковий алгоритм, блок-схема якого представлена на рис.4.2 [7, 1].

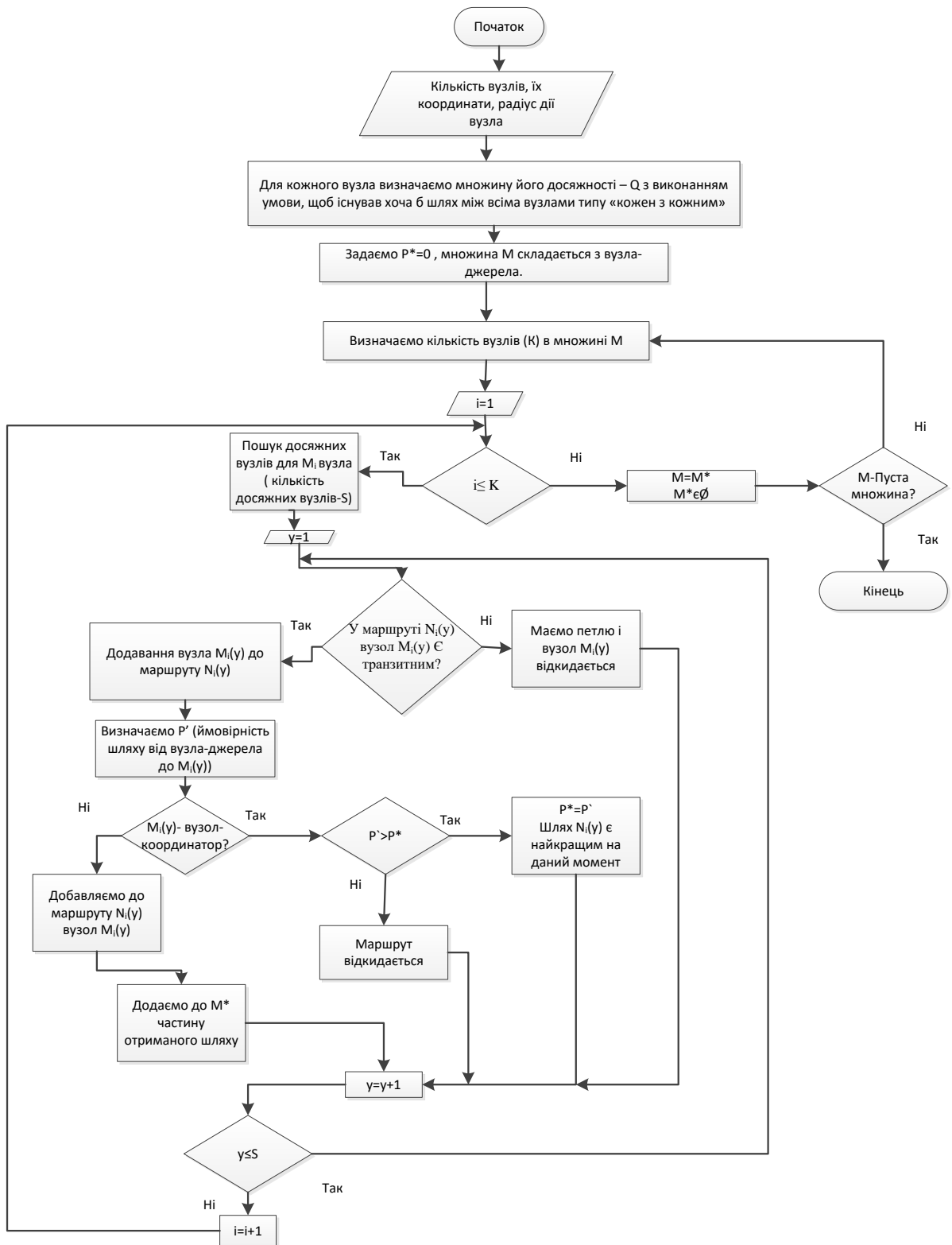


Рис. 4.2. Детальна блок-схема модифікованого мурашкового алгоритму [1]

Відповідно до вищепредставленої блок-схеми, робота модифікованого мурашкового алгоритму полягає в наступному:

Приймаємо, що імовірність переходу найкращого маршруту від вузла-джерела ( $i$ ) до вузла-координатора ( $j$ )  $\in P^* = 0$ . Враховуючи те, що маршрут на



цьому етапі алгоритму є невідомий, то  $P^* = 0$ , очевидно, що для будь-якого існуючого маршруту імовірність переходу більше 0.

Вводимо множину  $M$  і  $N$ , які на даному етапі містять лише вузол-джерело. В подальшому множина  $M$  складається з транзитних вузлів,  $N$  – з маршрутів від вузла-джерела до вузлів множини  $M$ .

Також вводимо допоміжні множини  $M^*$  і  $N^*$  для  $N$ , відповідно, які на даному етапі є  $\emptyset$ .

3) Визначаємо кількість вузлів  $K$  в множині  $M$ .

4) Приймаємо  $i = 1$ , де  $i$  – елемент множини  $M$ .

5) Задаємо умову  $i \leq K$ .

5.1) Якщо дана умова виконується, то визначається кількість вузлів в множині досяжності для  $M_i$  вузла ( $S$ ).

5.1.1) Приймаємо  $y = 1$ , де  $y$  – елемент множини досяжності  $Q_i(y)$ .

5.1.2) Перевіряємо чи на маршруті  $N_i(y)$  вузол  $M_i(y)$  є транзитним.

Якщо даний вузол транзитний, то додаємо його до маршруту  $N_i(y)$ .  
Переходимо до наступного пункту.

В протилежному випадку виникне петля внаслідок того, що:

- вузол  $M_i(y)$  немає досяжних вузлів для подальшого встановлення маршруту. Тому цей вузол не використовується для маршруту  $N_i(y)$ .

- наступним транзитним вузлом не може бути вузол, який використовувався у маршруті раніше. Переходимо до пункту 5.1.5.

5.1.3) Визначаємо ймовірність вибору шляху  $P^{\wedge}$  від вузла-джерела до  $M_i(y)$ .

5.1.4) Перевіряємо чи  $M_i(y)$  вузол – координатор.

Якщо так, то виконується порівняння  $P^{\wedge}$  і  $P^*$ .

У випадку, коли  $P^{\wedge} > P^*$ , значення  $P^{\wedge}$  присвоюється  $P^*$ . Таким чином маршрут  $N_i(y)$  є найкращим на даний момент.

У протилежному випадку маршрут відкидається.

Якщо  $M_i(y)$  не є вузлом - координатором, то вузол  $M_i(y)$  добавляється до маршруту  $N_i(y)$ .

5.1.5) Збільшуємо кількість досяжних вузлів наступним чином:  $y = y + 1$ .

5.1.6) Перевіряємо чи виконується умова  $y \leq S$ .

Якщо виконується, то переходимо до пункту 5.1.1.

В протилежному випадку збільшуємо кількість вузлів-джерел наступним чином:  $i = i + 1$ , після чого переходимо до пункту 4.

5.2) Якщо умова 5) не виконується, то приймаємо  $M = M^*$ , а  $M^* \in \emptyset$ .

5.2.1) Якщо в множині  $M$  є елементи, то повертаємось до пункту 3.

5.2.2) При  $M^* \in \emptyset$  робота алгоритму закінчується.

### **4.3. Оптимізація маршрутів передавання даних на основі методу імітації відпалу**

З розвитком комп'ютерних технологій класичні методи вирішення завдань маршрутизації почали поступатися метаевристичним. Одним з методів, що дозволяє знайти оптимальні рішення, є метод імітації відпалу. Даний метод знаходить глобальний екстремум деякої функції на основі впорядкованого випадкового пошуку.

Метод імітації відпалу використовується для розв'язання задач глобальної оптимізації. За допомогою моделювання такого процесу шукається точка або множина точок, на яких досягається мінімум певної числової функції.

Метод імітації відпалу будує послідовність маршрутів оптимізаційної задачі, починаючи з початкового маршруту  $x_0$  на  $t$ -ій ітерації (ітерації нумеруються з нуля), переходячи від маршруту  $x_t$  до  $x_{t+1}$ .

На кожній з ітерацій згідно з [119] метод діє таким чином.

Спочатку для маршруту  $x_t$  формується так звана околиця  $N(x_t)$  – дискретна випадкова величина, що задає безліч "сусідніх" до  $x_t$  маршрутів і для

кожного з них ймовірність його вибору. На основі ймовірностей вибору з околиці вибирається маршрут  $x_{new}$ . Прийнемо, що  $f(x)$  – вартість маршруту  $x$ . Якщо  $f(x_{new}) < f(x_t)$ , то в якості  $x_{t+1}$  вибирається маршрут  $x_{new}$ . Інакше  $x_{t+1}$  задається за правилом:

$$x_{t+1} = \begin{cases} x_{new}, & p_t, \\ x_t, & 1 - p_t, \end{cases} \quad (4.2)$$

де  $p_t$  – ймовірність переходу до гіршого рішення на  $t$ -ій ітерації. Побудова послідовності маршрутів завершується після виконання  $T$  ітерацій. Вимогою до функції ймовірності  $p_t$  є її позитивність при  $f(x_{new}) \geq f(x_t)$  (інакше метод зупиниться в першому локальному мінімумі). Зазвичай вибирається функція  $p_t$ , спадна зі зростанням  $f(x_{new}) - f(x_t)$  із збільшенням  $t$  (4.3). В роботі використовується функція

$$p_t = \exp(f(x_t) - f(x_{new})) / \theta_t \quad (4.3)$$

де послідовність  $\theta_t$  зменшується із збільшенням  $t$ . З усіх побудованих маршрутів вибирається з найменшою вартістю, який є результатом роботи алгоритму імітації відпалу.

Розглянемо запропонований алгоритм імітації відпалу для покращення маршрутизації інформаційних потоків у мережах (рис.4.3) [1].

1. Визначаємо множину всіх можливих маршрутів між вузлом – координатором та іншими вузлами мережі, на основі чого створюємо множину транзитних вузлів –  $R$  між вузлом-координатором та іншими вузлами.

2. Задаємо  $M$  – множину маршрутів, яка містить  $K$  маршрутів з використанням всіх елементів  $R$ .

3. Присвоюємо  $i = 1$ , де  $i$  – певний маршрут з множини  $M$ .

4. Перевіряємо чи виконується умова  $i \leq K$ .

4.1. Якщо ця умова виконується, то відбувається визначення кількості всіх вузлів -  $S$  для  $M_i$  та параметру  $QoS_i$  для маршруту  $M_i$ .

4.1.1. Приймаємо, що  $QoS_i^* = QoS_i$ , де  $QoS_i^*$  - найкраще значення параметру певного маршруту після проведеної кількості ітерації за даним алгоритмом,  $QoS_i$  – значення QoS для  $i$ -го маршруту;  $M^* = M_i$ , де  $M^*$  - маршрут з параметром  $QoS_i^*$ .

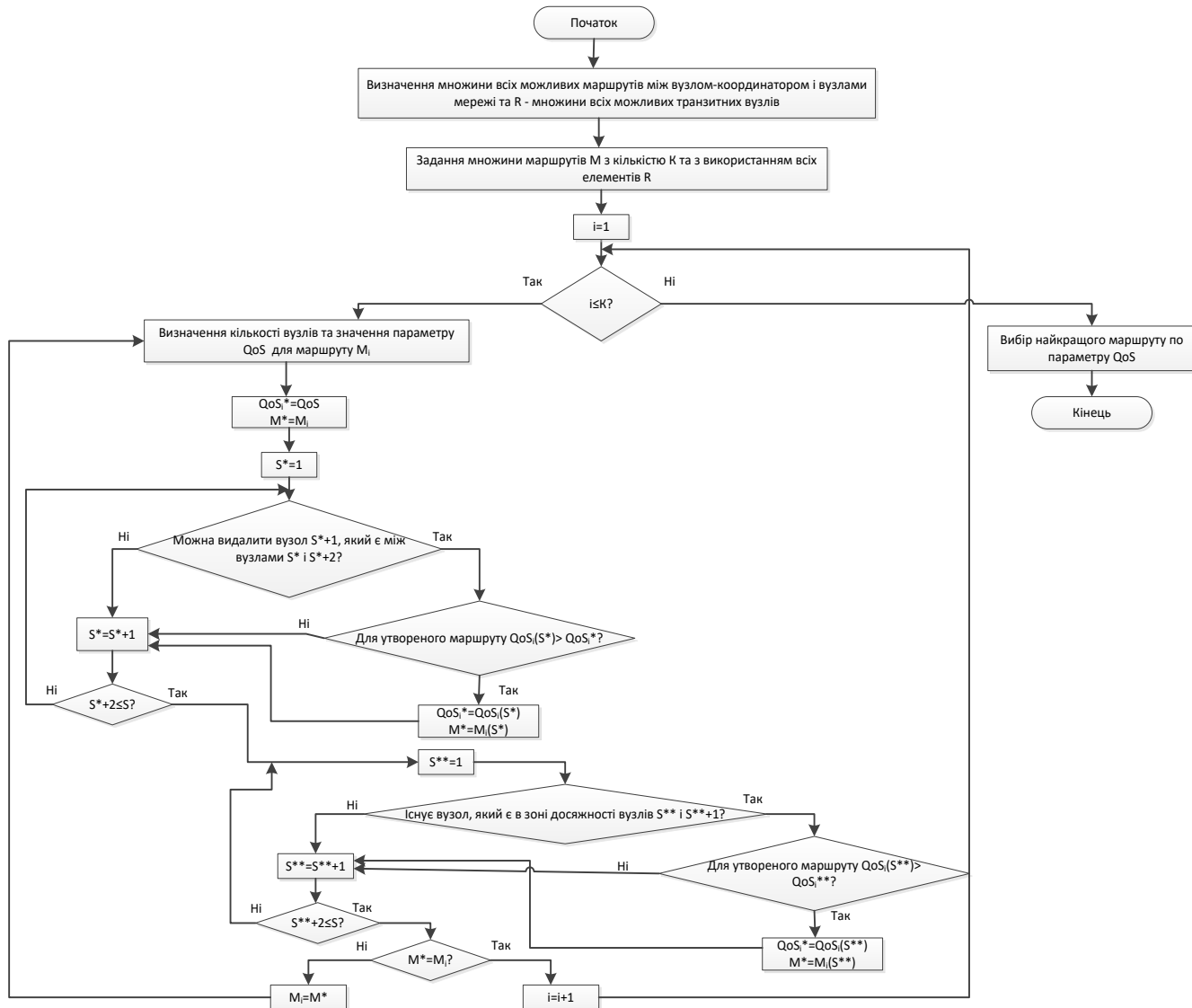


Рис. 4.3. Узагальнена блок-схема пропонованого алгоритму імітації відпау [1]

4.1.2. Приймаємо  $S^* = 1$ , де  $S^*$  – номер вузла з маршруту  $M_i$  для пошуку можливості оптимізації маршруту шляхом видалення вузла.

4.1.3. Перевіряємо чи можна видалити вузол  $S^* + 1$ , який знаходиться між вузлами  $S^*$  і  $S^* + 2$ .

- Якщо так, то перевіряємо чи для утвореного маршруту  $QoS_i(S^*) \succ QoS_i^*$ , де  $QoS_i(S^*)$  – параметр QoS для маршруту  $M_i(S^*)$ ,  $M_i(S^*)$  – маршрут  $M_i$  без вузла  $S^* + 1$ :

а) якщо так, то приймаємо, що  $QoS_i^* = QoS_i(S^*)$ ,  $M^* = M_i(S^*)$  і переходимо до пункту 4.1.4.

б) якщо ні, то переходимо до пункту 4.1.4..

- Якщо ні, то переходимо до пункту 4.1.4.

4.1.4. Приймаємо  $S^* = S^* + 1$ .

4.1.5. Перевіряємо чи  $S^* + 2 \leq S$ .

- Якщо ні, то переходимо до пункту 4.1.3.

- Якщо рівність виконується, то приймаємо, що  $S^{**} = 1$ , де  $S^{**}$  – номер вузла з маршруту  $M_i$  для пошуку можливості оптимізації маршруту шляхом додавання вузла.

4.1.6. Перевіряємо чи існує вузол, який знаходиться в спільній зоні досяжності для вузлів  $S^{**}$  і  $S^{**} + 1$ .

- Якщо такий вузол існує, то перевіряємо чи для утвореного маршруту  $QoS_i(S^{**}) \succ QoS_i^{**}$ , де  $QoS_i(S^{**})$  – параметр QoS для маршруту  $M_i(S^{**})$ ,  $M_i(S^{**})$  – маршрут  $M_i$  з доданим вузлом між вузлами  $S^{**}$  і  $S^{**} + 1$ :

а) якщо так, то приймаємо, що  $QoS_i^* = QoS_i(S^{**})$ ,  $M^* = M_i(S^{**})$ , та переходимо до пункту 4.1.7.

б) якщо ні, то переходимо до пункту 4.1.7.

- Якщо такий вузол не існує, переходимо до пункту 4.1.7.

4.1.7. Приймаємо, що  $S^{**} = S^{**} + 1$ .

4.1.8. Перевіряємо чи виконується умова  $S^{**} + 2 \leq S$ .

4.1.8.1. Якщо ні, то переходимо до пункту 4.1.6.

4.1.8.2 Якщо так, то перевіряємо чи  $M^* = M_i$ .

- Якщо ні, то приймаємо  $M_i = M^*$ , і переходимо до пункту 4.1.
- Якщо так, то приймаємо  $i = i + 1$ , і переходимо до пункту 4.

4.2. Якщо ця умова не виконується, то відбувається вибір маршруту з оновленої множини  $M$  (внаслідок додавання/ видалення вузлів маршруту) з найкращим значенням параметру QoS.

#### **4.4. Комплексний метод оптимізації маршрутизації інформаційних потоків для самоорганізованих мереж**

На основі вищепредставлених модифікованих алгоритмів: мурашкового та імітації відпалу пропонуємо використовувати комплексний метод маршрутизації [1], який з оновленої множини кращих маршрутів, що утворюється модифікованим алгоритмом імітації відпалу (рис. 4.3), здійснює вибір найкращого маршруту за критерієм часу передавання даних шляхом використання модифікованого мурашкового алгоритму (рис. 4.2).

Суть методу полягає у створенні множини кращих маршрутів, що утворюються завдяки роботі модифікованих алгоритмів імітації відпалу та мурашкового, використання яких дозволяє знаходити глобальний екстремум деякої функції, на основі впорядкованого випадкового пошуку та здійснювати пошук маршруту з кращим значенням параметру QoS на основі видалення/додавання вузла з маршруту [7], а також враховувати неоднорідності в мережі (рис. 4.4).

Функціонування розробленого методу маршрутизації здійснюється при умові, що вузол для видалення / додавання знаходиться в спільній зоні досяжності вузлів, які розглядаються.

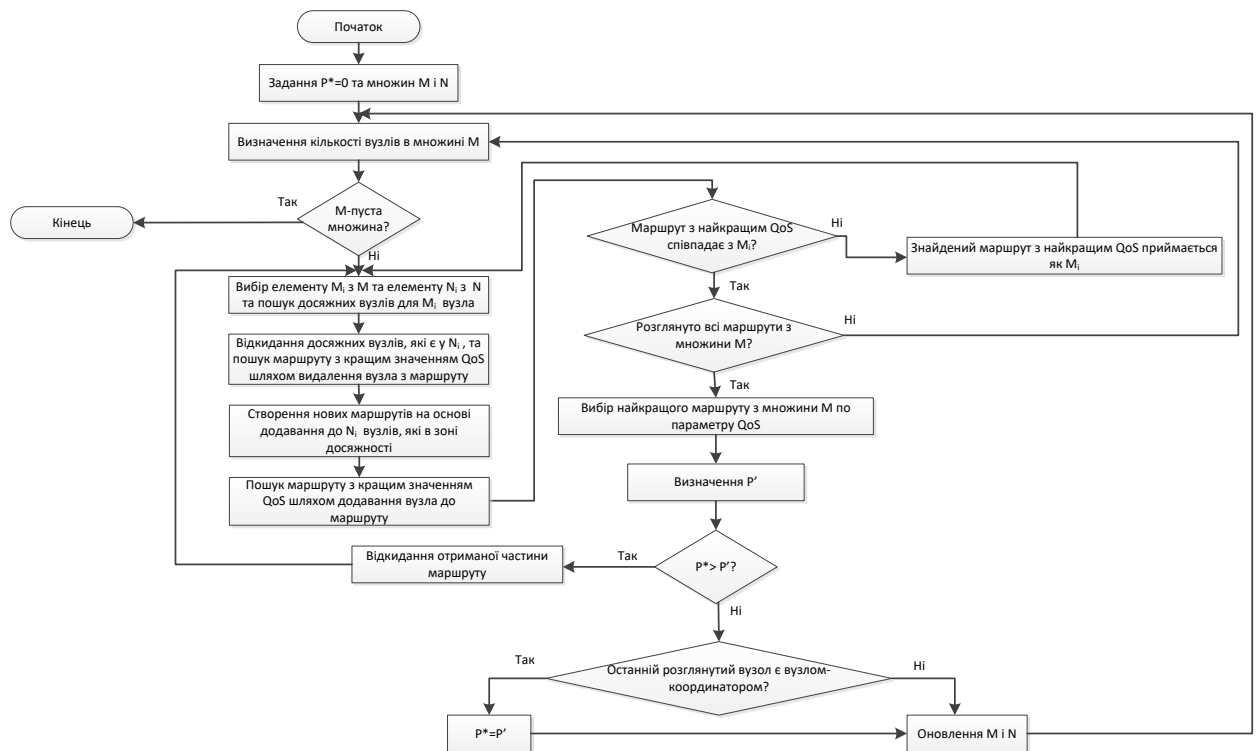


Рис. 4.4. Розроблений алгоритм маршрутизації інформаційних потоків

Дослідження ефективності маршрутизації інформаційних потоків в самоорганізованій mesh-мережі проводилося з використання імітаційного моделювання в програмному середовищі Matlab. Процес моделювання самоорганізованої мережі здійснено для 30 вузлів мережі, розташування кожного з яких вибрано випадково і представлено на рис. 4.5.

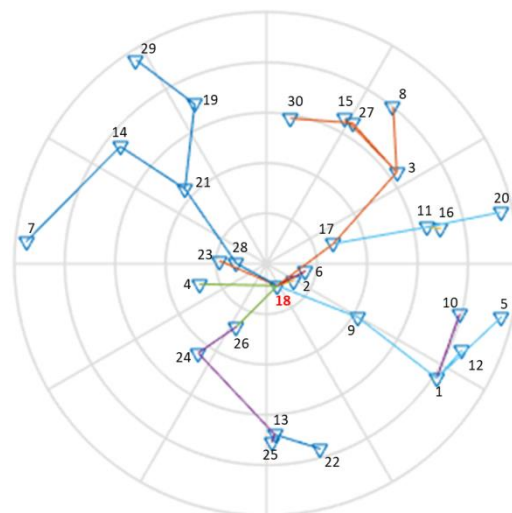


Рис. 4.5. Розміщення вузлів мережі

На даному рисунку під номером 18 знаходиться вузол-координатор.

Для кожного вузла мережі –  $\alpha$  визначаємо множину зв'язків його досяжності –  $Q_\alpha$  при умові, що для кожної пари вузлів обов'язково існує певний шлях, який їх з'єднує.

Алгоритм генерації трафіку для самоорганізованої мережі представлено на рис. 4.6.

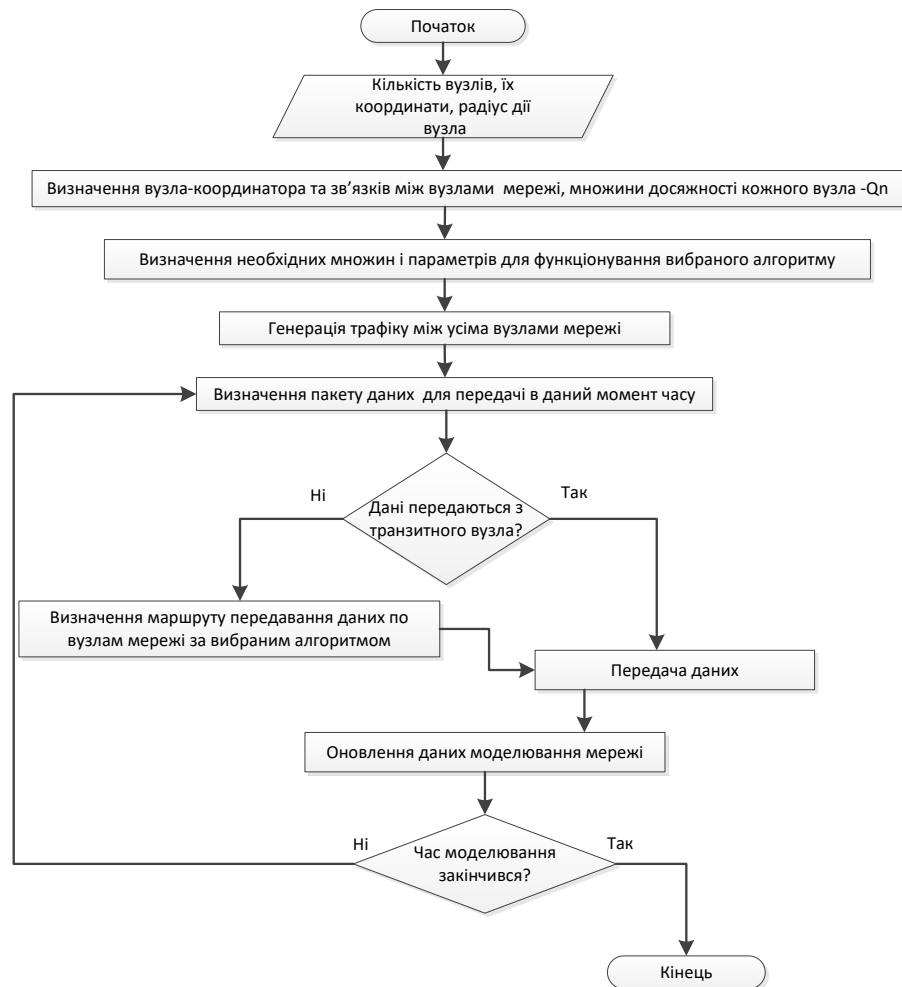


Рис. 4.6. Алгоритм генерації трафіку для моделювання мережі

Для прикладу було здійснено моделювання модифікованого мурашкового алгоритму на мережі, яка представлена на рис. 4.5.

Результати проведеного моделювання показано на рис. 4.7, де кожна точка (▼) відповідає середньому часу проходження даних від вузла (номер вузла написаний над даною точкою) до вузла-координатора у залежності від найменшої відстані від вузла-джерела до вузла-координатора, наприклад від 7 до 18.



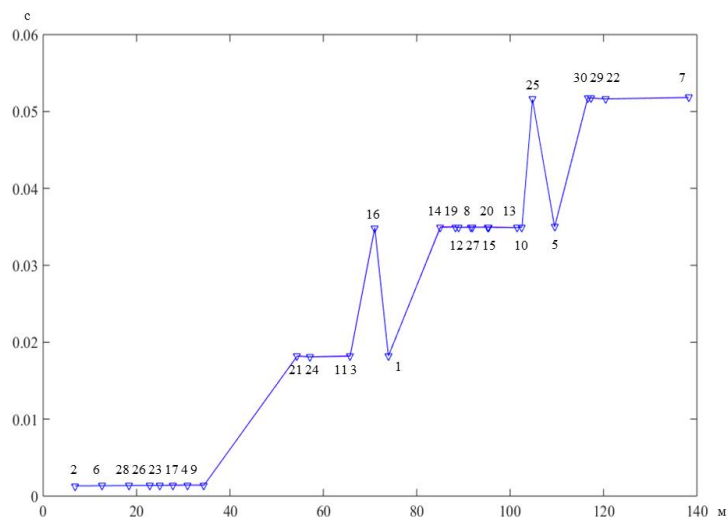


Рис. 4.7. Залежність часу передачі даних від пройденого шляху для модифікованого мурашкового алгоритму

Отже, головною умовою маршрутизації в самоорганізованих мережах є зменшення кількості транзитних вузлів між вузлом-джерелом і вузлом-координатором. Таким чином, найбільш доцільно використовувати комплексний метод маршрутизації інформаційних потоків у випадку можливості вибору маршрутів, які характеризуються мінімальною кількістю транзитних вузлів, що дозволить найбільш ефективно визначити маршрут з найменшим часом передавання даних.

#### 4.5. Дослідження ефективності маршрутизації інформаційних потоків в самоорганізованій mesh-мережі

Сучасні безпроводні протоколи повинні забезпечувати не тільки високошвидкісну передачу даних [120], але і якісну доставку голосової і відеоінформації в умовах наявності електромагнітних завад. Під якістю розуміється досягнення певних показників продуктивності і надійності при передачі інформації по безпроводній мережі. В останніх версіях стандартів безпроводних мереж з'явився ряд механізмів підтримки якості обслуговування. Враховуючи високу завантаженість радіочастотного ресурсу, на даний час показник SNR є одним з основних критеріїв якості функціонування безпроводної мережі [121].

Важливу роль у процесі передавання інформації має і BER, що дозволяє оцінювати якість і ефективність надсилання та обробку запитів. Оцінка тривалості передавання даних від вузла-джерела до вузла-отримувача та пошуку найкоротшого маршруту в безпроводній самоорганізованій мережі залежить від ймовірності виникнення помилки пакету внаслідок дії інтерференційних завад в радіоканалі (рис. 4.8).

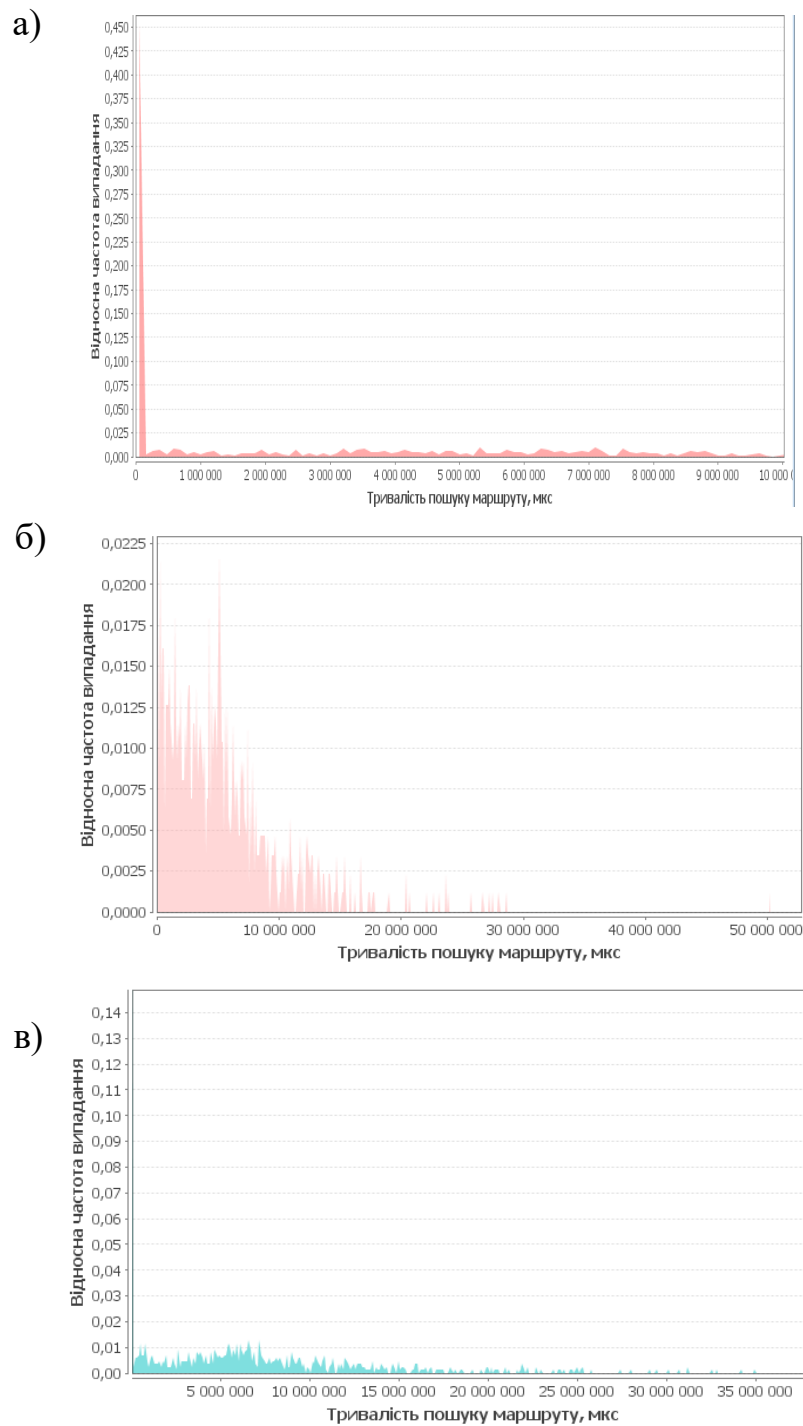


Рис. 4.8. Тривалість пошуку маршруту при різних значеннях SNR : а) 90 дБм; б) 84 дБм; в) 77 дБм

Для мережі із 30 вузлів та 6 кластерів, які формуються стандартним алгоритмом, при значеннях SNR від -90 до -75 дБм результати дослідження на програмному стимуляторі, розробленому у п.3.3, показали, що при збільшенні рівня шуму тривалість пошуку маршруту збільшується .

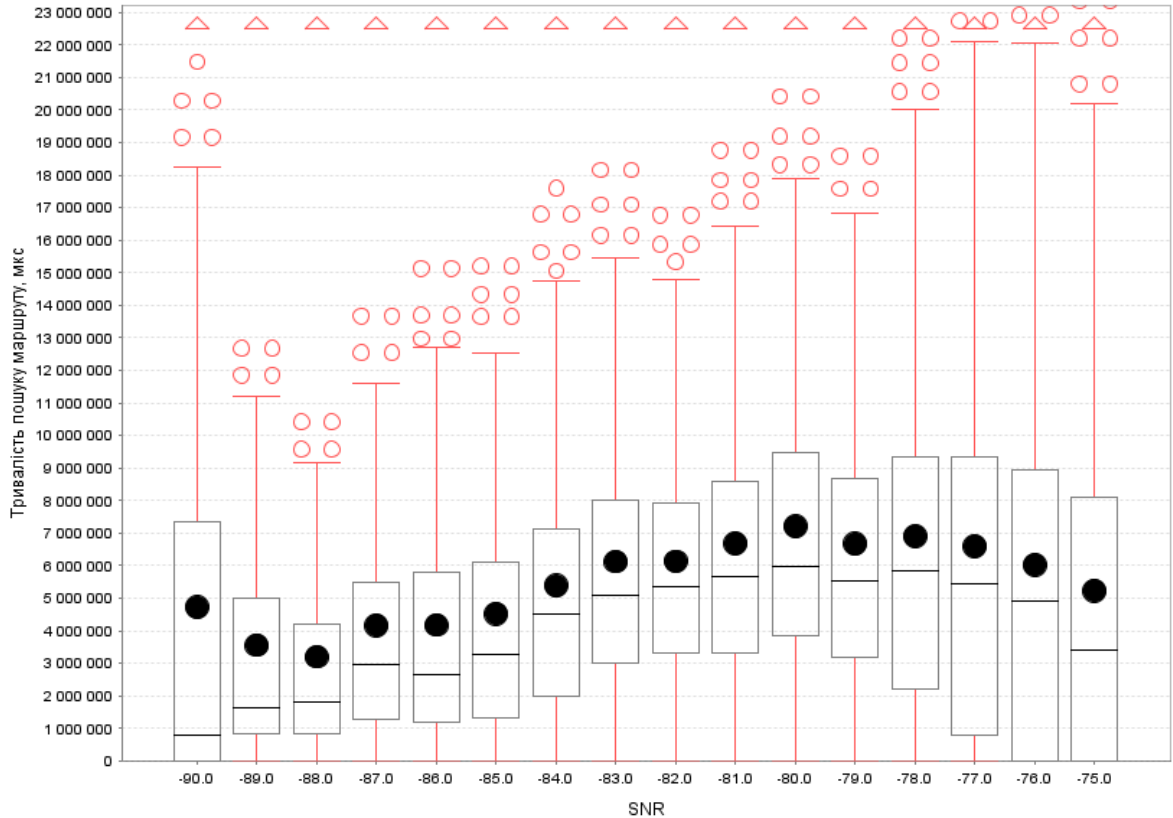


Рис. 4.9. Залежність тривалості пошуку маршруту від параметрів радіоканалу

При впровадженні розробленого методу маршрутизації вдалося зменшити тривалість пошуку маршруту при такій же конфігурації мережі.

Результати дослідження для мережі, топологія якої представлена на рис. 4.10 (при функціонуванні 30 вузлів мережа поділяється на 6 кластерів), показують, що використання комплексного методу маршрутизації дозволяє зменшити затримку на передавання даних у 2 рази (рис. 4.11).

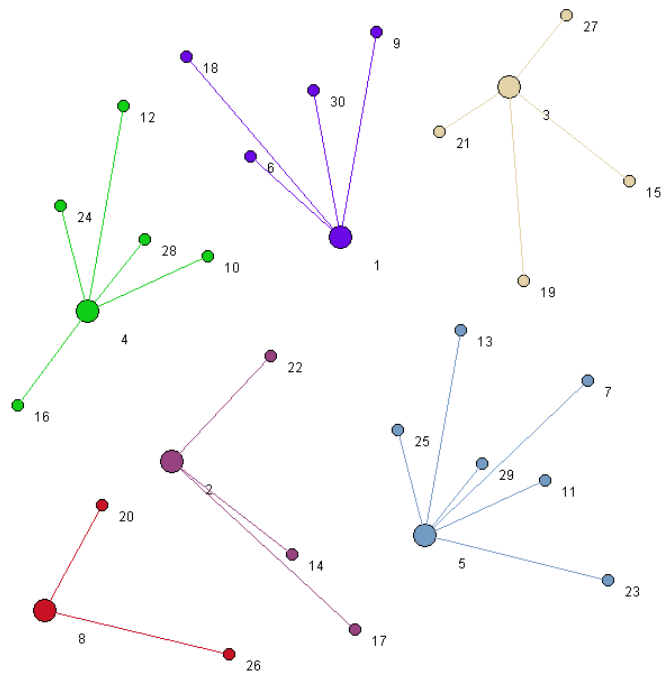


Рис. 4.10. Топологія досліджуваної мережі

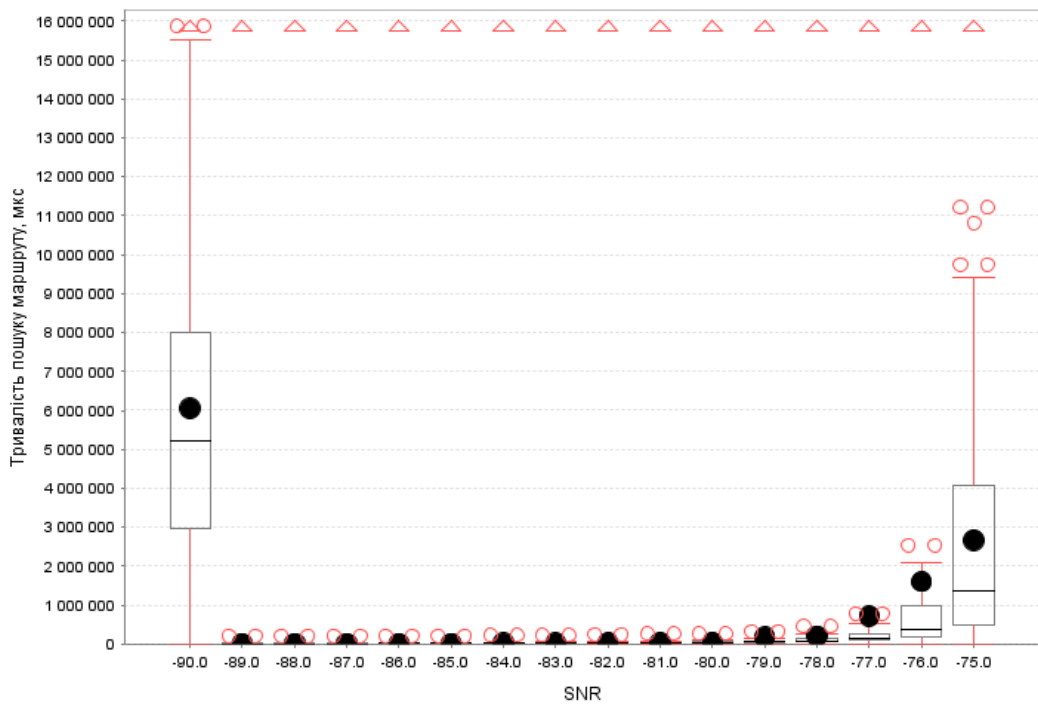


Рис. 4.11 Залежність тривалості пошуку маршруту від SNR при використанні запропонованого методу маршрутизації

#### 4.6 Висновки до 4-го розділу

1. 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, особливо в умовах, коли таких маршрутів є декілька. У роботі запропоновано модифікацію алгоритмів маршрутизації, таких як мурашковий, генетичний алгоритми та алгоритм імітації відпалу на основі врахування зони досяжності між вузлами мережі.

2. Розроблено комплексний метод маршрутизації інформаційних потоків у самоорганізованих мережах. Суть даного методу полягає у створенні множини кращих маршрутів, що утворюються завдяки роботі модифікованих алгоритмів імітації відпалу та мурашкового, використання яких дозволяє знаходити глобальний екстремум деякої функції, на основі впорядкованого випадкового пошуку та здійснювати пошук оптимізованого маршруту з кращим значенням параметру QoS шляхом видалення/додавання вузла з маршруту, а також враховувати неоднорідності в мережі.

Результати моделювання показали доцільність використання запропонованого методу маршрутизації даних для самоорганізованих мереж, оскільки у випадку можливості вибору маршрутів, які характеризуються мінімальною кількістю транзитних вузлів, перевага повинна надаватися маршрутам із найменшим часом передавання даних. Це дозволить забезпечити високу працездатність мережі в цілому та підтримувати необхідний рівень параметрів QoS для кінцевих користувачів.

3. 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 дозволило зменшити значення коефіцієнту бітових помилок на 7%. Моніторинг тривалості передавання даних від вузла-джерела до вузла-отримувача та пошуку найкоротшого маршруту в безпроводній самоорганізованій мережі при впровадженні комплексного методу маршрутизації інформаційних потоків показав, що при тій же конфігурації мережі затримка на передавання даних зменшилася у 2 рази.

## ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

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

Основні результати роботи полягають у наступному:

1. Проведено аналіз особливостей побудови безпроводних самоорганізованих мереж. Використання таких мереж породжує збільшення попиту на частотний спектр, що в умовах впровадження новітніх технологій є дуже обмеженим. З урахуванням динаміки топології саморганізованих безпроводних мереж, постійного переміщення їх вузлів, обмеженості смуги пропускання безпроводних каналів передачі даних, важливим є забезпечення належного рівня параметрів якості обслуговування – QoS. Важливим аспектом при передаванні даних по безпроводних сенсорних мережах залишається питання ефективності маршрутизації, що безпосередньо вплине на збалансованість та рівномірність використання ресурсів радіоканалу, а також сумісне використання ліцензованих смуг спектру без впливу на передачу даних користувачів.

2. Удосконалено метод локалізації вузлів сенсорної мережі, який базується на алгоритмічному підході Терстона з використанням діаграми потужності Вороного з правильними взаємозв'язками суміжності. Суть алгоритму полягає у встановленні значення граничних радіусів та оновлення всіх внутрішніх радіусів для обчислення укладки кола в моделі Пуанкаре для гіперболічної площини, ініціалізованої з нескінченними радіусами для всіх крайових кіл, щоб задовольнити місцеву унівалентність. Використання діаграми потужності Вороного з правильними взаємозв'язками суміжності дозволить підвищити точність визначення віртуальних координат, покращуючи якість розв'язання завдань маршрутизації в евклідовому просторі.

Результати моделювання показали, що із застосуванням методу локалізації вузлів вдалося забезпечити ефективність жадібної енергетичної маршрутизації на рівні 1,25 коефіцієнта еластичності за рахунок покращення процесу збіжності мережі.

3. Для ефективного вирішення задач кластеризації в безпроводній сенсорній мережі удосконалено метод кластеризації сенсорних вузлів для зменшення тривалості пошуку маршруту між довільною їх парою, який здійснює визначення центроїда кластера із урахуванням моделі поширення сигналу в радіоканалі. Суть алгоритму полягає у розбитті множини елементів векторного простору на заздалегідь відоме число кластерів. На кожній ітерації переобчислюється центроїд для кожного кластера, отриманого на попередньому кроці, потім вектори розбиваються на кластери відповідно до того, який з нових центрів виявився ближчим за метрикою, яка формується на основі розрахунку Евклідової відстані між вузлами і з врахуванням моделі поширення сигналу. В якості оцінки втрат у досліджуваній безпроводній самоорганізованій мережі пропонується використати однопроменеву модель Motley-Keenan, яка дозволяє враховувати втрати потужності сигналу та відслідковувати рівень BER при проходженні через кожен вузол мережі. Формування кластеру  $i$ , відповідно, знаходження його центроїда, буде відбуватися до моменту, поки не буде знайдено усі найближчі по відстані вузли з максимальним значенням потужності сигналу.

Результати дослідження показують, що завдяки впровадженню удосконалених методу локалізації вузлів та алгоритму кластеризації тривалість пошуку маршруту між довільною парою вузлів зменшилась у 4,5 разів. Впровадження тільки удосконаленого алгоритму кластеризації дозволить зменшити тривалість пошуку маршруту при такій же конфігурації мережі з 45 до 27,5 с, тобто у 1,6 разів. При масштабуванні мережі врахування Евклідової відстані і рівня сигнал / шум дозволяє зменшити час передавання фактично у 4 рази.

4. Запропоновано модель визначення станів телекомунікаційної мережі з використанням тензорного представлення топологічної структури на основі криволінійної системи координат. Для мережі з чотирьох вузлів визначено компоненту метричного тензора векторів, використовуючи теорему косинусів для чотирьохкутника з врахуванням двостороннього зв'язку між кожною парою вузлів. Пропонується збільшити кількість компонент метричного тензора, що дозволило представити метрику у симетричному тензорному полі, яка застосовується для опису деформації Ріманової метрики. Використання даної моделі дозволить здійснювати моніторинг станів топологічної структури після кластеризації та коректніше формувати таблиці маршрутизації в конкретні моменти часу.

5. Набула подальшого розвитку модель зони перекриття кластерів у самоорганізованих мережах із застосуванням схеми перепризначення логічних адрес мережним вузлам, які функціонують у цих кластерах. Завдяки можливості локального відновлення маршруту вдалося знизити затримку передавання даних на 5 % у порівнянні з традиційними протоколами маршрутизації у разі програмно-апаратних збоїв. Такий спосіб відновлення маршруту дозволяє при збільшенні швидкості пересування вузлів досягти зменшення часу зв'язності між вузлами та підвищити ефективність використання пропускної здатності каналів з 500 кбіт/с до 3500 кбіт/с.

6. Розроблено комплексний метод маршрутизації інформаційних потоків у самоорганізованих мережах, суть якого полягає у створенні множини кращих маршрутів, що утворюються завдяки роботі модифікованих алгоритмів імітації відпалу та мурашкового, використання яких дозволяє знаходити глобальний екстремум деякої функції, на основі впорядкованого випадкового пошуку та здійснювати пошук 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 дозволило зменшити значення коефіцієнту бітових помилок на 7%. Моніторинг тривалості передавання даних від вузла-джерела до вузла-отримувача та пошуку найкоротшого маршруту в безпроводній самоорганізованій мережі при впровадженні комплексного методу маршрутизації інформаційних потоків показав, що при тій же конфігурації мережі затримка на передавання даних зменшилася у 2 рази. Це дозволить забезпечити високу працездатність мережі в цілому та підтримувати необхідний рівень параметрів QoS для кінцевих користувачів.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

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 №885 – Львів. – 2017. – С.76-87.

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 №874 – Львів. – 2017. – С. 103-110.

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.

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». Радіоелектроніка та телекомунікації №849 – Львів. – 2016.– С. 173-178.

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.

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 //

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

Вісник Національного університету «Львівська політехніка» №818.  
Радіоелектроніка та телекомунікації. – Львів. – 2015.– С. 189-194.

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.

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.

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

10. 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.

11. 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.

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

12. 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.

13. <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.

14. 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.

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.

16. Девяткин Е.Е. Основные направления развития информационно-коммуникационных технологий в Европе / Е.Е. Девяткин, Е.Е. Володина, А.М. Суходольский, Т.А. Суходольская // Труды Научно-исследовательского института радио. – 2012 – № 2. – С. 11-22.

17. White paper: Cisco Visual Networking Index: Forecast and Methodology, 2016-2021 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.cisco.com/c/dm>

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

/en/us/solutions/collateral / service-provider / visual-networking-index-vni / complete white -paper-c11-481360.pdf.

18. Смолянюк. В. Військово-промисловий комплекс / В. Смолянюк // Політична енциклопедія – К.: Парламентське видавництво, 2011. — С. 108.

19. Интернет Вещей: Беспроводные сенсорные сети, 2014 [Электронный ресурс]. – Режим доступа : [http://www.iec.ch/whitepaper/pdf/IEC\\_WP\\_Internet\\_of\\_Things\\_Wireless\\_Sensor\\_Networks\\_Ru\\_LR.pdf](http://www.iec.ch/whitepaper/pdf/IEC_WP_Internet_of_Things_Wireless_Sensor_Networks_Ru_LR.pdf).

20. Смурыгин И.М. Концепция организации беспроводных сенсорных сетей и их применение. / И.М. Смурыгин // Молодежный научно-технический вестник / ФГБОУ ВПО «МГТУ им. Н.Э. Баумана», 2012 – № 9 – С. 31-40.

21. Gutierrez Jose A. Low-Rate Wireless Personal Area Networks: Enabling Wireless Sensors with IEEE 802.15.4 / Jose A. Gutierrez, Edgar H. Callaway, Barret L. Raymond – USA, 2004 – P. 3-21.

22. . Бобков В.Ю. Сотовые системы мобильной радиосвязи: учеб. пособие (/ В. Ю. Бабков, И. А. Цикин. — 2-е изд., перераб. и доп. — СПб.: БХВ-Петербург, 2013. —С. 327-332.

23. Su X. A comparative survey of routing protocol for vehicular sensor networks, in Proceedings of the IEEE International Conference on Wireless Communications, Networking and Information Security (WCNIS'10), 2013 – P. 311-316.

24. Иваненко В.А. Анализ протоколов передачи данных от узлов в беспроводных сенсорных сетях / В.А. Иваненко// Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2011. – 2/10 (50). – С. 9-12.

25. Тимченко О. Особливості маршрутизації в бездротових сенсорних мережах [Електронний ресурс] / О. Тимченко , М. Зеляновський // Українська академія друкарства, 2011 – Режим доступу: [http://www.ctp.uad.lviv.ua/images//ktd/25\\_zelyanovskiy.pdf](http://www.ctp.uad.lviv.ua/images//ktd/25_zelyanovskiy.pdf).

26. Арсенюк І.Р. Комп'ютерні мережі : навчальний посібник / І.Р. Арсенюк, А.А. Яровий – Вінниця: ВНТУ, 2010 – 145 с.

27. Власова В.О. Метод визначення координат об'єктів на етапі ініціалізації гомогенної бездротової сенсорної мережі : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. тех. наук: спец. 05.12.02 «Телекомунікаційні системи та мережі»/ В.О. Власова. – Харків, 2014. – 15 с.

28. Довженко Н.М. Методика забезпечення достовірності інформації на основі двомірного кодування в сенсорній мережі: дис. канд. техн. наук : спец. 05.13.06 / Довженко Надія Михайлівна – Київ, 2017. – 160 с.

29. Голубничий Д.Ю. Порівняльний аналіз методів маршрутизації в інформаційно-телекомунікаційній мережі АСУ авіацією та протиповітряною обороною / Д.Ю. Голубничий, Є.А. Мінаєв, А.О. Мінаєва // Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил , 2017 .– 4(53). – С. 90-92.

30. Стасєв Ю.В. Комп'ютерні мережі. Технології, протоколи та моделювання: навч. посіб. / І.В. Рубан, С.В. Дуденко, Д.В. Сумцов, О.І. Тимочко. – Х.: ХУПС, 2014. – 359 с.

31. Стеклов В.К. Інформаційна система: підручник для студентів вищих навчальних закладів за напрямком «Телекомунікації» / В.К. Стеклов, Л.Н. Беркман. – К.: Тех-ніка, 2014. – 792 с.

32. Климов А.И. Сравнение протоколов маршрутизации для беспроводных мобильных Ad-Нос сетей / Климов А.И., Червинская Н.В. // Автоматизація технологічних об'єктів та процесів. Збірник наукових праць XIII науково-технічної конференції аспірантів та студентів в м. Донецьку 14–17 травня 2013 р. - Донецьк, ДонНТУ, 2013. – С. 76–80.

33. Paul F., Quality of Service: Delivering QoS on the Internet and in Corporate Networks / Ferguson Paul, Geoff. Huston // New York: John Wiley & Sons, 1998. – P. 4-10.

34. Quality of Service Solutions Configuration Guide, Cisco IOS Release 15.1M&T [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://www.cisco.com/c/en/us/td/docs/ios/qos>.

35. Osipov E. On the Practical Feasibility of fair TCP Communications in IEEE 802.11 Based Multihop Ad Hoc Wireless Networks / E. Osipov. – Ph.D. Dissertatin, University of Basel, Switzerland. – 2005. – 187 P.
36. Вегенша Ш. Качество обслуживания в сетях IP: Пер. с англ. / Ш. Вегенша. – М.: Издательский дом «Вильямс» – 2003. – 386 с.
37. Кучерявый Е.А. Управление трафиком и качество обслуживания в сети Интернет / Е.А. Кучерявый. – СПб.: Наука и техника – 2004. – 336 с.
38. Gerasimova I. A., Paramonov A. I. Analysis of Traffic and Quality of Service in Wireless SelfOrganizing Networks / I. A. Gerasimova, A. I. Paramonov // V International Scientific-Technical and Scientific-Methodical Conference «Actual Problems of Education in Science and Education» – 2016 – Vol. 1. – p. 299–303.
39. Остерлох Х. Маршрутизация в IP-сетях. Принципы, протоколы, настройка / Х. Остерлох. – СПб.: BHV. – СПб., 2002. – 512 с.
40. Галкін П.В. Аналіз моделей та оптимізації збору інформації в бездротових сенсорних мережах / П.В. Галкін // Восточно-Европейский журнал передовых технологий – 5/9 ( 71 ). – 2014. – С. 24-30.
41. Гузій М. М. Аналіз технологій моніторингу комп'ютерних мереж [Електронний ресурс] / М. М. Гузій, О. В. Станіславова, М. В. Кадет // Режим доступа: <http://jrnl.nau.edu.ua/index.php/SBT/article/viewFile/5091/5353>.
42. Аулов И. Облачные вычисления и анализ информационной безопасности в облаке / И.Ф. Аулов, И.Д. Горбенко // Прикладная радиоэлектроника: науч.-техн. журнал. – 2013. – Том 12. – № 2. – С. 194–201.
43. Князь Д. Методы кластеризации многомерных статистических данных / Д. Князь, И. Баранова // Труды XIII международной конференции по финансово-актуарной математике и эвентологии многомерной статистики. – Красноярск: СФУ, 2014. – С. 47-51.
44. Ben Alla S. Gateway and Cluster Head Election using Fuzzy Logic in heterogeneous wireless sensor networks / S. Ben Alla, A. Ezzati, A. Mohsen // International Conference on Multimedia Computing and Systems (ICMCS), May 2012. – P. 761-766.

45. Jin-Shyan L. Fuzzy-Logic-Based Clustering Approach for Wireless Sensor Networks Using Energy Predication / Jin-Shyan Lee, Senior Member, Wei-Liang Cheng // IEEE Sensors Journal. – September 2012. – Vol. 12, № 9. – P.2891-2897.
46. Karimi A. Cluster Head Selection Using Fuzzy Logic and Chaotic Based Genetic Algorithm in Wireless Sensor Network / A. Karimi, S. Abedini, F. Zarafshan, S.A. Al-Haddad // Journal of Basic and Applied Scientific Research. – 2013. – 3 (4). – P.694-703.
47. Ghosh J. Cluster ensembles. Wiley Interdisciplinary Reviews / J. Ghosh, A. Acharya // Data Mining and Knowledge Discovery. – 2011. – V. 1(4). – P.305–315.
48. Anitha C. L. Comparative Analysis of Data Aggregation Algorithms Under Various Architectural Models in Wireless Sensor Networks / C. L. Anitha, R. Sumathi // BIJIT-BVICAM's International Journal of Information Technology.– 2014. – Vol. 6, Issue 2. – P. 757–763.
49. Damaso A. Reliability of Wireless Sensor Networks / A. Damaso, N. Rosa, P. Maciel // Sensors. – 2014. – Vol. 14, Issue 9. – P. 15760–15785.
50. Chuang P.-J. Effective neural network-based node localisation scheme for wireless sensor networks / P.-J. Chuang, Y.-J. Jiang // Wireless Sensor Systems, IET. – 2014. – Vol. 4, Issue 2. – P. 97–103.
51. Khosravi H. Optimal Node Scheduling for Desired Percentage of Coverage in Wireless Sensor Networks / H. Khosravi // Wireless Sensor Networks. – 2012. – Vol. 4, Issue 5. – P. 127–132.
52. Hadjila M. Routing Algorithm based on Fuzzy Logic Approach to Prolong the Lifetime of Wireless Sensor Networks / M. Hadjila, H. Guyennet, M. Feham // International Journal of Open Scientific Research (IJOSR). – Oct. 2013. – Vol.1, № 5. – P.24-35.
53. Fard E. S. Routing Protocol of Wireless Sensor Network (ED-LEACH) / E. S. Fard, M. H. Nadimi // International Journal of Sensors and Sensor Networks. – 2014. – Vol. 2, Issue 3. – P. 26–30.



54. Крутолапов А. С. Обеспечение качества обслуживания в сетях информационного обмена / А. С. Крутолапов // Вестник ВИ ГПС МЧС России. – 2013. – № 1. – С. 18–22.

55. Агеев Д. В. Синтез наложенных телекоммуникационных сетей с учетом единиц данных и применением многослойного графа / Д. В. Агеев // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2013. – Т. 4, № 9(64). – С. 49–51.

56. Bringmann K. Greedy Routing and the Algorithmic Small-World Phenomenon / K. Bringmann, R. Keusch, J. Lengler, Y. Maus // PODC'17, July 25-27, 2017 – Washington, DC, USA. – P. 371-380.

57. Douady A. A proof of thurston's topological characterization of rational functions. / A. Douady, J. Hubbard // Acta Mathematica, 1993 – 171(2) – P. 263-297.

58. Desreux S. An algorithm to generate exactly once every tiling with lozenges of a domain / S. Desreux // Theoretical Computer Science, 2003 – 303 (2–3) – P. 375-4083.

59. Sarkar R. Greedy routing with guaranteed delivery using Ricci flows / Sarkar R., Luo F., Yin X. // In Proceedings of the 8th International Symposium on Information Processing in Sensor Networks (IPSN'09), 2009 – P.121-132.

60. Лемешко А. В. Результаты исследования тензорной модели многопутевой маршрутизации с обеспечением качества обслуживания в телекоммуникационных сетях / А. В. Лемешко, О. Ю. Евсеева, С. В. Гаркуша // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. – 2013. – Т. 13. № 4. – С. 38–54.

61. Курейчик В. М. Использование роевого интеллекта в решении NP-трудных задач / В. М. Курейчик, А. А. Кажаров // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2011. – № 7. – С. 30–36.

62. Курейчик В. М. Перспективные архитектуры генетического поиска / В. М. Курейчик // Перспективные информационные технологии и интеллектуальные системы – 2000. – № 1. – С. 58–60.

63. Полупанов А. А. Адаптивная архитектура генетического поиска / А. А. Полупанов // Перспективные информационные технологии и интеллектуальные системы – 2002. – № 3. – С. 49–55.
64. Еремеев А. В. Разработка и анализ генетических и гибридных алгоритмов для решения задач дискретной оптимизации : дис. канд. физ.-мат. наук : 05.13.17 / Еремеев Антон Валентинович. – Омск, 2000. – 119 с.
65. Dorigo M. Ant algorithms for discrete optimization / M. Dorigo, G. Di Caro, L.M. Gambardella // *Artificial Life*, 1999, vol. 5, no. 2 – P. 137–172.
66. Angelini P. An algorithm to construct greedy drawings of triangulations / P. Angelini, F. Frati, L. Grilli // in: *Proc. Graph Drawing 2008, Lecture Notes in Computer Science*. – vol. 5417. – 2009. – P. 26–37.
67. Ingber L. Very fast simulated re-annealing / L. Ingber // *Mathematical and Computer Modelling*. 12, 1989 – P. 967-973.
68. Kranakis E., H. Singh, J. Urrutia, Compass routing on geometric networks / E. Kranakis, H. Singh, J. Urrutia // In: *Proc. Canadian Conf. on Comp. Geom.*, 1999. – P. 51–54.
69. Rao A. Geographical routing without location information / A. Rao, C. Papadimitriou, S. Shenker, I. Stoica // In *Proceedings of MobiCom 2003*. – P. 96-108.
70. Papadimitriou C. On a conjecture related to geometric routing / C. Papadimitriou, D. Ratajczak // In: *Proc. ALGOSENSORS*, 2004. – P. 9–17.
71. Kleinberg R. Geographic routing using hyperbolic space / R. Kleinberg // In: *Proc. INFOCOM*, 2007. – <https://ieeexplore.ieee.org/document/4215803/>.
72. Flury R. Greedy routing with bounded stretch / R. Flury , S.V. Pemmaraju, R. Wattenhofer // in: *Proc. INFOCOM*, 2009. – <https://www.tik.ee.ethz.ch/file/ceee4622ca89cb9804b887506e58549e/infocom09routing.pdf>.
73. Sarkar R. Greedy routing with guaranteed delivery using Ricci flows / R. Sarkar, F. Luo, X. Yin, X.D. Gu, J. Gao // in: *Proc. Symp. Inf. Proc. in Sensor Networks*, 2009. – <https://ieeexplore.ieee.org/document/5211935/>.

74. Aurenhammer F. Power diagrams: properties, algorithms and applications / F. Aurenhammer // *SIAM J. Comput.* 16, 1987. – P. 78–96.

75. Киселева Е. Теория непрерывных задач оптимального разбиения множеств как универсальный математический аппарат построения диаграммы Вороного и ее обобщений / Е. Киселева, Коряшкина Н. // *Кибернетика и системный анализ*, 2015. – т. 51. – №4. – С. 3-12.

76. Коваленко А. М. Разработка алгоритма направленной маршрутизации для беспроводных сенсорных сетей. / А. М. Коваленко, В. А. Дидук, Е. Г. Трофименко // *Труды Одесского политехнического университета*. – 2011. – Вып. 1 (35). – С. 151–154.

77. Иваненко В.А. Информационные аспекты при разработке сенсорных сетей (Часть 1) / В.А. Иваненко, А.Н. Зеленин // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. – 2011. – 3/4 (51). – С. 46-49.

78. Бодрова А. А. Позиционирование и взаимодействие в беспроводных сенсорных сетях / А. А. Бодрова, В. И. Логвин // *Молодой ученый*. – 2015. – №6. – С. 129-132.

79. Наградов Е. А. Проблемы применения существующих алгоритмов маршрутизации в сенсорных сетях реального времени / Е. А. Наградов // *Методы и средства обработки информации. Труды третьей Всерос. научн. конф.* – М.: Издательский отдел факультета вычислительной математики и кибернетики МГУ имени М. В. Ломоносова, 2009. – 481 с.

80. Восков Л.С. Позиционирование датчиков беспроводной сенсорной сети как способ энергосбережения / Л.С. Восков, М.М. Комаров // *Sensors&Systems*, 2012. – выпуск №1. – С. 34-38.

81. Поникар А.В., Евсеев О. В., Анциперов В.Е., Мансуров Г.К. Исследование возможности локального позиционирования в беспроводных сетях IEEE 802.15.4 // *IV Всероссийская конференция «Радиолокация и радиосвязь» 2010*. – С.914-918.

82. Chen Y. Energy-balancing multipath routing protocol for wireless sensor networks / Y. Chen, N. Nasser // *Proceedings of the 3rd international conference on*

Quality of service in heterogeneous wired/wireless networks QShine '06. – 2006. – Vol. 21.– P. 245–249.

83. Abolhasan M. Performance Investigation on three-classes of MANET routing protocols / M. Abolhasan, T. Wysocki, J. Lipman // Asia-Pacific Conference on Communications, 2005.– P. 774–778.

84. Vahabi M. Adaptive Data Collection Algorithm for Wireless Sensor Networks / M. Vahabi, M. F. A. Rasid, R. S. A. R. Abdullah, M. H. F. Ghazvini // International Journal of Computer Science and Network Security. – 2008. – Vol. 8, Issue 6. – P. 125–132.

85. Yonghui S. Data Aggregation with multiple sinks in Information-Centric Wireless Sensor Network / S. Yonghui, K. Younghan // Information Networking (ICOIN), International Conference, 2014. – P. 13–17.

86. Katiyar Vi. Clustering algorithms for heterogeneous wireless sensor network: A survey / Vi. Katiyar, Ch. Narottam, So. Surender // International Journal of Applied Engineering Research, 2010. – vol. 1. – no 2. – P. 273.

87. Kuila Pr. Energy efficient clustering and routing algorithms for wireless sensor networks: Particle swarm optimization approach / Pr. Kuila, K. Prasanta // Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2014. – no 33. – P. 127-140.

88. Bhushan S. A hybrid approach to energy efficient clustering for heterogeneous wireless sensor network / S. Bhushan, S. Antoshchuk // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2018. – № 2. – С. 15-20.

89. Хухун L. A survey on clustering routing protocols in wireless sensor networks / L. Хухун // Sensors, 2002. – vol. 12. – no 8. – P. 11113-11153.

90. Кучерявый А. Е. Выбор головного узла кластера в однородной беспроводной сенсорной сети / А. Е. Кучерявый, А. Салим // Электросвязь, 2009. – №8. – С. 32-36.

91. Салим Ахмед Абд Эльфтах, Разработка алгоритмов выбора головного узла в кластерных беспроводных сенсорных сетях: дис канд. техн. наук.: 05.12.13 / А. Салим. – М., 2010.– 106 с.

92. Weizhong Z. Parallel k-means clustering based on mapreduce / Zhao Weizhong, Huifang Ma, Qing He // IEEE International Conference on Cloud Computing. Springer Berlin Heidelberg, 2009. – P. 127-131.

93. Luobin Y. High performance data clustering: a comparative analysis of performance for GPU, RASC, MPI, and OpenMP implementations / Yang, Luobin, et al. // The Journal of supercomputing 70.1 (2014).– P. 284-300.

94. Fekade B. Probabilistic Recovery of Incomplete Sensed Data in IoT / B. Fekade, T. Maksymyuk, M. Kyryk, M. Jo // IEEE Internet of Things Journal, 2018.– vol. 5. – №4. – P. 2282-2292.

95. Старцев С.С. Модели распространения радиосигнала Wi-Fi [Электронный ресурс] / НГАСУ (Сибстрин) – Режим доступа: <https://docplayer.ru/47597028-Modeli-rasprostraneniya-radiosignala-wi-fi.html>

96. Hansen J. E. Spherical near-field antenna measurements / J. E. Hansen // Peter Peregrinus Ltd., United Kingdom. – 1988. – P. 62-79.

97. Кузьменко А. А. Методики планирования беспроводных сетей для нужд промышленной автоматизации / А. А. Кузьменко, И. А. ; Молоковский, В. Н. Лозинская // ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» – Режим доступа: <http://ea.donntu.org:8080/jspui/bitstream/123456789/32040/1/%D0%9A%D1%83%D0%B7%D1%8C%D0%BC%D0%B5%D0%BD%D0%BA%D0%BE%D0%9C%D0%BE%D0%BB%D0%BE%D0%BA%D0%BE%D0%B2%D1%81%D0%BA%D0%B8%D0%B9%D0%9C%D0%B5%D1%82%D0%BE%D0%B4%D0%B8%D0%BA%D0%B8%D0%9F%D0%BB%D0%B0%D0%BD%D0%B8%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D0%B8%D1%8F.pdf>.

98. Motley A. Indoor Propagation Models / A. Motley , J. Keenan // COST Action 231: Digital mobile radio towards future generation systems: Final report. 1999 – P. 175-179.

99. Ryabov G. Routing on lattice-cell structures / G. Ryabov // Vich. Met. Programming, 5: 1. – 2004. – P. 107–117.

100. Donchenko V. Euclidean spaces of numerical vectors and matrices: constructive methods for the description of the basic structures and their use / V. Donchenko // International Journal “Information Technologies & Knowledge” Vol.5. – № 3. – 2011. – P. 203–216.
101. Chow B. Combinatorial Ricci flows on surfaces / B. Chow , F. Luo // Different. Geometry, vol. 63. – no. 1. – 2003. – P. 97–129.
102. Pirhadi V. The flow of Ricci on contact manifolds / V. Pirhadi V., A. Razavi // Sibirsk. Mat. Journal– 56: 5.– 2015. – P. 912-921.
103. Huai-Dong C. A complete proof of the Poincaré and geometrization conjectures – application of the Hamilton-Perelman theory of the Ricci flow / Cao Huai-Dong, Zhu Xi-Ping Zhu // , Asian J. Math.,10. – No. 2. – 2006. – P. 165–492.
104. Shi X. Ricci deformation of the metric on complete noncompact Riemannian manifolds / X . Shi // J. of Diff. Geom. 30. – 1989. – P. 303-394.
105. Fusy É. Quadratic exact-size and linear approximate-size random sampling of planar graphs / É. Fusy // Discrete Mathematics and Theoretical Computer Science, 2005. – <http://www.lix.polytechnique.fr/Labo/Eric.Fusy/Articles/FusyAofa.pdf>.
106. Maksymyuk T. Deployment strategies and standardization perspectives for 5G mobile networks / T. Maksymyuk, M. Klymash and M. Jo // 2016 13th International Conference on Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (TCSET), Lviv.– 2016. – P. 953-956. doi: 10.1109/TCSET.2016.7452235.
107. Maksymyuk T, S. Dumych, M. Brych, D. Satria, M. Jo, An IoT based monitoring framework for software defined 5G mobile networks / T/ Maksymyuk, S. Dumych, M. Brych, D. Satria, M. Jo // ACM 11th International Conference on Ubiquitous Information Management and Communication (ACM IMCOM’2017). – Jan. 5-7, 2017, Japan. – DOI:10.1145/3022227.3022331.
108. Maksymyuk T. Cooperative channels allocation in unlicensed spectrum for D2D assisted 5G cellular network / T. Maksymyuk, M. Brych, M. Klymash, M. Jo // 2nd International Conference on Advanced Information and Communication

Technologies (AICT), (Lviv, Ukraine, July 4-7, 2017) – Lviv Polytechnic Publishing House, 2017. – P.197-200.

109. Попков Г.В. Mesh–сети: перспективы развития, возможные применения / Г.В. Попков // Проблемы информатики. 2012. – №3. – С.74-79.

110. Kumar S. Hybrid genetic algorithm based approach for energy efficient routing in wireless sensor nets / Singh Kumar, Sharma Vinay // International journal of emerging technologies in computational and applied sciences (IJETCAS), 2013. – P. 408-413.

111. Maksymyuk T. Fractal Modeling for Multi-Tier Heterogeneous Networks with Ultra-High Capacity Demands / T. Maksymyuk, M. Brych, I. Strykhalyuk, M. Jo. // Smart Computing Review, 2015. – vol. 5. – №4. – P. 346-355.

112. Maksymyuk T. Fractal Geometry Based Resource Allocation for 5G Heterogeneous Networks / T. Maksymyuk, M. Brych, A. Masyuk // Proceedings of IEEE International Conference on Problems of Infocommunications, Science and Technology (IEEE PIC S&T 2015), (Kharkiv, Ukraine, October 13-15, 2015) – P. 69-72.

113. Jo M. Cognitive radio approach for LTE deployment / M. Jo, T. Maksymyuk, M. Kyryk, L. Han // Proceedings of IEEE International Conference on “Perspective Technologies and Methods in MEMS Design” MEMSTECH’2013, (Polyana-Svalyava, Ukraine, April 16–20, 2013) – P. 63-64.

114. Maksymyuk T. Stochastic Geometry Models for 5G Heterogeneous Mobile Networks / T. Maksymyuk, M. Brych, V. Pelishok // Smart Computing Review, 2015. – vol. 5. – №2. – P. 89-101.

115. Sharawi M. Routing wireless sensor networks based on soft computing paradigm / M. Sharawi, I. Aly Saroit, H.El-Mandy, E. Emary // International journal on soft computing. Artificial intelligence and applications(IISCAI), vol.2. – No.4. – 2013.

<https://pdfs.semanticscholar.org/a7b1/9c2b5e5cd80c7aa14097eec4f81735bf3466.pdf>.

116. Емельянов В.В. Теория и практика эволюционного моделирования / Емельянов В.В., Курейчик В.В., Курейчик В.М. // М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 432 с.
117. Латиф К. Генетический алгоритм маршрутизации беспроводных сенсорных сетей / Латиф Кудр, Ю. А. Скобцов // Проблеми інформаційних технологій. – 2014. – № 1. – С. 85-91.
118. Wook Ahn C. A genetic algorithm for shortest path routing problem and the sizing of populations / Chang Wook Ahn, R. S. Ramakrishna // IEEE transactions on evolutionary computation 6 (6).– 2002. – P. 566-579.
119. Ипатов А. В. Модифицированный метод имитации отжига в задаче маршрутизации транспорта / А. В. Ипатов // Тр. ИММ УрО РАН, 2011. – том 17.– №4. – С. 121–125.
120. Chen Y. Energy-balancing multipath routing protocol for wireless sensor networks / Y. Chen, N. Nasser // Proceedings of the 3rd international conference on Quality of service in heterogeneous wired/wireless networks QShine '06.– 2006. – No. 21.– P. 245-249.
121. Михалевський Д. В. Передача трафіку у мережах Wi-Fi при дії інтерференційних завад / Д. В. Михалевський, М. Д. Гузь, Р. О. Красота. – Сборник научных трудов Sword. – 2014. – №4(37). – Том 5. – С. 12-17.



ДОДАТОК 1. АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЙНИХ  
ДОСЛІДЖЕНЬ

"ЗАТВЕРДЖУЮ"

Директор  
ТзОВ «Телекомунікаційна компанія»



Пентак І.М.

2018 р.

**АКТ**

про використання результатів кандидатської дисертаційної роботи  
Піріг Юлії Володимирівни  
**"Моделі та алгоритми маршрутизації інформаційних потоків в  
самоорганізованих мережах"**

Даний акт складений про те, що у ТзОВ «Телекомунікаційна компанія» для покращення якості обслуговування абонентів шляхом поділу корпоративної мережі на окремі сегменти використані результати дисертаційної роботи Піріг Ю. В. "Моделі та алгоритми маршрутизації інформаційних потоків в самоорганізованих мережах", представленої на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук, а саме:

- модель зони перекриття кластерів у самоорганізованих мережах з схемою перепризначення логічних адрес мережним вузлам цих кластерів, впровадження якої дозволило знизити затримку передавання даних у порівнянні з традиційними протоколами маршрутизації у разі програмних чи апаратних збоїв;
- метод локалізації вузлів сенсорної мережі, який базується на алгоритмічному підході Терстона з використанням діаграми потужності Вороного з правильними взаємозв'язками суміжності, застосування якого дозволило забезпечити досить високий рівень коефіцієнта еластичності маршруту, покращуючи якість розв'язання завдань маршрутизації у мережі.

Результати експериментальних досліджень, виконаних на виробничих потужностях ТзОВ «Телекомунікаційна компанія», відповідають результатам досліджень, що представлені у дисертаційній роботі, похибка не перевищує 5%.

Головний інженер



Рубаха І.М.

"ЗАТВЕРДЖУЮ"

Директор

ТзОВ ВТФ «Контех»

Смольницький Є.С.

ЛПНА 2018 р.



### АКТ

про використання результатів кандидатської дисертаційної роботи

Пиріг Юлії Володимирівни

### "Моделі та алгоритми маршрутизації інформаційних потоків в самоорганізованих мережах"

Даний акт складений про те, що у ТзОВ ВТФ «Контех» для підвищення функціональності корпоративної мережі використані результати дисертаційної роботи Пиріг Ю. В. "Моделі та алгоритми маршрутизації інформаційних потоків в самоорганізованих мережах", представленої на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук, а саме:

- метод кластеризації вузлів з визначенням центроїда кластера із урахуванням моделі поширення сигналу в радіоканалі, впровадження якого дозволило:
  - зменшити значення коефіцієнту бітових помилок всередині кластеру завдяки більш ефективному використанню пропускну здатності радіоканалу;
  - зменшити тривалість пошуку маршруту шляхом урахування в метриці шляху значення Евклідової відстані та рівня сигнал/шум у радіоканалі (розрахованого на основі моделі поширення радіосигналу).

Результати експериментальних досліджень, виконаних на виробничих потужностях ТзОВ «Телекомунікаційна компанія», відповідають результатам досліджень, що представлені у дисертаційній роботі, похибка не перевищує 5%.

Директор



Є.С. Смольницький



**"ЗАТВЕРДЖУЮ"**

Директор  
ПП "Цифрові технології"

Танчак З.В.  
"25" серпня 2018 р.



**АКТ**

про використання результатів кандидатської дисертаційної роботи  
Піріг Юлії Володимирівни на тему:  
**"Моделі та алгоритми маршрутизації інформаційних потоків в  
самоорганізованих мережах"**

Даний акт складений про те, що у ПП "Цифрові технології" для підвищення якості обслуговування абонентів у процесі надання мобільних сервісів використані результати дисертаційної роботи Піріг Ю. В. "Моделі та алгоритми маршрутизації інформаційних потоків в самоорганізованих мережах", представленої на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук, а саме:

- комплексний метод маршрутизації на основі знаходження глобального екстремуму функції впорядкованого випадкового пошуку з додаванням/видаленням вузла та з урахуванням неоднорідностей у мережі, впровадження якого забезпечило значне зменшення затримки передавання даних від вузла-джерела до вузла-отримувача;

- модель визначення станів телекомунікаційної мережі з використанням тензорного представлення її топологічної структури, впровадження якої дозволило здійснювати моніторинг і фіксацію станів топологічної структури та підвищило точність формування таблиць маршрутизації в конкретні моменти часу.

Внаслідок перевірки використаних методу та моделі на мережному обладнанні у ПП "Цифрові технології" встановлено, що результати знаходяться в межах п'ятивідсоткового середньоквадратичного відхилення від поданих у дисертаційній роботі.

Провідний інженер



Дрофяк А.М.

ДОДАТОК 2. СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ  
ДИСЕРТАЦІЇ ТА ВІДОМОСТІ ПРО АПРОБАЦІЮ РЕЗУЛЬТАТІВ  
ДИСЕРТАЦІЇ

*Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:*

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 №885 – Львів. – 2017. – С.76-87.

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 №874 – Львів. – 2017. – С. 103-110.

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).

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». Радіоелектроніка та телекомунікації №849 – Львів. – 2016.– С. 173-178.

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

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

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» №818. Радіoeлектроніка та телекомунікації. – Львів. – 2015.– С. 189-194.

*Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації (форма участі здобувача):*

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). (Очна участь здобувача з доповіддю).

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). (Очна участь здобувача з доповіддю).

9. <sup>1</sup>Климаш Ю.В. Модель дослідження алгоритмів маршрутизації самоорганізованих 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, Чернівці, Україна)- Чернівці:«Місто», 2017. – С.92-94 (Очна участь здобувача з доповіддю).

10. 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, - PP. 430-433. (Scopus). (Очна участь здобувача з доповіддю).

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

11. 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, – PP. 515-518. (Scopus). (Очна участь здобувача, співдоповідач).

12. 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. (Очна участь здобувача, співдоповідач).

13. <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). (Очна участь здобувача з доповіддю).

14. 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). (Очна участь здобувача, співдоповідач).

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. (Очна участь здобувача, співдоповідач).

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