

Київський національний університет імені Тараса Шевченка
Міністерство освіти і науки України

Київський національний університет імені Тараса Шевченка
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ПЕТРІВСЬКИЙ ВОЛОДИМИР ЯРОСЛАВОВИЧ

УДК 004.94+004.02

ДИСЕРТАЦІЯ

**МОДЕЛІ ТА МЕТОДИ ПРОГРАМОВАНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ СТРУКТУРИ
СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ**

121 Інженерія програмного забезпечення
12 Інформаційні технології

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

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

_____ В.Я. Петрівський

Науковий керівник: Бичков Олексій Сергійович, доктор технічних наук, професор

Київ – 2022

АНОТАЦІЯ

Петрівський В. Я. Моделі та методи програмованої оптимізації структури сенсорних мереж. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 121 «Інженерія програмного забезпечення» (12 – Інформаційні технології). – Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, 2022.

У сучасному технологічному світі сенсори та сенсорні мережі широко використовуються у багатьох сферах людської діяльності. Популярність даних систем зумовлена широким спектром переваг: невеликий розмір, невеликі енерговитрати, різноманітність величин виміру, тощо. Проте при використанні сенсорів та сенсорних мереж виникають проблеми енергоефективності та вартості мережі при максимізації покриття, побудова оптимальних маршрутів при обльоті території, живучість сенсорних мереж.

У дисертаційній роботі представлено розроблені методи та алгоритми, що дозволяють знаходити параметри датчиків (радіус покриття, величина перетину зон покриття) за яких досягається максимальне покриття території при мінімальних енерговитратах та вартості мережі, будувати оптимальні траєкторії обльоту території, оцінювати живучість мережі з знаходженням вразливих елементів мережі. Під програмованою оптимізацією розуміємо можливість зміни характеристик мережі (радіус покриття датчиків, діаметр перетину зон покриття, топологія) під час функціонування мережі для досягнення оптимальності за певними критеріями (енергоефективність, покриття, вартість мережі). Тобто, на етапі проектування програмного забезпечення ми закладаємо можливість масштабування користувачем структури та характеристик сенсорної мережі, оцінки живучості та виявлення вразливих елементів мережі на етапі експлуатації.

Перший розділ дисертації присвячено огляду сучасного стану питань покриття території, оптимізації енерговитрат, моделювання руху датчиків, оцінці живучості сенсорних мереж. Проведено аналіз останніх наукових досліджень

стосовно даних питань та виявлено фактори, які не враховувалися у даних дослідженнях. Наведено математичну постановку задачі у загальному вигляді.

У другому розділі представлено методи знаходження оптимальних параметрів сенсорів (радіус покриття, діаметр перетину зон покриття) за яких досягається максимізація покриття території при мінімізації енерговитрат, вартості мережі та кількості використаних датчиків. Пошук оптимальних параметрів мережі сформульовано у вигляді оптимізаційних задач та доведено існування розв'язків даних задач. Також у другому розділі представлено методи побудови траєкторій обльоту території з врахуванням критеріїв максимізації покриття, мінімізації енерговитрат, максимізації можливої цінності виявлених об'єктів вздовж траєкторії.

Методи оцінки живучості сенсорних мереж та виявлення вразливих елементів сенсорних мереж представлено у третьому розділі. Враховано пропускну спроможність елементів мережі. Також представлено алгоритм забезпечення живучості сенсорних мереж, що складаються як з динамічних так і з статичних датчиків та їхньої комбінації.

У четвертому розділі представлено метод програмованої оптимізації структури сенсорних мереж та описано розроблене програмне забезпечення у якому реалізовано розроблений метод. Архітектуру та варіанти використання розробленого програмного комплексу описано з використанням UML діаграм. Наведено приклади використання розроблених методів на конкретних сенсорних мережах та конкретних територіях. Аналіз отриманих результатів підтвердив ефективність розроблених та представлених у дисертаційній роботі методів.

Наукова новизна отриманих результатів:

1. Вперше запропоновано метод програмованої оптимізації структури сенсорних мереж, що дозволяє модифікувати мережу під час промислової експлуатації на основі принципів об'єктно-орієнтованого програмування;

2. Вперше запропоновано методи оптимізації покриття території сенсорною мережею за критеріями максимізації покриття, мінімізації енерговитрат та вартості мережі з використанням статичних та динамічних датчиків. На відміну

від існуючих підходів дані критерії враховуються одночасно, завдяки чому збільшується енергоефективність та рентабельність мережі;

3. Вперше запропоновано метод виявлення вразливих елементів сенсорної мережі та забезпечення живучості мережі за рахунок комбінацій статичних та динамічних датчиків. На відміну від існуючих підходів враховано пропускну спроможність елементів мережі, що підвищує точність оцінки живучості сенсорної мережі завдяки виявленню додаткових вразливих елементів.

Практичне значення отриманих результатів:

1. Розроблено кросплатформну динамічно приєднувану бібліотеку, що забезпечує інструментарій максимізації покриття території датчиками з мінімальними енерговитратами та вартістю мережі, побудови оптимальних траєкторій руху датчиків, оцінки та забезпечення живучості сенсорних мереж використання якого не залежить від цільової платформи користувача;

2. Створено програмний комплекс, який дозволяє будувати енергоефективні та рентабельні сенсорні мережі при максимізації покриття території статичними та динамічними датчиками. У програмному забезпеченні також реалізовано можливість оцінки та забезпечення живучості сенсорних мереж. Програмний продукт дозволяє наочне відображення вхідних даних та результатів за рахунок широкого спектру засобів візуалізації та може використовуватися для розв'язання широкого кола задач, пов'язаних з використанням сенсорних мереж;

3. Результати дисертаційного дослідження впроваджено в Інституті телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України (Додаток Г).

Ключові слова: програмована оптимізація, динамічно приєднувана бібліотека, програмний комплекс, енергоефективність сенсорних мереж, максимізація покриття території, мінімізація вартості сенсорних мереж, оптимальна траєкторія руху датчиків, живучість сенсорних мереж.

SUMMARY

Petrivskiy V. Models and methods of programmable optimization of the structure of sensor networks. - Qualifying scientific work, the manuscript.

PhD thesis in the field of knowledge 12 Information technologies in a specialty 121 Software engineering. – Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, 2022.

In today's technological world, sensors and sensor networks are widely used in many areas of human activity. The popularity of these systems is due to a wide range of advantages: small size, low energy consumption, variety of measurements, etc. However, when using sensors and sensor networks, there are problems with energy efficiency and cost of the network when maximizing coverage, building optimal routes when flying around the territory, and survivability of sensor networks.

The dissertation presents the developed methods and algorithms that allow to find sensor parameters (radius of coverage, size of intersection of coverage zones) that achieve maximum coverage of the territory with minimal energy consumption and network cost, build optimal trajectories of the territory, evaluate the survivability of the network with the detection of vulnerable network elements. By programmable optimization, we understand the possibility of changing network characteristics (radius of sensor coverage, cross-sectional diameter of coverage zones, topology) during network operation to achieve optimality according to certain criteria (energy efficiency, coverage, network cost). That is, at the stage of software design, we provide the possibility for the user to scale the structure and characteristics of the sensor network, assess survivability and identify vulnerable network elements at the stage of operation.

The first chapter of the dissertation is dedicated to the review of the current state of issues of territory coverage, optimization of energy consumption, modelling of sensor movement, and assessment of survivability of sensor networks. An analysis of the latest scientific research on these issues was carried out and factors that were not taken into account in these studies were identified. The general mathematical formulation of the problem is presented.

The second chapter presents the methods of finding optimal sensor parameters (radius of coverage, level of intersection of coverage zones), which maximize coverage

of the territory while minimizing energy consumption, network costs, and the number of sensors used. The search for optimal network parameters is formulated in the form of optimization problems, and the existence of solutions to these problems is proved. Also, the second chapter presents the methods of building flight trajectories of the territory taking into account the criteria of maximization of coverage, minimization of energy consumption, and maximization of the probable value of detected objects along the trajectory.

Methods for assessing the survivability of sensor networks and identifying vulnerable elements of sensor networks are presented in the third section. The bandwidth of network elements is taken into account. An algorithm for ensuring the survivability of sensor networks consisting of both dynamic and static sensors and their combination is also presented.

In the fourth chapter the method of programmed optimization of the structure of sensor networks and the developed software in which the presented method is implemented are presented. The functionality and architecture of the developed software complex is described using UML diagrams. Examples of the use of the developed methods on specific sensor networks and specific territories are given. The analysis of the obtained results confirmed the effectiveness of the methods developed and presented in the dissertation.

The scientific novelty of the obtained results:

1. For the first time, a method of programmed optimization of the structure of sensor networks is proposed, which allows modifying the network during industrial operation based on the principles of object-oriented programming;
2. For the first time, the methods of optimizing the coverage of the territory by the sensor network were proposed according to the criteria of maximizing the coverage, minimizing the energy consumption, and the cost of the network using static and dynamic sensors. Unlike existing approaches, these criteria are taken into account simultaneously, which increases the energy efficiency and profitability of the network;
3. For the first time, a method of detecting vulnerable elements of a sensor network and ensuring the survivability of the network due to combinations of static and

dynamic sensors is proposed. In contrast to existing approaches, the bandwidth of network elements is taken into account, which increases the accuracy of assessing the survivability of the sensor network due to the detection of additional vulnerable elements.

The practical significance of the obtained results:

1. A cross-platform dynamically connected library has been developed, which provides a toolkit for maximizing the coverage of the territory by sensors with minimal energy consumption and network cost, building optimal trajectories of sensor movement, assessing and ensuring the survivability of sensor networks, the use of which does not depend on the user's target platform;

2. A software complex has been created that allows for building energy-efficient and cost-effective sensor networks while maximizing the coverage of the territory with static and dynamic sensors. The functionality of assessing and ensuring the survivability of sensor networks is also implemented in the software. The software product allows visual display of input data and results through a wide range of visualization tools and can be used to solve a wide range of problems related to the use of sensor networks;

3. The results of the dissertation research were implemented in the Institute of Telecommunications and Global Information Space of the National Academy of Sciences of Ukraine (Appendix D).

Keywords: programmable optimization, dynamic link library, software complex, energy efficiency of sensor networks, maximization of territory coverage, minimization of cost of sensor networks, optimal trajectory of sensor movement, survivability of sensor networks.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

Статті у наукових фахових виданнях України:

(які входять до переліку МОН України)

1. Development of a modification of the method for constructing energy-efficient sensor networks using static and dynamic sensors / V. Petrivskyi et al. *Eastern-European journal of enterprise technologies*. 2022. Vol. 1, no. 9(115). P. 15–23. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.252988> (Scopus, Категорія «А»).
2. Information technology to ensure the survivability of sensor networks / V. Y. Petrivskyi et al. *Problems in programming*. 2021. No. 4. P. 062–069. ISSN 1727-4907. URL: <https://doi.org/10.15407/pp2021.04.062>.
3. Петрівський В., Шевченко В., Бражиненко М. Збільшення часу роботи датчиків шляхом регулювання енерговитрат. *Системи обробки інформації*. 2019. № 3(158). С. 36–41. ISSN 1681-7710. URL: <https://doi.org/10.30748/soi.2019.158.04>.

Статті в іноземних виданнях:

(статті у періодичних наукових виданнях, проіндексованих у базах даних Web of Science Core Collection та/або Scopus (крім видань держави, визнаної Верховною Радою України державою-агресором))

4. Petrivskyi V., Bychkov O., Martsenyuk V. Proving the existence of solutions to the problems of minimizing the energy consumption of sensor networks. *Applied sciences*. 2022. Vol. 12, no. 15. P. 7687. URL: <https://doi.org/10.3390/app12157687> (Scopus, Q2).
5. A method for maximum coverage of the territory by sensors with minimization of cost and assessment of survivability / V. Petrivskyi et al. *Applied sciences*. 2022. Vol. 12, no. 6. P. 3059. URL: <https://doi.org/10.3390/app12063059> (Scopus, Q2).
6. Models and information technologies of coverage of the territory by sensors with energy consumption optimization / V. Petrivskyi et al. *Mathematical modeling and*

simulation of systems. MODS 2021. Lecture notes in networks and systems. 2022. Vol. 344. P. 17–30 (Scopus).

7. Information Technology for Big Data Sensor Networks Stability Estimation / V. Petrivskyi et al. *Information & Security: An International Journal*. 2020. Vol. 47, no. 1. P. 141–154. URL: <https://doi.org/10.11610/isij.4710>.

Одноосібний розділ у монографії:

8. Петрівський В. Збільшення часу роботи датчиків небезпечних ситуацій шляхом регулювання енерговитрат. *Прикладні програмні технології ІоЕ, як фундамент BigData: монографія* / ред. В. Шевченко. Київ, 2021. С. 172–176.

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

9. Оптимізація траєкторії руху датчиків з урахуванням важливості ділянок території моніторингу та ймовірності виявлення об'єктів / В. Петрівський та ін. *Проблеми керування та інформатики*. 2022. № 2. С. 6–22. URL: <http://doi.org/10.34229/2786-6505-2022-2-1> (Категорія «А»).

10. Інформаційна технологія покриття території датчиками із заданим рівнем перетину та мінімізацією витрат / В. Петрівський та ін. *Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка*. 2020. № 68. С. 65–72. ISSN 2524-0056. URL: <https://doi.org/10.17721/2519-481X/2020/68-07>.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

11. The concept of systems survivability in the Internet of Everything case / V. Petrivskyi et al. *MSTIoE 2021-8. 8-ма Східно-Європейська конференція “Математичні та програмні технології Internet of Everything”*, Київ. 2021. P. 16–18.

12. Petrivskyi V., Shevchenko V., Vyckov O. Mathematical modeling of random motion of IoE sensors based on rectilinear motion. *MSTIoE 2020-1 6-th East*

European Conference on Mathematical Foundations and Software Technology of Internet of Everything, Київ, 2020. P. 93.

13. Information technology for determining the optimal sensor trajectory in already covered area case / V. Petrivskyi et al. *MITAV 2020. The international conference of mathematics, information technologies and applied sciences*, Brno, 17–18 June 2020. Brno, 2020, ISBN 978-80-7582-307-6.

14. Models and information technologies of coverage of the territory by sensors with energy consumption optimization / V. Petrivskyi et al. *Математичне та імітаційне моделювання систем: МОДС 2021: тези доповідей Шістнадцятої міжнародної науково-практичної конференції*, Чернігів, 28 June – 1 July 2021. Чернігів, 2021. P. 30–33.

15. CAD technology for optimal territory covering / V. Petrivskyi et al. *2021 IEEE 16th International Conference on the Experience of Designing and Application of CAD Systems (CADSM)*, Lviv, Ukraine, 22–26 February 2021. 2021. URL: <https://doi.org/10.1109/cadsm52681.2021.9385223>. (Scopus)

16. Огляд поняття живучості систему контексті концепції Інтернету всього / В. Петрівський та ін. *Інформаційні технології –2021 : зб. тез VIII Всеукр. науково-практ. конф. молодих науковців*, м. Київ, 20 трав. 2021 р. Київ, 2021. С. 133–134.

17. Petrivskyi V., Pyzh O. A smart dust technology structure and applications overview. *Information Technology and Interactions (Satellite) : Conference Proceedings*, Kyiv, 2 December 2021 / ed. by V. Snytyuk. Kyiv, 2021. P. 120–122.

18. Information Technology for Big Data Sensor Networks Stability Estimation / V. Petrivskyi et al. *Information & Security: An International Journal* 47, Varna, 30 September – 2 October 2020. Varna, 2020. P. 141–154.

19. Information Technology of the Increasing Sensors Term of Use Considering Their Movement / V. Petrivskyi et al. *2020 IEEE XVIth International Conference on the Perspective Technologies and Methods in MEMS Design (MEMSTECH)*, Lviv, Ukraine, 22–26 April 2020. 2020. URL: <https://doi.org/10.1109/memstech49584.2020.9109431>. (Scopus)

20. Петрівський В., Шевченко В. Переваги використання мобільних мереж п'ятого покоління у концепції інтернету речей. *Всеукраїнська науково-технічна конференція «Застосування програмного забезпечення в інфокомунікаційних технологіях»*. Збірник тез, м. Київ, 9 лют. 2020 р. Київ, 2020. С. 38.

21. Estimation of Noise Hazards in Environmental Monitoring Tools Designe in the Subway / V. Petrivskyi et al. *2019 IEEE 15th International Conference on the Experience of Designing and Application of CAD Systems (CADSM)*, Polyana, Ukraine, 26 February – 2 March 2019. 2019. URL: <https://doi.org/10.1109/cadsm.2019.8779315>. (Scopus).

ЗМІСТ

СКРОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ	15
ВСТУП.....	16
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ПИТАНЬ ПОКРИТТЯ ТЕРИТОРІЇ, ОПТИМІЗАЦІЇ ВИТРАТ, МОДЕЛЮВАННЯ РУХУ ТА ОЦІНКИ ЖИВУЧОСТІ СЕНСОРІВ ТА СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ	24
1.1 Датчики як елементи сучасного технологічного світу	24
1.2 Аналіз підходів покриття території.....	27
1.3 Огляд підходів пошуку оптимальної траєкторії руху	31
1.4 Огляд результатів досліджень проблеми оптимізації енерговитрат датчиками	35
1.5 Огляд питання живучості сенсорних мереж	40
1.6 Математична постановка задачі	44
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1	45
РОЗДІЛ 2. МОДЕЛІ ТА АЛГОРИТМИ ПОКРИТТЯ ТЕРИТОРІЇ СЕНСОРАМИ З МІНІМІЗАЦІЄЮ ЕНЕРГОВИТРАТ	47
2.1 Моделі та алгоритми оптимізації енерговитрат сенсорних мереж.....	47
2.1.1 Мінімізація енерговитрат сенсорної мережі шляхом регуляції радіусу покриття у випадку статичних сенсорів	47
2.1.2 Мінімізація енерговитрат сенсорної мережі шляхом регуляції радіусу покриття у випадку динамічних сенсорів	52
2.1.3 Оцінка ефективності покриття та підходи обчислення площі покритої датчиками території у випадку стаціонарних та динамічних датчиків.....	57
2.2 Методи максимального покриття території сенсорами з оптимізацією енерговитрат, вартості мережі та кількістю використаних сенсорів.....	60
2.2.1 Методи максимального покриття території сенсорами з оптимізацією енерговитрат та кількістю використаних сенсорів.....	60
2.2.2 Метод максимального покриття території сенсорами з оптимізацією вартості мережі.....	70
2.3 Алгоритми побудови оптимальної траєкторії руху датчиків.....	74

2.3.1 Побудова оптимальної траєкторії руху датчиків з використанням принципів динамічного програмування	74
2.3.2 Побудова оптимальної траєкторії руху датчиків з використанням сіткового методу	80
2.3.3 Метод побудови оптимальної траєкторії руху датчиків з урахуванням важливості ділянок території та ймовірності виявлення об'єктів	84
2.3.4 Забезпечення квазіхаотичності траєкторій з використанням дивних атракторів.....	96
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2	99
РОЗДІЛ 3. АЛГОРИТМИ ОЦІНКИ ТА ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЖИВУЧОСТІ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ	100
3.1 Оцінка живучості та виявлення вразливих елементів сенсорних мереж.....	100
3.2 Оцінка живучості мереж розповсюджених топологій	108
3.3 Алгоритм забезпечення живучості сенсорних мереж.....	118
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3	123
РОЗДІЛ 4. ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПРОГРАМОВАНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ СТРУКТУРИ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ.....	124
4.1 Метод програмованої оптимізації структури сенсорних мереж.....	124
4.2 Опис використаних технологій та особливості реалізації програмного забезпечення	126
4.3 Апробація методу програмованої оптимізації структури сенсорних мереж.....	144
4.3.1 Оптимізація енерговитрат сенсорної мережі	144
4.3.2 Максимізація покриття території з мінімізацією енерговитрат при заданому діаметрі перетину зон покриття та обмеженням кількості датчиків	150
4.3.3 Побудова оптимальних траєкторій руху датчиків	154
4.3.4 Побудова оптимальної траєкторії руху датчиків з урахуванням важливості ділянок території та ймовірності виявлення об'єктів	161

4.3.5 Аналіз кількості об'єктів території та виграшу ефективності в залежності від гетерогенності при різних значеннях кроку під час побудови траєкторій руху датчиків з урахуванням можливої цінності виявлених об'єктів.....	165
4.3.6 Забезпечення псевдохаотичності траєкторій	168
4.2.7 Оцінка живучості сенсорних мереж	172
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 4	177
ВИСНОВКИ.....	179
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	183
ДОДАТОК А	196
ДОДАТОК Б	201
ДОДАТОК В	210
ДОДАТОК Г	214

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ

IoE	Internet of Everything (Інтернет всього, Всеохоплюючий Інтернет)
IoT	Internet of Things (Інтернет речей)
IT	Information technology (Інформаційні технології)
WSN	Wireless sensor network (Бездротова сенсорна мережа)
БПЛА	Безпілотний літаючий апарат
БСМ	Бездротова сенсорна мережа
ІС	Інформаційна система
ЛА	Літальний апарат
УПМ	Управління з прогнозованими моделями

ВСТУП

Актуальність теми. Обґрунтування вибору теми дослідження. У сучасному технологічному світі сенсори та сенсорні мережі набули широкого використання завдяки невеликому розміру, низьким енерговитратам, мобільності, різноманіттю вимірюваних величин (температура, тиск, швидкість, освітленість, частка досліджуваної речовини у середовищі, звукові характеристики, тощо). До задач, що вирішуються з використанням сенсорів та сенсорних мереж, відносять задачі моніторингу (накопичення та обробка даних), розпізнавання та ідентифікація, спостереження. Ефективність сенсорної мережі залежить від об'єму інформації, яку вона спроможна накопичувати, що в свою чергу досягається завдяки максимальному покриттю території, що розглядається. Під час проектування сенсорних мереж варто враховувати перетин зон покриття датчиків як необхідну умову обміну даними між вузлами мережі (сенсорами, датчиками). Максимізація покриття території може досягатися шляхом застосування додаткових датчиків, зміни позиції датчиків, зміни радіусу покриття датчиків. Наслідком використання додаткових сенсорів та збільшення радіусів покриття сенсорів є збільшення загальної вартості та енерговитрат мережі. У випадку рухомих датчиків максимізація покриття та енергоефективність досягається шляхом побудови траєкторії мінімальної довжини, що максимально охоплює територію. Варто відмітити, що однією з основних актуальних задач, що вирішується з використанням сенсорів та сенсорних мереж є задача моніторингу. Завдяки можливості використання у обставинах та умовах, що є несприятливими та небезпечних для людини, сенсори та сенсорні мережі набули широкого використання у сучасному технологічному світі. Тому доцільним є максимізація часу автономної роботи датчиків та максимальне покриття територій. Також, як і будь-яка система, сенсорна мережа повинна відповідати умові живучості, забезпечення якої полягає у виявленні та усуненні вразливих компонентів мережі. Саме тому розробка методів побудови енергоефективних сенсорних мереж, побудови траєкторій обльоту територій, оцінки живучості та виявленню вразливих

елементів сенсорних, а також реалізація даних методів у вигляді доступного програмного комплексу мереж є актуальною проблемою на сучасному етапі технологічного розвитку.

Під програмованою оптимізацією розуміємо можливість зміни характеристик мережі (радіус покриття датчиків, діаметр перетину зон покриття, топологія) під час функціонування мережі для досягнення оптимальності за певними критеріями (енергоефективність, покриття, вартість мережі). Тобто, на етапі проектування програмного забезпечення ми закладаємо можливість масштабування користувачем структури та характеристик сенсорної мережі, оцінки живучості та виявлення вразливих елементів мережі на етапі експлуатації.

Питанню оптимального розташування датчиків, що забезпечує максимальне покриття території та побудові оптимальних траєкторії руху датчиків присвячені роботи вчених Данилюка С.Л., Аношкіна О.А., Єгорова Л.Л., Кологривова В.А., Астакова С.Н., Залюбовського В.В., Лисенка О.І, Білоглазова Д.А., Пшихопова В.Х., Миклуха В., Бережний А.О., Ліго Т., Castello С.С., Maccsimovic M., Bianco S., Arbesser-Rastburg G., Hamedі M.R., Aral M.M., Li С.Н., Hoster E, Wu H., Liu Z., Hu J., Yi X.H, Zhang Q., Liu B., Ejim S., та інших. Нажаль в цих роботах недостатньо приділена увага питанням забезпеченню енергоефективності та мінімізації вартості мережі. Також у вказаних роботах перетин зон покриття датчиків не розглядається як один із визначаючих параметрів при побудові покриття та траєкторій руху.

У роботах Коваленка І.Г., Романюка В.А., Шкіля О.С., Краснобаєва В.А., Єрзіна А.І., Peng S., Upreti R., Rauniyar A., Mao Y., Li X., Razzaq M., Xiong Y., Li J. розглянуто питання забезпечення енергоефективності сенсорних мереж. У описаних роботах недостатньо зосереджена увага питанням максимізації покриття території та мінімізація мережі вартості при забезпеченні енергоефективності мережі. Перетин зон покриття сенсорів також не враховано.

Як і будь-яка інформаційна система, сенсорна мережа повинна відповідати умові живучості, що полягає у здатності системи ефективно функціонувати за наявності ушкоджень або відновлювати цю здатність за визначений проміжок часу. Питанню забезпечення живучості інформаційних систем присвячені роботи

вітчизняних вчених Ланде Д.В. та Додонова А.Г. Серед зарубіжних вчених варто відзначити роботи Громов Ю.Ю., Драчев В.О., Набатов К.А., Thein M., Thein T., Zhang Y, Patridou P.G., Parvin S., Liu Z., Li X., Wang L., Zhang Y. та інші. Проте, в цих роботах недостатньо приділена увага питанням оцінки живучості сенсорних мереж в умовах втрати елементів (сенсорів) та каналів зв'язку між елементами мережі. Також не враховано пропускні спроможності елементів мережі та каналів зв'язку між цими елементами.

Аналіз існуючих досліджень щодо забезпечення енергоефективності, мінімізації вартості, максимізації покриття, оцінці та забезпечення живучості сенсорних мереж дозволив виявити протиріччя між необхідністю одночасного врахування описаних вище критеріїв при побудові сенсорних мереж та відсутністю сучасних теоретичних та практичних підходів, що одночасно враховують дані критерії.

Для розв'язання вказаного протиріччя в дисертаційній роботі поставлена та розв'язана нова актуальна науково-прикладна проблема, яка полягає в розробці моделей, методів, алгоритмів та інформаційної технології для пошуку параметрів мережі, з використанням яких досягається одночасна максимізація покриття території, мінімізація енерговитрат та вартості сенсорних мереж з можливістю оцінки живучості отриманої системи. Актуальність вирішення вказаної науково-прикладної проблеми у тому, що стане доступним інструмент побудови енергоефективних сенсорних мереж мінімальної вартості, що забезпечують максимальне покриття території з можливістю оцінки та забезпечення живучості мережі актуальною проблемою.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, грантами.

Дисертаційна робота виконана відповідно до поточних та перспективних планів наукової та науково-технічної діяльності Київського національного університету імені Тараса Шевченка, «Основних наукових напрямів та найважливіших проблем фундаментальних досліджень у галузі природничих, технічних і гуманітарних наук НАН України на 2015-2018 роки» та «Основних наукових напрямів та найважливіших проблем фундаментальних досліджень у

галузі природничих, технічних і гуманітарних наук НАН України на 2019-2023 роки».

Здобувач брав участь як виконавець у кафедральній науково-дослідній роботі «Математичні та програмні технології Інтернету всього», етап 3 «Захищена система автоматичного керування безпілотними літальними апаратами як технологія ІоЕ» (№ 0117U002908) у 2017-2020 роках.

Здобувач брав участь як виконавець у кафедральній науково-дослідній роботі «Математичні методи та програмне забезпечення аналітики великих даних у реальному світі» (№ 0121U113611) у 2021-2024 роках.

Мета і завдання дослідження. Мета дисертаційної роботи полягає у підвищенні енергоефективності сенсорних мереж з можливістю оцінки та забезпечення їх живучості.

Для досягнення поставленої мети вирішено наступні завдання:

- аналіз методів забезпечення енергоефективності, максимізації покриття, оцінки та забезпечення живучості сенсорних мереж;
- розробити методи знаходження параметрів елементів мережі, з використанням яких досягається максимальне покриття території при мінімальних енерговитратах та вартості мережі у випадку статичних датчиків;
- розробити методи побудови траєкторій обльоту території за яких досягається максимальне покриття території при мінімальних енерговитратах у випадку динамічних датчиків;
- розробити метод оцінки живучості сенсорних мереж у випадку втрати датчику або каналу зв'язку з врахуванням пропускнуої спроможності елементів мережі;
- розробити метод забезпечення живучості сенсорних мереж;
- реалізувати розроблені методи у вигляді динамічно приєднуваної бібліотеки та відповідного програмного комплексу.

Об'єкт дослідження – проектування структури сенсорних мереж.

Предмет дослідження – моделі, методи та програмне забезпечення мінімізації енерговитрат та вартості сенсорних мереж, максимізації покриття сенсорних мереж, побудови оптимальних траєкторій обльоту території, оцінювання та забезпечення живучості сенсорних мереж.

Методи дослідження: емпіричні(експеримент, опис), наукові (формалізація) та загальні(аналіз, синтез, моделювання). Для досягнення поставлених в дисертаційній роботі використано теорію оптимізації, теорію графів, імітаційне моделювання, теорію алгоритмів, теорію програмування.

Наукова новизна отриманих результатів:

1. Вперше запропоновано метод програмованої оптимізації структури сенсорних мереж, що дозволяє модифікувати мережу під час промислової експлуатації, на основі принципів об'єктно-орієнтованого програмування. На відміну від існуючих методів розроблений метод дозволяє масштабувати структуру та характеристики сенсорної мережі, оцінювати живучість та виявляти вразливі елементи мережі на етапі проектування;

2. Вперше запропоновано методи оптимізації покриття території сенсорною мережею за критеріями максимізації площі покриття сенсорної мережі, мінімізації енерговитрат та вартості мережі з використанням статичних та динамічних датчиків. На відміну від існуючих підходів дані критерії враховуються одночасно, завдяки чому збільшується енергоефективність та рентабельність мережі;

3. Вперше запропоновано метод виявлення вразливих елементів сенсорної мережі та забезпечення живучості мережі за рахунок комбінацій статичних та динамічних датчиків. На відміну від існуючих підходів враховано пропускну спроможність елементів мережі, що підвищує точність оцінки живучості сенсорної мережі завдяки виявленню додаткових вразливих елементів.

Практичне значення отриманих результатів:

1. Розроблено кросплатформну динамічно приєднувану бібліотеку, що забезпечує інструментарій максимізації покриття території датчиками з

мінімальними енерговитратами та вартістю мережі, побудови оптимальних траєкторій руху датчиків, оцінки та забезпечення живучості сенсорних мереж використання якого не залежить від цільової платформи користувача;

2. Створено програмний комплекс, який дозволяє будувати енергоефективні та рентабельні сенсорні мережі при максимізації покриття території статичними та динамічними датчиками. У програмному забезпеченні також реалізовано можливість оцінки та забезпечення живучості сенсорних мереж. Програмний продукт дозволяє наочне відображення вхідних даних та результатів за рахунок широкого спектру засобів візуалізації та може використовуватися для розв'язання широкого кола задач, пов'язаних з використанням сенсорних мереж;

3. Результати дисертаційного дослідження впроваджено в Інституті телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України (Додаток Г).

Особистий внесок здобувача. Результати дисертації отримані здобувачем особисто. У публікаціях здобувачеві належать такі результати: у статті [1] запропоновано метод побудови енергоефективних сенсорних мереж з використанням статичних і динамічних датчиків; у роботі [2] здобувачем представлено метод забезпечення живучості сенсорних мереж; у роботах [3, 8] здобувачем запропоновано метод збільшення часу роботи датчиків шляхом регулювання енерговитрат; у праці [4] доведено існування розв'язків задач мінімізації енерговитрат сенсорних мереж при максимізації покриття; у роботі [5] здобувачем представлено метод максимізації покриття території при мінімізації загальної вартості мережі та оцінка живучості мережі з врахуванням пропускної спроможності елементів мережі; у працях [6, 10, 11] запропоновано методи покриття території датчиками з врахуванням діаметру перетину зон покриття та мінімізацією енерговитрат мережі; у роботах [7, 18] запропоновано метод оцінки живучості сенсорних мереж; у роботі [9] представлено метод побудови траєкторії руху сенсору з врахуванням можливої (ймовірної) цінності виявлених об'єктів; у роботах [11, 16, 17, 20] описано живучість сучасних інформаційних систем Інтернету Речей, Інтернету Всього та розумного пилу; у праці [12] представлено

метод моделювання випадкового руху датчиків з використанням прямолінійного руху; у матеріалах [13, 19] автором представлено метод забезпечення енергоефективності сенсорних мереж з урахуванням руху датчиків; у роботі [15] автором запропоновано метод оптимального покриття території статичними та динамічними датчиками; у роботі [21] запропоновано метод оцінки рівня шумової небезпеки у метрополітені з використанням датчиків.

Апробація матеріалів дисертації. Основні результати дисертаційного дослідження доповідалися та обговорювалися на міжнародних та національних наукових та науково-практичних конференціях: 6-th, 8-th East European Conference on Mathematical Foundations and Software Technology of Internet of Everything (MSTIoE-2020, MSTIoE-2021, Київ 2020, 2021); 15th, 16th International Conference on the Experience of Designing and Application of CAD Systems (CADSM-2019, Поляна, 26.02.2019 – 02.03.2019, CADSM-2021, Львів, 22.02.2021 – 26.02.2021); XVIth International Conference perspective technologies and methods in mems design (MEMSTECH'2020, Львів, 22-26.04.2020); Всеукраїнська науково-технічна конференція «Застосування програмного забезпечення в інфокомунікаційних технологіях» (Київ, 2020); MITAV 2020. The international conference of mathematics, information technologies and applied sciences (Брно, 2020); Second International Scientific Conference “Digital Transformation, Cyber Security and Resilience” (DIGILIENCE 2020, Варна, 30.09.2020 – 02.10.2020); Математичне та імітаційне моделювання систем (МОДС-2021, Чернігів, 28.06.2021 – 01.07.2021); Information Technology and Interactions (Satellite): Conference Proceedings (Київ, 2021).

Публікації. Основні результати дисертаційної роботи опубліковано у 21 науковій праці:

- 9 наукових статей, з яких 2 статті опубліковано у закордонному фаховому виданні другого квартиля (Q2), яке проіндексоване в базі даних Scopus; 1 статтю опубліковано у фаховому виданні, яке проіндексоване в базі даних Scopus; 1 статтю опубліковано у періодичному науковому виданні держави, яка входить до Європейського Союзу; 2 статті опубліковано у виданні, включеному до переліку наукових фахових видань України з присвоєнням

категорії «А» , яке проіндексоване в базі даних Scopus; 3 статті опубліковано у фахових виданнях, включених до переліку наукових фахових видань України з присвоєнням категорії «Б»;

- 1 розділ у монографії (одноосібно);
- 11 тез доповідей на науково-технічних конференціях, з яких 3 проіндексовано у базі даних Scopus.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний роботи складає 214 сторінок, з них 166 основного тексту; робота містить 14 таблиць, 92 рисунки, 4 додатки, список використаних джерел із 131 найменування.

РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ПИТАНЬ ПОКРИТТЯ ТЕРИТОРІЇ, ОПТИМІЗАЦІЇ ВИТРАТ, МОДЕЛЮВАННЯ РУХУ ТА ОЦІНКИ ЖИВУЧОСТІ СЕНСОРІВ ТА СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ

1.1 Датчики як елементи сучасного технологічного світу

На сучасному етапі розвитку технологій сенсори та сенсорні мережі широко використовуються у всіх галузях людської діяльності та виконують ряд завдань [91]: накопичення та обробка інформації (моніторинг), вимірювання величин(тиск, температура, вологість, насичення, тощо) [81, 122, 123], спостереження, розпізнавання та ідентифікація. Серед основних переваг сенсорів експерти виділяють такі як невеликий розмір, мобільність, зручність у використанні, можливість кросплатформної розробки програмного забезпечення, невеликі енерговитрати [94] (Рис. 1.1):

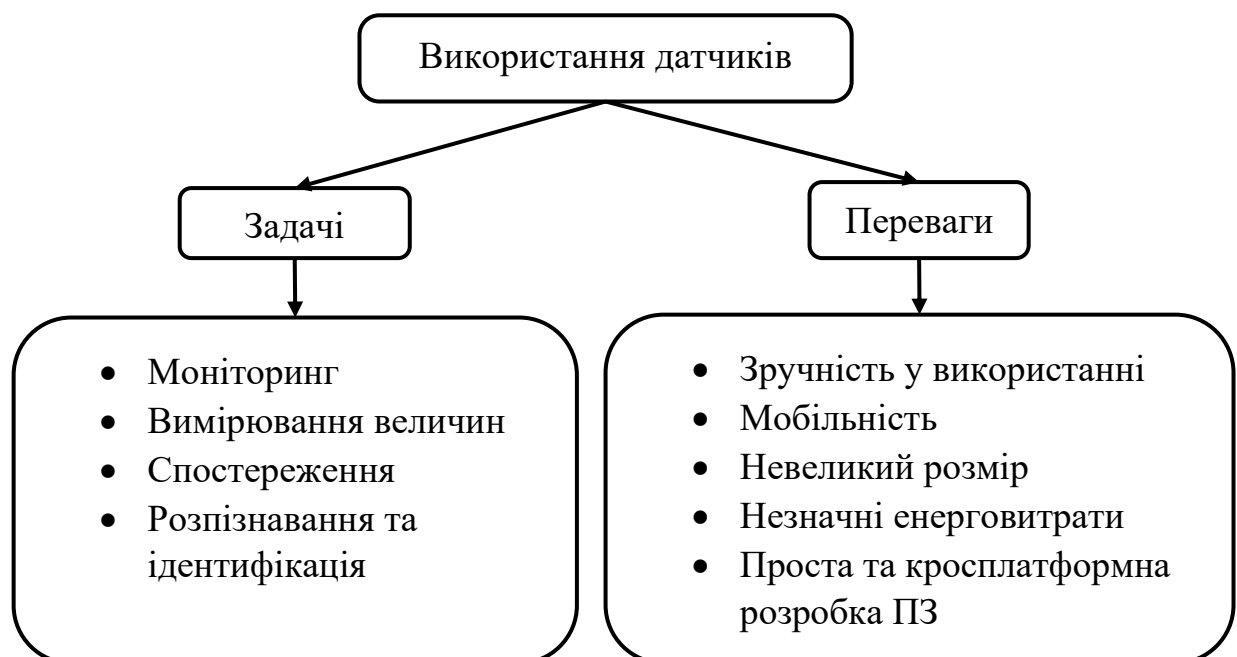


Рисунок 1.1 – Переваги та задачі використання датчиків

Сенсори є невід’ємною частиною концепцій Інтернету Речей та Інтернету всього. Згідно з [48] Інтернет Речей (Internet of Things, IoT) – це концепція мережі, що складається з взаємопов’язаних пристроїв, що мають вбудовані датчики та

здійснюють передачу даними між собою та між зовнішнім світом за допомогою мережі інтернет. Більш широким поняттям є Інтернет Всього (Internet of Everything, IoE), що об'єднує не тільки неживі предмети, а й людей, процеси і дані [78-80]. Схематично склад концепції Інтернету Всього можна зобразити наступним чином (Рис. 1.2):

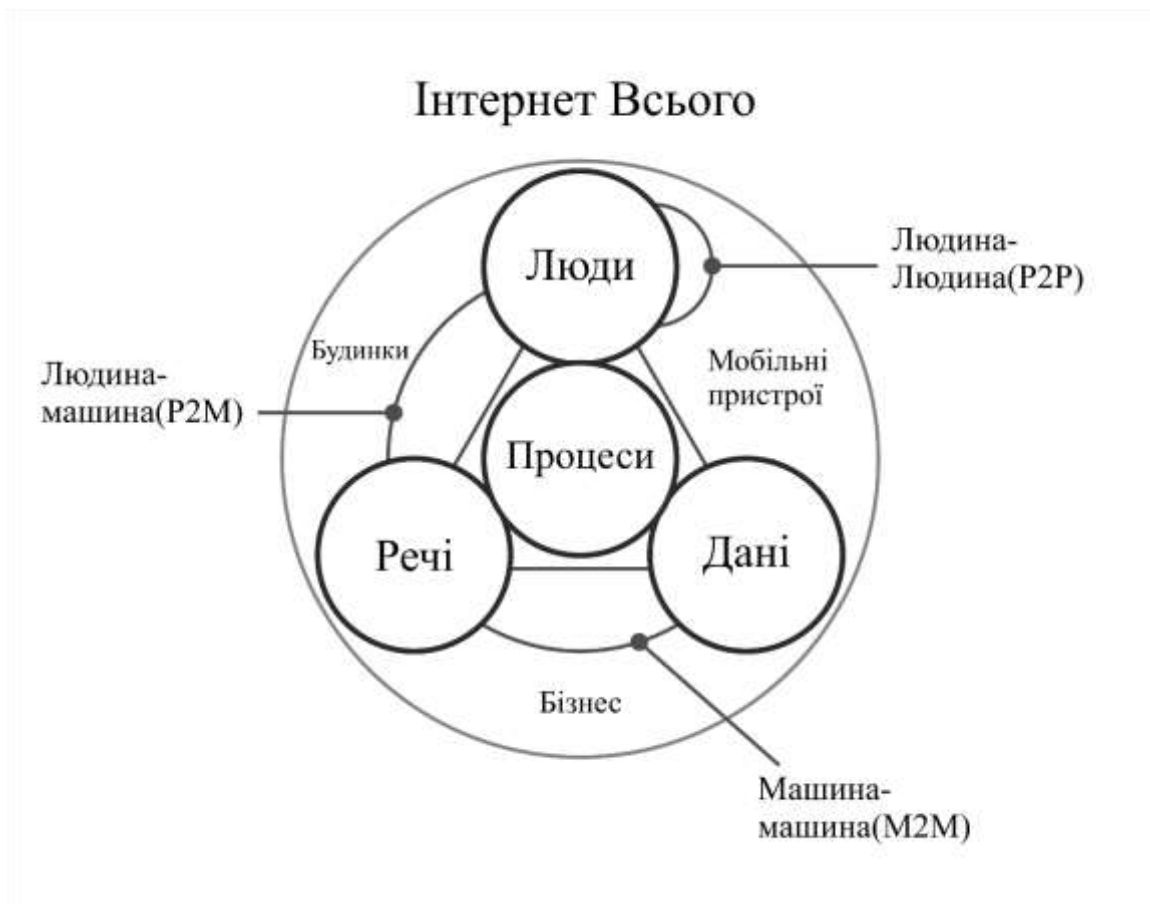


Рисунок 1.2 – Складові концепції Інтернету Всього [80]

Одними із ключових елементів даних концепцій є речі, тобто датчики та дані – інформація, що акумулюється датчиками. Сукупність сенсорів, що виконують однакову задачу та взаємопов'язані між собою називають сенсорною мережею (Wireless Sensor Network, WSN) [23].

Також слід відзначити концепцію бездротової сенсорної мережі як розумний пил (smartdust). Дане поняття ввів Крістофер Пістер у 2001 році. Розумний пил – мережа, що складається з пристроїв достатньо малого розміру, що здатні самоорганізовуватись, та обмінюватись бездротовими сигналами і працювати як

єдина система [93]. Базові елементи «розумного пилу» називають моти (mote – порошок). В свою чергу, кожен мот володіє власними сенсорами, обчислювальним вузлом, підсистемами комунікації і енергопостачання. Групуючись, моти автоматично створюють гнучкі мережі з малим споживанням живлення. Галузі їх застосування можуть варіюватися від систем управління кліматом до пристроїв для розваг, взаємодії з іншими інформаційними пристроями (Рис. 1.3).



Рисунок 1.3 – Застосування розумного пилу

У загальному мережа розумного пилу складається з таких компонентів як моти, шлюз передачі даних, інтернет як спосіб передачі даних, дані, база даних для збереження даних, кінцевий спостерігач (Рис. 1.4). Кожен вузол мережі складається з процесору, радіопередатчику, акумулятора, з'єднанням з сенсорами [93].

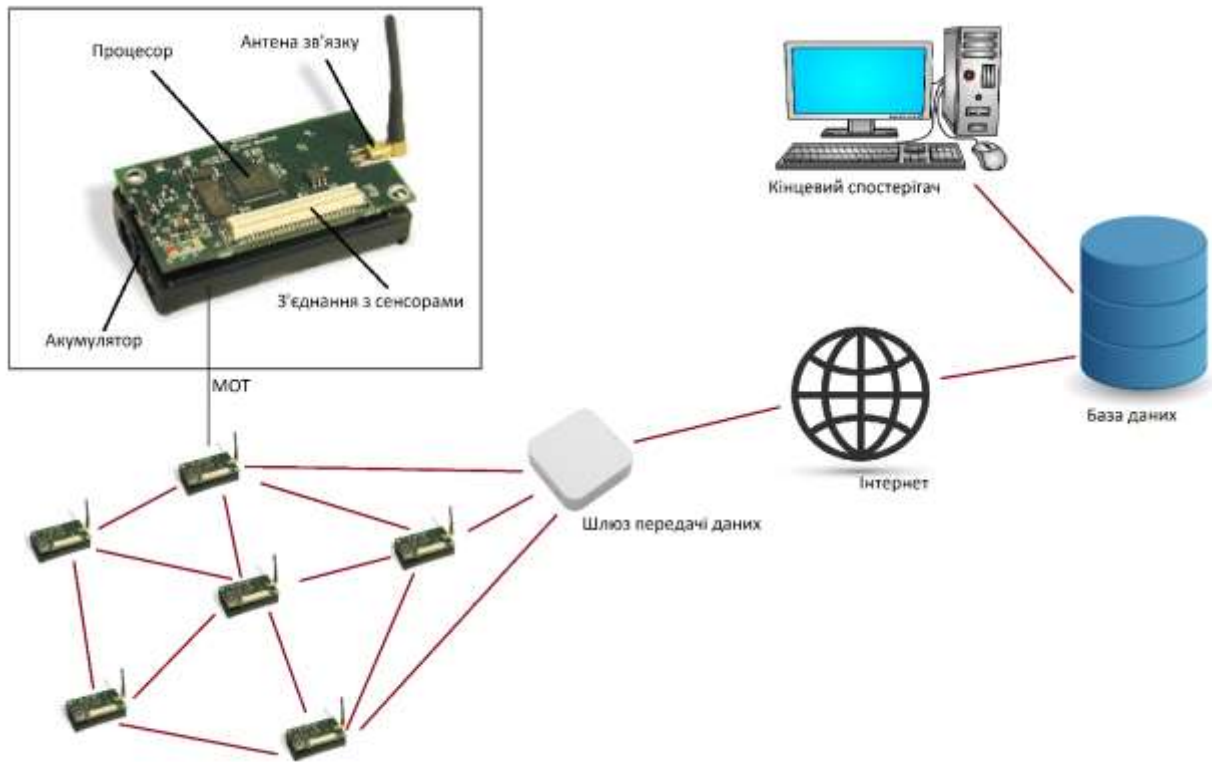


Рисунок 1.4 – Компонентний склад розумного пилу

У реальних умовах експлуатації деякі датчики можуть вийти з ладу у зв'язку з несприятливим впливом навколишнього середовища. Таким чином, актуальною проблемою є пошук оптимальних параметрів датчиків та оптимальних траєкторій обльоту території у випадку динамічних сенсорів. Отже, доцільним є розробка методів що забезпечують пошук оптимальних параметрів мережі та побудову оптимальних траєкторій обльоту території.

1.2 Аналіз підходів покриття території

Серед усіх завдань, що вирішуються з використанням сенсорів та сенсорних мереж ключовими є збір інформації. Очевидно, що для накопичення інформації датчик повинен бути розташований у певній точці території, що розглядається. Актуальною проблемою сучасних досліджень є пошук оптимального розташування датчику відповідно до певних критеріїв. Серед яких можна виділити геометрію області, розташування відносно інших датчиків, наявність перешкод,

радіус покриття датчику. Методи теорії графів використані у роботі [32], де запропоновано алгоритм пошуку найменшого покриття на основі методу побудови повного навантаженого графу. Доведено ряд лем стосовно найменшого покриття. Аналогічний метод використано у роботі [33] для знаходження найменшого покриття. Недоліком даних підходів є неврахування радіусів покриття датчиків. Оптимізація розташування набору датчиків з метою максимізації загальної площі покриття, що базується на ітераційному генетичному алгоритмі для оптимізації скалярної метрики, обчисленої на основі просторової інтеграції зони впливу датчика описано у роботі [92].

У дослідженні [15] представлено алгоритм покриття території довільної геометрії сенсорами з радіусом покриття r шляхом апроксимації території ортогональним багатокутником. Також наведено порівняння евристичних підходів: блокова, гексагональна (псевдогексагональна) евристика покриття, еволюційна метаевристика. При цьому описуються датчики з однаковим радіусом покриття. Одним із застосувань сенсорів є протипожежна охорона. У праці [3] запропоновано математичні моделі та методи розв'язання оптимізаційних задач покриття сенсорами протипожежної охорони об'єктів контролю. Представлено програмний комплекс розв'язання поставленої задачі, що базується на використанні методу ϕ -функцій. Даний метод винайшов та вдосконалював Стоян Ю.Г. [27]. Також у роботі [99] представлено різні стратегії позиціонування вузлів у бездротових сенсорних мережах для виявлення пожежі (сітка, трикутник та смуга). Запропоновано розміщення датчиків й проектування мережі за критерієм максимізації терміну служби мережі після займання вогнем і досягнення повного охоплення за допомогою мінімальної кількості датчиків. Описані вище методи використовують апроксимацію території ортогональним багатокутником, що в свою чергу зменшує точність результатів, також не враховано можливість наявності датчиків з різним радіусом покриття. Датчики широко використовуються у задачах розподілу водних ресурсів. У дослідженні [66] описано алгоритм розв'язання задачі багатокритеріальної оптимізації розташування сенсорів у системах розподілу води. Серед оптимізаційних критеріїв: очікуваний час

виявлення, очікуваний обсяг забрудненої води, імовірність виявлення. Оптимальне розміщення датчиків тиску для локалізації витоків у системах розподілу води шляхом використання веб-інтерфейсу з вільним доступом представлено у праці [67]. Користувачі можуть самостійно розміщувати датчики. Розширено та впроваджено існуючий оптимальний алгоритм розміщення датчиків. Як наслідок, шляхом поступових ітерацій, датчики опиняються на оптимальних позиціях. Проте розробники та автори не враховують радіуси покриття датчиків. У роботі [95] представлений алгоритм оптимізації розташування датчиків для ідентифікації структурних пошкоджень, що поділяється на два етапи. Перший етап полягає у визначенні ключових частин у всій структурі за їх внеском у загальне структурне пошкодження. Другий етап - розміщення датчиків на вузлах, пов'язаних з цими ключовими частинами, для більш ефективного контролю можливих пошкоджень. Також пропонується методика вдосконаленої оцінки хребта (IRE) для ефективного протистояння помилкам даних через модальне усічення та шум вимірювання. У статті [97] запропоновано та досліджено метод збільшення чутливості сенсорних телекомунікаційних мереж, що заснований на контролі розміщення безпілотних літальних апаратів з огляду на швидкий і непередбачуваний рух мобільних абонентів, враховуючи якість обслуговування абонентів мобільного зв'язку та вдосконалений алгоритм пошуку квазіоптимального розміщення безпілотних літальних апаратів в одній обчислювальній процедурі. Відмінною рисою розробленого методу є поєднання математичних моделей оцінки зв'язності.

Широко застосовуються підходи багатокритеріальної оптимізації, одним з критеріїв яких є положення датчику. Дослідження [120] було зосереджено на оптимізації розміщення датчиків для вирішення проблеми покриття критичної мережі з двома цілями: точністю та вартістю. Запропоновано багатоцільову модель оптимізації для проблеми критичного покриття сітки при розташуванні приміщень з урахуванням проблеми покриття k , а також топологічної раціональності розподілу датчиків. Потім алгоритм NSGA-II був використаний для вирішення оптимізаційного моделювання розміщення датчиків. У роботі [82] представлено загальну структуру розміщення датчиків, в якій було розроблено та впроваджено

чотири методології шляхом інтеграції з інструментом оптимізації на основі генетичного алгоритму для полегшення оптимізації розміщення датчиків. Розроблено відповідний фреймворк. В свою чергу, в дослідженні [64] було запропоновано багатоцільовий чисельний метод для оптимального розміщення датчика, заснований на поєднанні критеріїв модального забезпечення та максимального напруження. Генетичний алгоритм був використаний для визначення розташування датчиків. Алгоритм прямого пошуку використано у праці [68]. У роботі [31] розглянуто задачу розміщення датчиків на різних об'єктах, яка зводиться до вирішення квадратичної системи рівнянь. Ця система рівносильна оптимізаційній задачі, в якій необхідно знайти точку глобального мінімуму. Для вирішення останнього завдання використовується метод точної квадратичної регуляризації.

Дослідження проводяться у питанні оптимального розташування сенсорів у тривимірному просторі. Так, у роботі [108] оптимальне розташування датчиків досягається шляхом мінімізації дисперсії просторового аналізу на основі випадково обраних точок, що представляють позицію датчиків. Адаптація методу градієнтного спуску для оптимізації положення та орієнтації датчиків для проблеми розміщення датчика у тривимірному просторі запропонована у роботі [76]. Новизна запропонованого методу полягає в поєднанні оптимізації градієнтного спуску з реалістичною моделлю, яка враховує як топографію навколишнього середовища, так і набір датчиків з направленим імовірнісним зондуванням. У описаних вище дослідженнях до уваги беруться лише сенсори з однаковим радіусом покриття.

Серед описаних вище досліджень ключовими недоліками є застосування сенсорів з однаковим радіусом покриття, не врахування енерговитрат та дослідження лише території, що є ортогональним багатокутником, або зводиться до даного багатокутника. Також не враховується необхідність перетину зон покриття датчиків для обміну інформацією. У зв'язку з цим, створення моделей та інформаційних технологій, що враховують дані фактори є актуальною проблемою.

1.3 Огляд підходів пошуку оптимальної траєкторії руху

У задачі покриття території слід враховувати покриття території з використанням мобільних(динамічних, рухомих) сенсорів. Із міркувань економічної та технічної ефективності, сенсори як правило розташовуються на мобільних технічних засобах. Прикладом таких технічних засобів можуть слугувати безпілотні літальні апарати(БПЛА). Актуальною проблемою при використанні динамічних датчиків є пошук оптимального маршруту та оптимального керування. Теорія оптимального керування розвивалася паралельно багатьма вченими: Лагранж, Понтрягін та його учні [40], Кротов [37], Красовський [35]. Серед класичних джерел слід виокремити праці Брайсона, Хо Ю-ши [12], Мейсона [13]. Також слід відзначити широке застосування принципу динамічного програмування Р.Беллмана та варіаційного числення [6, 110]. Забезпечення максимального покриття території при плануванні оптимального маршруту є ключовою проблемою. Слід також враховувати наявність перешкод та вже покритої території.

У роботі [104] проаналізовано деякі класичні алгоритми планування шляху 2D-сітки в дискретних доменах (тобто A^* і A^* з обробкою повідомлення) та новіші алгоритми в континуальних доменах (тобто Θ^* та $S\text{-}\Theta^*$). Враховуючи різницю цих алгоритмів, запропоновано опис даних алгоритмів під різними критеріями: час виконання, кількість змін заголовків, кількість розширених вершин та довжина шляху. Дані алгоритми не враховують радіус покриття датчику. Реалізацію жадібного алгоритму комівояжера запропоновано у праці [77]. У нашому випадку розглядається схожа лінійна задача пошуку оптимальної траєкторії руху датчиків, але ключовою відмінністю є врахування радіусу покриття сенсору та енерговитрат. Огляд алгоритмів пошуку маршруту при динамічному моделюванні траєкторії руху з урахуванням перешкод наведено у роботах [60, 25]. Алгоритм гібридного планування шляху для ефективного збору даних забезпечення найкоротшого шляху без зіткнень для БПЛА в аварійних умовах запропоновано у матеріалах [116]. У запропонованій схемі, алгоритм імовірнісної

дорожньої карти використовується для створення найкоротшої карти траєкторії руху сенсорів та оптимізований алгоритм штучної бджолиної сім'ї використовується для поліпшення різних обмежень шляху в тривимірне середовище. Але автори не враховують енерговитрати датчиків. У роботі [106] вирішується завдання планування траєкторії безпілотного літального апарата та запропоновано метод, що дозволяє на основі моделі динаміки польоту та допустимого управління визначити обмеження на геометрію траєкторії. Це дозволяє враховувати форму території, але не забезпечує енергоефективність. Результати дослідження [118], що полягають у створенні моделі багатопланового обмеження та моделі цільового планування літаків з двома цілями для потреб космічного польоту в реальному часі, динамічних змін польового середовища з часом, вимог точності помилок позиціонування в зоні безпеки та обмеження на мінімальний радіус повороту можуть бути використані для потреб динамічних датчиків. У [2] запропоновано алгоритми оптимізації маршруту польоту літального апарату при обході стаціонарної небезпечної зони. Оптимізація маршруту обходу включає виконання процедур пошуку безпечного коридору і побудови маршруту обходу з мінімальною довжиною. Оптимізація маршруту перехоплення заснована на визначенні аналітичної залежності дальності проникнення від усереднених значень висотно-швидкісних характеристик кожної з ділянок маршруту і на знаходженні умов мінімальної дальності проникнення. У запропонованих методах не враховуються радіуси покриття сенсорів. Гібридний алгоритм ситуаційного планування траєкторії в умовах часткової невизначеності для двовимірного простору, заснований на інтеграції хвильового і мурашиного алгоритмів, що дозволяє будувати в реальному масштабі часу траєкторії мінімальної довжини з одночасною оптимізацією інших критеріїв якості побудованого шляху описано у праці [39].

Серед досліджень у галузі моделювання та знаходження оптимальної траєкторії руху літальних апаратів слід відзначити роботи таких вчених як Пшихопов В.Х., Медведев М.Ю., Белоглазов Д.А. [7]. У монографії [46] розглядаються сучасні методи інтелектуального планування траєкторій рухомих

об'єктів на плоских середовищах зі стаціонарними перешкодами. Наводиться огляд методів планування траєкторій, що включає графо-аналітичні, нейромережеві, нечіткі і біонічні методи, а також генетичні процедури пошуку. Пропонуються критерії оцінки якості, за якими проводиться порівняльний аналіз методів. Розвиток методів планування траєкторії переміщення рухомих об'єктів шляхом розробки планувальника руху мобільного автономного робота на основі апарату нечіткої логіки розглядаються у роботі [24]. У дослідженні [117] запропоновано підхід покращення енергоефективності сенсорних мереж на основі нечіткої логіки у поєднанні з алгоритмом Дейкстри.

Мета проведення досліджень, що представлені у матеріалах [96], полягає в аналітичному синтезі закону управління для безпілотного літального апарату в разі, коли відбувається наведення його по траєкторії, яка задана опорними точками простору. Проводиться аналіз існуючих різних підходів до формування заданої траєкторії польоту безпілотного літального апарату, заснованих на різній математичній постановці завдання. Для досягнення поставленої мети траєкторія польоту розглядається як така, що складається з окремих інтервалів, на кожному з яких вирішується завдання оптимізації управління. Обґрунтовано критерій оптимізації в загальному вигляді та подання його в формі квадратичного функціоналу якості, зручного для аналітичного синтезу управління. У якості складових функціоналу розглядаються параметри відхилення траєкторії польоту літального апарату від заданих точок простору, а також прогнозовані параметри вектору швидкості і управляє нормальне прискорення. При цьому в кожній заданій точці простору враховується напрямок траєкторії на наступну точку, що забезпечує оптимальну кривизну траєкторії при заданій швидкості польоту літального апарату. В результаті аналітичного синтезу отримані математичні залежності для визначення керуючого прискорення, які дозволяють на борту безпілотного літального апарату отримати заданий оптимальний закон керування, що забезпечує в кінцевому підсумку мінімальні витрати енергії. Недоліком даної праці не врахування авторами радіусів покриття датчиків.

В свою чергу, планування маршрутів безпілотних літальних апаратів для пошуку динамічних об'єктів відноситься до класу інтелектуальних задач. Рішення задач такого роду пов'язане зі зниженням невизначеності в діях протилежної сторони, що вимагає застосування інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень. До складу моделей зазначеної системи, як обов'язковий компонент, повинна входити модель руху динамічних об'єктів, яка дозволить виконати прогноз їх місцеположення та знизити невизначеність в діях. Планування маршрутів польоту БПЛА ґрунтується, відповідно, на даному прогнозі, а саме, на прогнозі часу входу динамічного об'єкту на відкриту ділянку місцевості і супроводжується, відповідно, побудовою моделі руху БПЛА. Все це дозволяє виявити об'єкт пошуку. Подальший розвиток моделей полягає у розробці автоматизованих методів планування маршрутів руху БПЛА, автоматичної зміни параметрів маршруту в процесі польоту (виконанні польотного завдання), що засновується на знанняорієнтованих технологіях [8]. Оптимізація польоту БПЛА шляхом модифікації апаратного забезпечення представлено у [105]. Алгоритми наведення для квадрокоптера з можливістю обльоту перешкод і відстеження запланованого маршруту на основі управління нормальним прискоренням запропоновано у дослідженні [28]. Побудовано математичну модель квадрокоптера. Представлена розробка багаторежимного контролера містить набір бекстепінг-регуляторів, автоматично обраних відповідно до умов польоту. Розроблено поліпшення мурашиного алгоритму, що дозволяють підвищити швидкість обчислень і знайти маршрут з менших шляхових точок на глобальному маршруті.

Серед науковців, що займалися питанням пошуку оптимальних траєкторій руху малогабаритних літальних апаратів слід відзначити Ліго Т., Фомичева А.В., Кеке Г. Так у праці [51] представлений підхід до вирішення задачі планування просторового маршруту польоту безпілотного ЛА в режимі реального часу, в основі якого покладено метод частково цілочисельного лінійного програмування. Даний алгоритм повністю враховує обмеження на маневрені якості безпілотного літального апарату та є особливо ефективним в умовах польоту в невідомих

середовищах або в ситуації поступового уточнення інформації про навколишнє середовище в процесі реального польоту. У дослідженні [52] запропоновано метод вирішення задачі планування в реальному режимі часу тривимірної траєкторії руху БПЛА в умовах складного рельєфу місцевості, в основі якого покладено метод управління з прогнозованими моделями (УПМ). Розглянуто випадок який передбачає, що в межах певної області знаходження БПЛА, рельєф місцевості відомий, за допомогою триангульованої нерегулярної мережі, яка застосовується для моделювання рельєфу місцевості, а також введені логічні і безперервні змінні, що описують обмеження для обходу перешкод. Планування польоту малогабаритного літального апарату в умовах міського середовища представлено у [49]. Розв'язання задачі знаходження маршруту безпілотного літального апарату в режимі реального часу та в умовах невизначеності представлено в роботі [50].

Серед основних недоліків описаних вище досліджень варто виокремити факт того, що автори не враховують радіус покриття сенсору, що в свою чергу суттєво може вплинути на траєкторію руху та енерговитрати датчику. Дані аспекти описаної проблеми є актуальними та потребують вирішення.

1.4 Огляд результатів досліджень проблеми оптимізації енерговитрат датчиками

Із розвитком сучасних матеріалів та технологій розмір сенсорів зменшується. У зв'язку з цим зменшується розмір акумуляторів датчиків. Наслідком даного зменшення є зменшення часу автономної роботи сенсору. Таким чином ключовим завданням для науковців та інженерів є відшукування підходів, методів та моделей, що дозволять оптимізувати енерговитрати сенсорів, наслідком чого буде збільшення терміну автономної роботи датчику.

Серед досліджень питання оптимізації енерговитрат сенсорами та сенсорними мережами слід виокремити роботи Астакова С.Н., Залюбовського В.В., Cardei M. У праці [4] розглядається задача енергоефективного регулярного покриття плоскої області сенсорами з двома вибраними радіусами моніторингу. В

роботі покращуються відомі результати про якість покриттів, а також оптимізуються сумарні енерговитрати на моніторинг та передачу даних між елементами сенсорної мережі. В свою чергу, способи проектування бездротових сенсорних мереж за допомогою моделей регулярних кругових покриттів розглядається у [5]. Ставиться завдання побудови найбільш ефективної сенсорної мережі при заданій складності її структури. При цьому враховується вартість типового сенсора і витрати на експлуатацію мережі. В свою чергу, у праці [71] розглядається проблема охоплення цілі в бездротових сенсорних мережах з регульованим діапазоном зондування. Комунікація та зондування споживають енергію, тому ефективне управління живленням може продовжити термін служби мережі. Оскільки цілі надмірно охоплюються багатьма датчиками, для економії енергетичних ресурсів датчики можуть бути організовані в набори, що активуються послідовно. У описаній роботі автори розглядають проблему регульованих наборів діапазонів (AR-SC) та її вирішення шляхом поєднання максимальної кількості наборів та діапазонів, пов'язаних з кожним датчиком, таким чином, що кожен набір датчиків охоплює всі цілі. Проте, описані вище підходи не враховують радіуси покриття датчиків та можливість їхньої зміни. Оптимізувати енерговитрати сенсорів можна також за рахунок протоколів передачі даних. У дослідженні [21] запропоновано огляд протоколів маршрутизації, що забезпечують енергоефективність сенсорної мережі. Також у праці [45] розглянуто переваги (можливість використання декількох альтернативних шляхів для передачі даних до одного одержувачу) і недоліки (нездатність збалансувати споживання електроенергії) багатокільових протоколів маршрутизації в бездротовій сенсорній мережі. Головною метою при розробці запропонованого багатокільового протоколу маршрутизації стало забезпечення його енергоефективності. Основна ідея розробки ефективної бездротової сенсорної мережі – поділ її на решітки. Концепція, названа багатокільовою на основі решітки та реалізується в ході чотирьох етапів: формування решітки; виявлення сусідів; передача даних; оновлення енергії. Формування решітки дозволяє визначити мінімальну наскрізну затримку між вузлом-джерелом і вузлом-одержувачем в мережі. Пропонована

техніка нечіткої множини забезпечує виявлення енергетичної ефективності вузлів в бездротовій сенсорній мережі. На заключному етапі протокол знаходить оптимальний шлях передачі даних. У роботі [100] пропонується енергоефективний протокол охоплення територій для гетерогенних мереж датчиків енергії (АСНЕ). АСНЕ може досягти хороших показників з точки зору зондування зони охоплення, терміну служби, мінімізуючи споживання енергії для контрольних витрат та збалансувавши енергетичне навантаження між усіма вузлами. Праця [1] присвячена дослідженню методів підвищення енергоефективності вузлів бездротового сенсора. Основну увагу приділено режимам роботи сенсорної мережі з пробудженням за таймером і мереж реєстрації подій. У дослідженні [131] повідомляється про розробку енергоефективного алгоритму (СОВОМ) для виявлення меж області подій та постійного моніторингу, який є більш енергоефективним, ніж прямі просторові або тимчасові алгоритми придушення. Вибирається підмножина прикордонних вузлів, які повідомляють про поглинач, так що не втрачається суттєва інформація про межу. У статті також повідомляється про розширення алгоритму, який підтримує безперервне відображення ізолінії в сенсорних мережах. У роботі [30] розглянуті питання забезпечення максимальної тривалості життя бездротових сенсорних мереж. Особливу увагу приділено методу балансування трафіку для збільшення часу життя бездротових сенсорних мереж. У матеріалах [29] досліджено особливості збереження енергії в бездротових сенсорних мережах. Проаналізовані найбільш поширені методи зменшення енергоспоживання. У праці [59] наводяться результати дослідження методів збереження енергії, що використовуються при проектуванні та розробці сучасних сенсорних мереж. Дослідження базується на особливостях сенсорних мереж та питань застосовності загальних практик збереження енергії у вбудованих системах для оптимізації енергоспоживання сенсорних вузлів. Окрема увага приділяється структурі сенсорного вузла та виділенню основних споживачів електричної енергії сенсорного вузла. У роботі [89] проаналізовано різні схеми енергоспоживання на основі акумуляторів та схеми енергозабезпечення на основі збирання енергії.

Дослідження [129] зосереджено на розробці енергоефективного алгоритму класифікації станів бездротової сенсорної мережі за допомогою методів машинного навчання. Запропонований алгоритм зменшує споживання енергії за рахунок: усунення моніторингу параметрів, які не впливають на стан сенсорної мережі; зменшення кількості сеансів зв'язку по мережі (дані передаються, лише якщо їх значення можуть впливати на стан сенсорної мережі). У дослідженні [112] пропонується підхід до оптимізації охоплення району та споживання енергії, заснований на вдосконаленій оптимізації рою частинок (IAPSO). Що стосується проблеми покриття площі, запропоновано багатоцільову модель оптимізації для того, щоб покращити коефіцієнт покриття та зменшити коефіцієнт надмірності за допомогою зондування обертанню напрямку. Для оптимізації споживання енергії рівномірно розподіляється по кожному вузлу датчика за допомогою кластерної мережі. Автори статті [65] досліджують продовження терміну служби БСМ в контексті проблем охоплення цілей. Для вирішення цієї проблеми запропоновано техніку планування БСМ, засновану на концепції в рамках теорії скінченних автоматів. Кожен вузол датчика в БСМ обладнаний скінченним автоматом, щоб він міг самостійно вибирати свій належний стан, тобто сплячий або активний, з метою охоплення всіх цілей з найменшими можливими енергетичними витратами.

У матеріалах дослідження [16] розглянуто ефективний метод кластеризації в бездротових сенсорних мережах з використанням нечіткої логіки на базі таких вхідних змінних, як якість сигналу, концентрація вузлів, залишкова енергія і центральність вузла. Даний метод також поєднує в собі переваги ієрархії адаптивної кластеризації з низьким енергоспоживанням (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy, LEACH). Представлена структура бездротової сенсорної мережі моделюється з використанням апарату нечіткої логіки. Метод кластеризації сенсорного поля використовується у матеріалах [55]. Запропонований метод базується на ідеї рівномірної ротації головних вузлів, що враховує рівень залишкової енергії вузлів і відстані від сенсорних пристроїв до головного вузла. Механізм тимчасового розділення каналу при взаємодії сенсорних пристроїв з головним вузлом кластера мінімізує ймовірність появи колізії передачі даних.

Стаття [44] присвячена аналізу принципів побудови і функціонування бездротових сенсорних систем, здатних в рамках локального радіусу дії (сотні метрів) підтримувати одночасну інформаційну взаємодію великої кількості пристроїв (тисячі датчиків і виконавчих механізмів) з підвищеною енергоефективністю, затребуваною через складність забезпечення цих пристроїв централізованим електроживленням і обмеженням об'ємів існуючих автономних джерел живлення, зокрема досліджено принципи забезпечення необхідного радіуса покриття. У [34] розглянута дворівнева деревоподібна модель функціонування бездротової сенсорної мережі, яка дозволяє оцінити її термін служби та енергоефективність. Також проведений аналіз основних параметрів мережі, що впливають на її продуктивність. Шляхом зміни описаних величин можна досягти оптимізації мережі таким чином, щоб вона досягла оптимального терміну служби. У дослідженні [128] досліджується питання як планувати вузли датчиків, щоб максимізувати просторово-часове охоплення критичних місць з обмеженням терміну служби мережі. Спочатку аналізується проблема планування вузлів датчиків для просторово-часового охоплення критичних місць і встановлюється математична модель планування вузлів. Далі, аналізуючи характеристики моделі, запропоновано двофазний просторово-часовий метод посилення покриття (TSCM). На першому етапі використовується алгоритм оптимізації рою часток (PSO) для організації напрямків вузлів датчиків, щоб максимізувати кількість охоплених критичних місць. На другій фазі застосовується генетичний алгоритм, щоб отримати оптимальну послідовність робочого часу кожного вузла (датчику).

Основним недоліком описаних вище робіт є розгляд сенсорів фіксованого радіусу. Наявність перетину зон покриття також значно впливає на кількість датчиків при покритті території, що в свою чергу впливає на витрати експлуатації та обслуговування датчиків. У розглянутих роботах не враховано можливість перетину зон покриття датчиків. Наслідком неврахування описаних вище параметрів призводить до надлишковості покриття та зниженню енергоефективності мережі. Саме тому розробка методів забезпечення енергоефективності сенсорних мереж шляхом знаходження оптимальних значень

радіусів покриття датчиків та врахування діаметру перетину зон покриття сенсорів є актуальною проблемою.

1.5 Огляд питання живучості сенсорних мереж

Крім забезпечення максимізації покриття, що призводить до максимізації накопиченої інформації, та енергоефективності сенсорних мереж слід також враховувати питання живучості мережі. Дане питання є актуальним та одним із ключових під час розробки та забезпечення сенсорних мереж.

Термін живучості інформаційних систем запропоновано та вдосконалюється вітчизняними вченими Додоновим А.Г. та Ланде Д.В. Згідно з [19] живучість – це властивість, що характеризує здатність системи ефективно функціонувати за наявності ушкоджень або відновлювати цю здатність за визначений проміжок часу. Живучість є комплексною властивістю систем. Спорідненими поняттями є поняття відмовостійкості як властивості системи зберігати повну або часткову працездатність у випадках відмов окремих елементів, що не пов'язані із зовнішніми нерегламентованими діями, та безвідмовності як властивості безперервно зберігати працездатний стан протягом деякого часу роботи чи деякого напрацювання. У дисертаційній роботі розглянуто саме поняття живучості так як розглядаються випадки відмов компонентів сенсорної мережі у зв'язку із впливом зовнішніх чинників. Показники живучості мають відповідати вимогам системного рівня досліджень і в той же час вони мають забезпечити можливість розробки достатньо простих моделей для практичних робочих досліджень та виконання розрахунків. Фахівці виділяють функціональну та структурну живучість [19]. Під функціональною живучістю розуміють здатність системи виконувати свої функції в умовах цілеспрямованих зовнішніх і внутрішніх деструктивних впливів, коли компенсувати нештатні ситуації, потоки відмов і збоїв можна лише за рахунок внутрішніх резервів системи і впливу на джерело деструктивних впливів. Структурна живучість розглядається як можливість реконструкції, реорганізації, реконфігурації системи для забезпечення функціонування системи у випадку

несприятливих випадків. Узагальнено дані поняття можуть бути представлені наступним чином(Рис. 1.5):

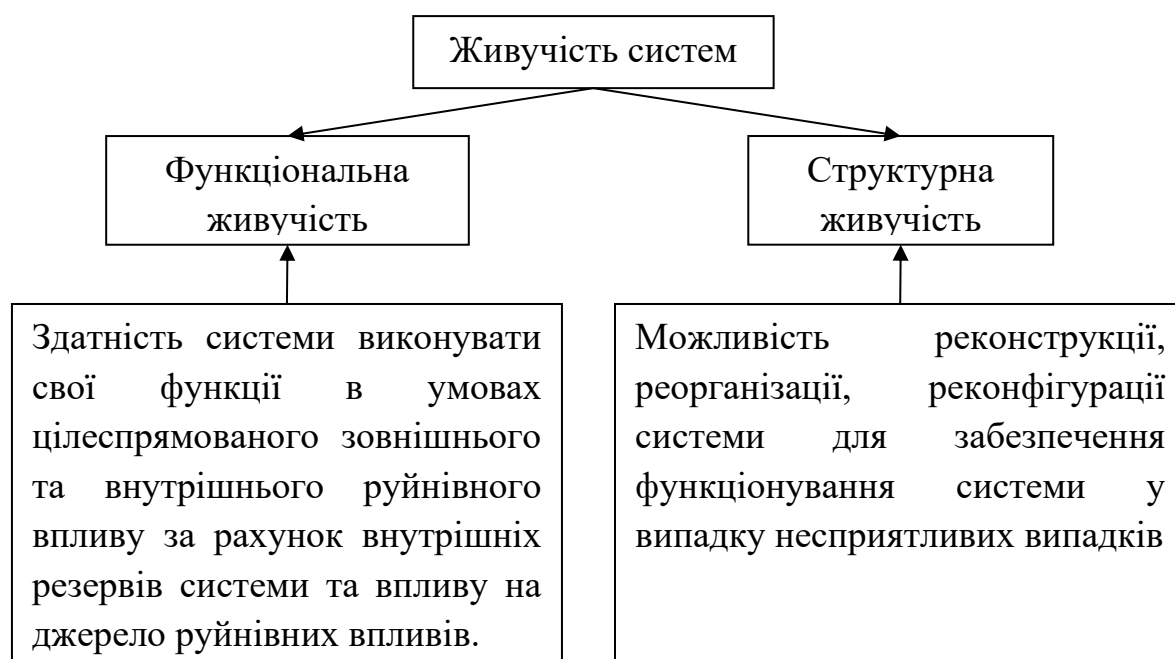


Рисунок 1.5 – Компоненти живучості систем

Спорідненим поняттям є функціональна стійкість, що визначається як здатність системи виконувати свої функції під час заданого проміжку часу, за умови впливу потоку експлуатаційних збоїв, навмисних пошкоджень, втручання у обмін та обробку інформації, помилок обслуговуючого персоналу [101]. У праці [17] представлено аналіз питання живучості корпоративних інформаційних систем. В свою чергу, у [20] запропоновані методи підвищення живучості інформаційної складової корпоративних інформаційно-аналітичних систем підтримки прийняття рішень. У дослідженні [18] розглядається поняття живучості інформаційних об'єктів в мережі Інтернет, наводяться механізми забезпечення живучості інформаційних об'єктів, формули для розрахунку живучості інформаційних об'єктів в разі статичного розподілу втрат інформації на серверах. У праці [38] наведено опис моделей життєвого циклу інформаційних об'єктів, основні методи підвищення живучості інформаційної складової інформаційно-аналітичних систем. Ці методи спрямовані на зменшення рівня вразливості інформаційних об'єктів у межах інформаційної інфраструктури.

У роботі [64] запропонований підхід до оцінки живучості БСМ під негативним впливом та ключовим компромісом. Запропонована модель оцінки життєздатності БСМ. Вимірюється живучість і доступність як за централізованою, так і за розподіленою схемою відкликання ключів. Автори [124] запропонували модель оцінки життєздатності БСМ при змішаних засобах атак, де мережева топологія описується як кластерна. Через те, що кілька вузлів атаковано в одному кластері, пороговий механізм, що ініціює перехід між станами БСМ за змішаних способів атак, був розроблений, щоб зробити контрзаходи більш точними. Побудована модель оцінки життєздатності БСМ на основі ланцюгів Маркова. Описані підходи не враховують витрати на функціонування мережі. Також модель оцінки живучості через ланцюговий процес Маркова використано у роботі [88]. Запропоновані методи ефективні лише на системах з кластерною архітектурою. У статті [113] запропоновано кількісний аналіз для оцінки життєздатності бездротових сенсорних мереж із використанням ймовірнісної перевірки моделі. Живучість мережі визначається відповідно до чотирьох показників, а саме: частоти збоїв, втрати даних, затримки та скомпрометованих даних через різні збої. Зокрема, розглядаються три типи подій відмов, а саме відмови вузлів, зв'язків та атак, які зумовлені, відповідно, несправностями живлення, помилками зв'язку та атаками чорної діри. Представлено поведінку мережі з використанням ланцюгів Маркова неперервного часу та випадковим чином вводяться вищезгадані несправності та атаки в мережі, щоб отримати результати, які кількісно оцінюють їх вплив.

У праці [75] автори пропонують протокол відкликання ключа сеансу динамічного рівня (DLS), який має розділені інтервали часу, який він названо рівнем. Використовується схема сеансу динамічного рівня, заснована на виявленні кількості попередньо скомпрометованих вузлів, вона не захищена від безперервного того самого шаблону атаки, який спричиняє наступні різноманітні атаки. Недоліком є неврахування витрат на зв'язок між елементами мережі. У праці [102] запропоновано складену модель для оцінки ефективності життєздатності БСМ, яка складається з втрати пакетів, затримки пакетів та терміну служби мережі. Даний підхід не враховує втрату елементів мережі та зв'язку між ними.

Концепція підключення зондування k-вузла (краю), яка забезпечує зв'язок між даними зондування та користувачами запропоновано у [130]. На основі підключення зондування k-вузла (краю) розробляються технології виживання, стійких до стихійних лих. Також розроблені ключові технології, необхідні для реалізації підключення зондування k-вузлів (краю). Розглядається втрата датчику, але не береться до уваги можливість втрати зв'язку між елементами мережі. У дослідженні [98] представлено розробку наскрізного рішення для передачі даних, що відповідає вимогам обмежених мереж БСМ. Запропоновано рішення для підвищення надійності мережі, масштабований та розподілений підхід для відновлення мережі після відмов вузлів у БСМ, полегшений механізм відновлення втрати пакетів та інформування про якість маршруту в БСМ. У праці [126] запропоновано основу для безпечних та живучих мереж БСМ та представлено схему управління ключами як конкретний приклад, щоб запобігти компрометації мереж датчиків з боку противника. Методика вивчення та оцінки меж стійкості сенсорної мережі на основі стабільності лінійних квадратичних регуляторів та стандартним фільтром Калмана запропоновано у [119]. У дослідженні [61] розроблено концепцію побудови безпроводних сенсорних мереж на основі принципів колективного інтелекту та розподіленого процесора, яка, на відміну від відомих підходів, забезпечує виділення частини обчислювальних ресурсів безпроводних сенсорів для функціонування розподіленого процесора і високу живучість мережі за рахунок децентралізованого управління.

Основним недоліком описаних вище досліджень є неврахування авторами втрати датчику, втрати зв'язку між датчиками та одночасне поєднання цих факторів. Також не враховується можливість наявності різної пропускну здатності каналів зв'язку між елементами сенсорних мереж. Тому розробка відповідних моделей є актуальним питанням на даному етапі розвитку сенсорних мереж та дослідженні живучості сенсорних мереж.

1.6 Математична постановка задачі

Введемо позначення:

r_i – радіус покриття i -датчику, r_i^{min} – мінімальний радіус покриття i -датчику, r_i^{max} – максимальний радіус покриття i -датчику, $i = \overline{1, n}$;

$e(r_i)$ – енерговитрати датчику з радіусом покриття r_i , $i = \overline{1, n}$;

$R = \{r_1, r_2, \dots, r_n\}$ – множина радіусів покриття датчиків сенсорної мережі;

n – кількість датчиків, що використовуються у сенсорній мережі;

c – діаметр перетину зон покриття датчиків (Рис. 1.6), c_{min} – мінімальне значення діаметру перетину зон покриття датчиків, c_{max} – максимальне значення діаметру перетину зон покриття датчиків;

S – сенсорна мережа;

T_s – площа території;

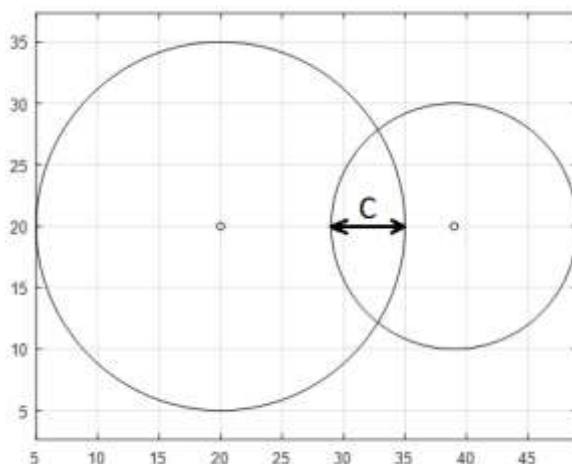


Рисунок 1.6 – Діаметр перетину зон покриття

Використовуючи введені вище позначення сформулюємо математичну постановку задачі:

1. Модель:

$$E(R) = \sum_{i=1}^n e(r_i) \text{ – енерговитрати сенсорної мережі,}$$

$$Z(R, c) = \sum_{i=1}^n \left(r_i - \frac{c}{2} \right)^2 \text{ – площа території, покритої датчиками,}$$

$$N(T_s, R, c) = \frac{T_s}{Z(R, c)} \text{ – кількість використаних сенсорів під час покриття,}$$

$D(S)$ – живучість сенсорної мережі (параметр мережі, обчислюється алгоритмічно),

$$r_i^{min} \leq r_i \leq r_i^{max},$$

$$c_{min} \leq c \leq c_{max}.$$

2. Цільові функції:

$$E(R) \rightarrow min,$$

$$Z(R, c) \rightarrow max,$$

$$N(T_s, R, c) \rightarrow min,$$

$$D(S) \rightarrow max.$$

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1

У розділі проведено аналіз сучасних досліджень проблем покриття території стаціонарними датчиками, пошук оптимальної траєкторії руху динамічних датчиків з врахуванням перешкод та вже покритих ділянок досліджуваної території, забезпечення живучості та енергоефективності сенсорних мереж. У результаті проведеного аналізу можна виділити ряд факторів, що не були врахованими дослідниками:

1. Застосування сенсорів з однаковим радіусом покриття;
2. Енерговитрати датчиків як критерій оптимальності при використанні як статичних датчиків, так і при побудові траєкторії обльоту території;
3. Необхідність перетину зон покриття датчиків для обміну інформацією як критерій оптимізації;
4. Втрата датчиків та зв'язку між датчиками, одночасне поєднання цих факторів;
5. Радіус покриття сенсору при розв'язанні задачі пошуку оптимальної траєкторії руху сенсорів.

Дані фактори повинні бути враховані при проектуванні енергоефективних сенсорних мережі з високим рівнем живучості та максимізацією покриття досліджуваних територій у випадку статичних датчиків, побудові оптимальних

траєкторій обльоту території при використанні динамічних сенсорів. Також слід враховувати можливість проектування мереж змішаної структури. Для забезпечення описаних вимог необхідно:

1. Розробити методи та алгоритми забезпечення енергоефективності сенсорних мереж, побудови оптимальних траєкторій обльоту території та оцінки живучості сенсорних мереж;
2. Реалізувати розроблені методи та алгоритми у вигляді програмного комплексу.

РОЗДІЛ 2. МОДЕЛІ ТА АЛГОРИТМИ ПОКРИТТЯ ТЕРИТОРІЇ СЕНСОРАМИ З МІНІМІЗАЦІЄЮ ЕНЕРГОВИТРАТ

2.1 Моделі та алгоритми оптимізації енерговитрат сенсорних мереж

2.1.1 Мінімізація енерговитрат сенсорної мережі шляхом регуляції радіусу покриття у випадку статичних сенсорів

Нехай дано множину датчиків $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$, де n – кількість датчиків. В свою чергу, кожен датчик володіє певними характеристиками, зокрема величиною, що вимірює, одиницями вимірювання, величиною ємності акумулятора, позицією розташування, типом та методами зв'язку з іншими датчиками, тощо [83]. Будемо брати до розгляду такі параметри: позиція датчику (x, y) , радіус покриття r (м), ємність акумулятора B_v (мАг), споживання струму при роботі датчику E (мА). Відомо, що величина радіусу охоплення датчиків регулюється в залежності від величини чутливості, що впливає на величину E_i , та не може перевищувати максимальне значення радіусу покриття, яке позначимо r^{max} . Позначимо також мінімальне значення радіусу покриття датчику як r^{min} . Будемо обчислювати енерговитрати датчиків згідно з [1] у вигляді:

$$E = E_r + E_s + E_a, \quad (2.1)$$

де E_r – споживання струму при прийомі даних, E_s – споживання струму при передачі даних, E_a – споживання струму при моніторингу покритої території.

В свою чергу, відповідно до [1] енерговитрати моніторингу будемо обчислювати у вигляді:

$$E_r = kr^2, \quad (2.2)$$

де k – споживання струму датчиком для покриття квадратного метру території $\left(\frac{mA}{m^2}\right)$.

Територію, яку покриває датчик s_i (зона покриття датчику s_i), будемо розглядати як коло з центром в точці (x_i, y_i) та радіусом r_i , $i = \overline{1, n}$, n – кількість

датчиків. Розглянемо випадок перетину зон покриття датчиків, що є необхідною умовою передачі даних. Схематично дану ситуацію можна зобразити (Рис. 2.1):

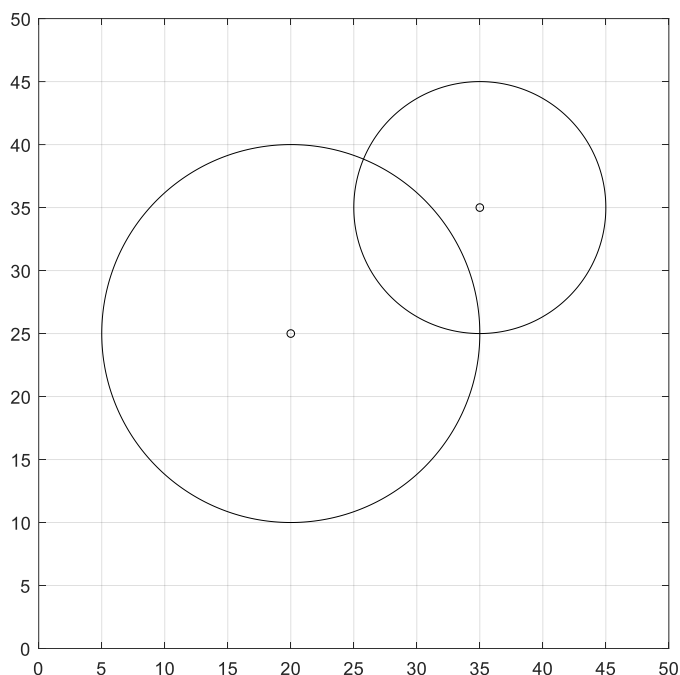


Рисунок 2.1 – Перетин зон покриття датчиків

Розглядаємо сенсори, позиції яких є незмінними. Тому, для зменшення зон перетину покриття сенсорів необхідно зменшити їх радіуси покриття. Слід враховувати факт можливої відсутності перетину покриття. Наявність перетину покриття двох датчиків s_1 та s_2 можна визначити як перетин кіл з центрами у точках (x_1, y_1) та (x_2, y_2) з радіусами r_1 та r_2 у вигляді розв'язку системи (2.3):

$$\begin{cases} (x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 = r_1^2 \\ (x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 = r_2^2 \end{cases} \quad (2.3)$$

Іншим способом визначення наявності перетину є спосіб з використання відстані між датчиками, що у нашому випадку є центрами кіл. Дану відстань можна представити у вигляді (2.4):

$$l_{i,j} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}, \quad (2.4)$$

де (x_i, y_i) та (x_j, y_j) – координати датчиків.

Величина відстані між датчиками $l_{i,j}$ може набувати значень в одній з наведених нижче трьох множин в залежності від радіусів покриття r_i та r_j . У таблиці 2.1 наведено опис даних випадків [42, 43]:

Таблиця 2.1 – Залежність зони перетину від значення $l_{i,j}$

Значення $l_{i,j}$	Опис
$l_{i,j} > r_i + r_j$	Зони покриття датчиків не перетинаються.
$l_{i,j} < r_i + r_j$	Зони покриття датчиків перетинаються та містять спільну зону.
$l_{i,j} = r_i + r_j$	Зони покриття датчиків перетинаються у одній єдиній точці.

Введемо до розгляду обмеження перетину зон покриття датчиків, що є мінімально-допустимим перетином зон покриття за якого можлива передача даних між датчиками. Назвемо дану величину діаметр покриття та позначимо дану величину як $c \geq 0$, $c = const$ (Рис. 2.2).

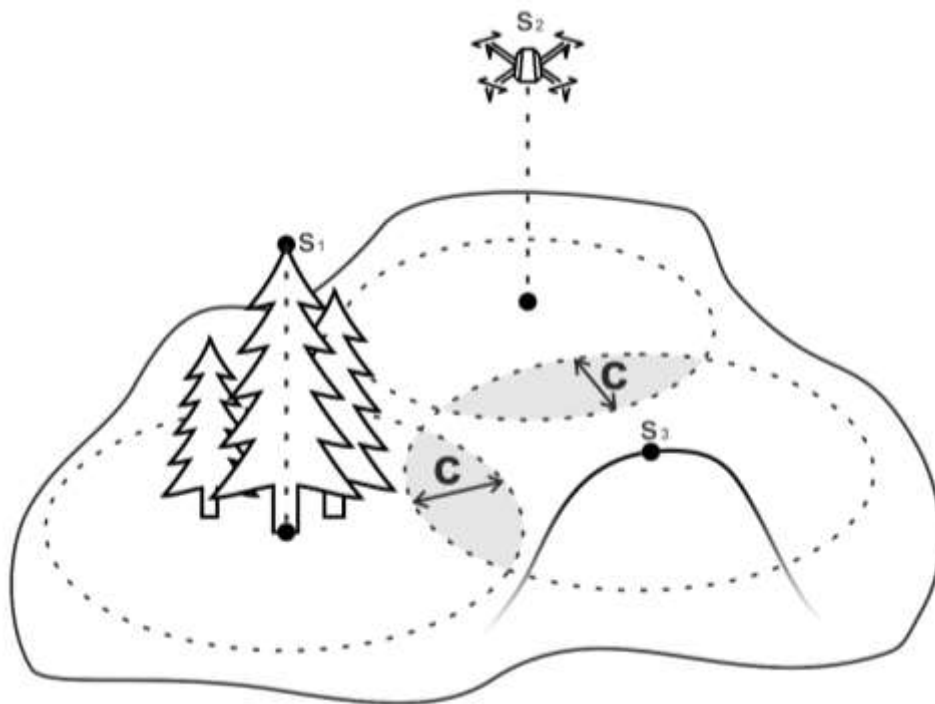


Рисунок 2.2 – Зміст значення величини c

Задача полягає у регуляції зон покриття датчиків із заданим діаметром перетину зон покриття c , і, як наслідок, відповідної величини енерговитрат таким чином, щоб для двох датчиків s_i та s_j виконувалася умова:

$$r_i + r_j = l_{i,j} - c. \quad (2.5)$$

Сформуємо матрицю перетинів зон покриття датчиків A , елементи якої будуть рівними (2.6):

$$a_{i,j} = \begin{cases} 1, & l_{i,j} < r_i + r_j \\ 0, & l_{i,j} \geq (r_i + r_j) \vee (i = j) \end{cases}. \quad (2.6)$$

Також матриця перетинів A буде діагонально симетричною, тому для зменшення кількості обчислень доцільно формувати лише елементи верхньої або нижньої діагоналей. Таким чином матриця перетинів зон покриття A буде мати вигляд (2.7):

$$A = \begin{pmatrix} 0 & a_{1,2} & \cdots & a_{1,n} \\ 0 & 0 & \cdots & a_{2,n} \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 0 \end{pmatrix}. \quad (2.7)$$

Енерговитрати мережі будемо обчислювати як суму енерговитрат елементів мережі:

$$E(r_1, r_2, \dots, r_n) = \sum_{i=1}^n (E_r(r_i) + E_s^i + E_a^i). \quad (2.8)$$

Враховуючи описане вище, сформулюємо задачу пошуку радіусів покриття датчиків сенсорної мережі, за яких досягається мінімізація енерговитрат за умови перетину зон покриття у вигляді [42, 43]:

$$E(r_1, r_2, \dots, r_n) \rightarrow \min_{r \in G}, \quad (2.9)$$

$$G: \begin{cases} r_1 \in [r_1^{\min}; r_1^{\max}] \\ r_2 \in [r_2^{\min}; r_2^{\max}], \\ \vdots \\ r_n \in [r_n^{\min}; r_n^{\max}] \end{cases}, \quad (2.10)$$

$$a_{i,j} \left(r_i + r_j - \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} + c \right) \leq 0, \quad (2.11)$$

$$i = \overline{1, n - 1}, \quad (2.12)$$

$$j = \overline{i + 1, n}, \quad (2.13)$$

де (2.9) – цільова функція, (2.10) – область визначення функції, (2.11) – умови забезпечення мінімально-допустимого перетину парою датчиків, зони покриття яких перетинаються, n – кількість датчиків.

Доведемо існування розв’язку сформульованої задачі [114].

Лема 2.1

Функція $E(r_1, r_2, \dots, r_n)$ досягає в області G свого мінімального значення за умови, що функції $E_r(r_i)$, $i = \overline{1, n}$ неперервні.

Доведення

Функція $E(r_1, r_2, \dots, r_n)$ є неперервною як сума неперервних функцій (2.8). Область G є обмеженою так як всі змінні мають мінімальне та максимальне значення $r_i \in [r_i^{min}; r_i^{max}]$, $i = \overline{1, n}$. Також область G є замкненою, так як для всіх змінних відрізок $[r_i^{min}; r_i^{max}]$ є замкненим. Таким чином, область G є компактом, та, згідно теореми Вейерштрасса, функція $E(r_1, r_2, \dots, r_n)$ досягає в області G свого мінімального значення. Лему доведено. ■

Теорема 2.1

Задача (2.9) – (2.13) має розв’язок, за припущення, що умови (2.10)-(2.13) несуперечливі.

Доведення

Функція $E(r_1, r_2, \dots, r_n)$ є опуклою, неперервною та диференційованою. Згідно Лемі 2.1 область G непорожня і компактна, тоді, згідно теореми Куна-Такера, існує сідлова точка функції Лагранжа і вона є екстремумом, умови (2.10)-(2.13) задають непорожню множину, що є перетином компактної та замкненої множини. Таким чином, задача (2.9) – (2.11) має розв’язок. Теорему доведено. ■

Так як функція $E(r_1, r_2, \dots, r_n)$ є опуклою та диференційованою для знаходження мінімуму цільової функції використаємо метод градієнтного спуску. Розв’язком задачі (2.9) – (2.13) є вектор $r = (r_1, r_2, \dots, r_n)$, елементи якого є

радіусами покриття відповідних сенсорів, з використанням яких досягається мінімізація енерговитрат при заданому діаметрі перетину зон покриття.

Алгоритм розв'язання описаної вище задачі та роботи відповідного програмного забезпечення складається з таких етапів:

1. Аналіз координат датчиків та формування матриці перетинів A (2.7) шляхом перевірки умов (2.3) або (2.4) та (2.6). У даному алгоритмі використовується умова (2.4) та (2.6).
2. Враховуючи, що елементи матриці A є симетричними відносно головної діагоналі, в алгоритмі використовуються елементи, що знаходяться вище головної діагоналі (2.11), (2.12).
3. Формування цільової функції (2.9), області G шляхом введення максимального та мінімального радіусу покриття для кожного датчику (2.10), умов забезпечення мінімально-допустимого перетину парою датчиків, зони покриття яких перетинаються.
4. Знаходження розв'язку з використанням методу градієнтного спуску.

2.1.2 Мінімізація енерговитрат сенсорної мережі шляхом регуляції радіусу покриття у випадку динамічних сенсорів

Слід враховувати можливість руху датчиків під час оптимізації енерговитрат. У такому випадку до рівняння енерговитрат (2.1) додаються витрати на рух датчику. Таким чином рівняння (2.1) буде мати вигляд:

$$E = E_r + E_s + E_a + E_m, \quad (2.14)$$

де E_r – енерговитрати прийому даних, E_s – енерговитрати передачі даних, E_a – енерговитрати моніторингу покритої території, E_m – енерговитрати на рух датчику.

Будемо проводити оптимізацію енерговитрат датчику у таких випадках:

- Випадок перетину зон покриття з іншими датчиками;
- Випадок покриття території за межами необхідної території.

Нехай рух сенсорів описано певним рівняннями, що є відомими. Розглядаємо рух датчику у двовимірному випадку (площина XOY) без врахування зміни висоти

(координата z). Будемо вважати, що рівняння руху залежать від часу та попередньої позиції датчику. У загальному вигляді представимо їх у вигляді (2.15):

$$\begin{cases} f_1(x_1, y_1, t) = 0 \\ f_2(x_2, y_2, t) = 0 \\ \vdots \\ f_n(x_n, y_n, t) = 0 \end{cases}, \quad (2.15)$$

де x_i, y_i – координати сенсорів, $i = \overline{1, n}$, n – кількість датчиків.

Також, опис руху датчиків може бути представлений у вигляді диференціальних рівнянь, задані параметрично, у векторній або координатній формі [60].

Широко розповсюджений випадок використання датчиків для накопичення інформації у режимі патрулювання, тобто руху по замкненій траєкторії. У такому випадку, рівняння траєкторії, з врахуванням повороту відносно центру координат на кут β проти годинникової стрілки, буде мати вигляд (2.16):

$$\begin{cases} x(\alpha, \beta) = x_0 + \frac{a \cos \alpha}{k} \cos \beta - \frac{b \sin \alpha}{k} \sin \beta \\ y(\alpha, \beta) = y_0 + \frac{a \cos \alpha}{k} \sin \beta + \frac{b \sin \alpha}{k} \cos \beta \end{cases}, \quad (2.16)$$

де $0 \leq \alpha \leq 2\pi$, $0 \leq \beta \leq 2\pi$ – кут повороту відносно центру координат, x_0, y_0 – зсув відносно координатних осей, k – коефіцієнт розтягу або стиснення, a – велика піввісь еліпса, b – мала піввісь еліпса. При значенні $k > 1$ відбувається розтяг, при $k < 1$ відбувається стиснення.

Розглянемо випадок довільного, неконтрольованого руху датчику. Для моделювання руху такого сенсору використаємо такі початкові умови: нехай відомі координати датчика (x_0, y_0) та вектор швидкості \vec{v} в початковий момент часу t_0 . Напрямок руху визначається як поворот вектору швидкості відносно осі OX (розглядаємо двовимірний випадок руху) на довільне значення кута в градусах α (Рис. 2.3).

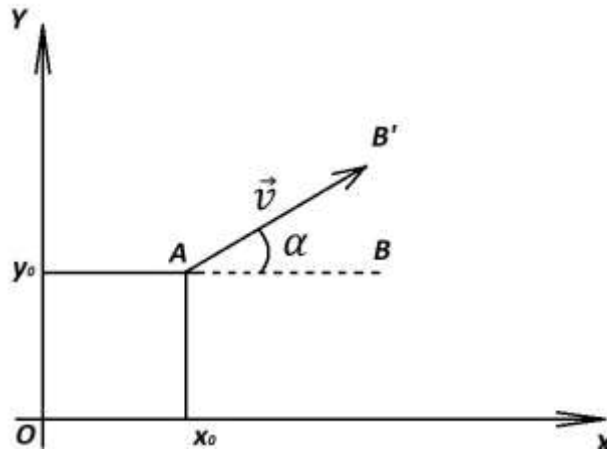


Рисунок 2.3 – Визначення напрямку датчику у випадку випадкового руху

За основу візьмемо координатний метод опису рівномірного прямолінійного руху. Беручи до уваги початкове положення датчика, його швидкість та можливі випадкові відхилення c_x та c_y опишемо рух датчика у вигляді (2.17) – (2.19):

$$\begin{cases} x(t) = x_0 + v_x t + c_x(t) \\ y(t) = y_0 + v_y t + c_y(t) \end{cases} \quad (2.17)$$

$$0 < x < x^*, 0 < y < y^*, \quad (2.18)$$

$$t \in [0, T], \quad (2.19)$$

де x^* , y^* - верхні межі території, що розглядається, T – верхня межа часового відрізка, що розглядається.

Величини v_x та v_y обчислимо шляхом перенесення точки B , що належить одиничному відрізку AB відносно точки A на кут, що дорівнює α у точку B' (Рис. 2.3) використовуючи формули (2.20):

$$v_x = x_{B'} - x_A, \quad (2.20)$$

$$v_y = y_{B'} - y_A, \quad (2.21)$$

де $x_{B'} = x_A + 1$ (AB розглядаємо як одиничний відрізок), $y_{B'} = y_B + ABt \operatorname{tg} \alpha$.

Оптимізація енерговитрат буде відбуватися у момент часу t^* , коли наявний перетин зон покриття (Табл. 2.2). Відмінність з таблицею 2.1 полягає у обчисленні величин у момент часу t^* .

Таблиця 2.2 – Залежність зони перетину від значення $l_{i,j}(t^*)$

Значення $l_{i,j}(t^*)$	Опис
$l_{i,j}(t^*) > r_i(t^*) + r_j(t^*)$	Зони покриття датчиків не перетинаються у момент часу t^* .
$l_{i,j}(t^*) < r_i(t^*) + r_j(t^*)$	Зони покриття датчиків перетинаються та містять спільну зону у момент часу t^* .
$l_{i,j}(t^*) = r_i(t^*) + r_j(t^*)$	Зони покриття датчиків перетинаються у одній єдиній точці у момент часу t^* .

Для використання у таблиці 2.2 модифікуємо формулу (2.4) з урахуванням руху датчиків (2.22):

$$l_{i,j}(t^*) = \sqrt{(x_i(t^*) - x_j(t^*))^2 + (y_i(t^*) - y_j(t^*))^2}, \quad (2.22)$$

де $(x_i(t^*), y_i(t^*))$ та $(x_j(t^*), y_j(t^*))$ – координати датчиків.

Енерговитрати мережі у момент часу t^* будемо обчислювати як суму енерговитрат елементів мережі у даний момент часу:

$$E(r_1, r_2, \dots, r_n, t^*) = \sum_{i=1}^n (E_r(r_i, t^*) + E_s^i(t^*) + E_a^i(t^*) + E_m^i(t^*)). \quad (2.23)$$

Враховуючи описане вище, сформулюємо задачу пошуку радіусів покриття датчиків сенсорної мережі у дискретні моменти часу t^* на часовому проміжку $[t_{start}, t_{finish}]$ з кроком Δt , за яких досягається мінімізація енерговитрат за умови перетину зон покриття у вигляді [86]:

$$E(r_1, r_2, \dots, r_n, t^*) \rightarrow \min_{r \in G}, \quad (2.24)$$

$$G: \begin{cases} r_1 \in [r_1^{min}, r_1^{max}] \\ r_2 \in [r_2^{min}, r_2^{max}] \\ \dots \\ r_n \in [r_n^{min}, r_n^{max}] \\ t^* \in [0, T] \end{cases}, \quad (2.25)$$

$$a_{i,j}(t^*)(r_i(t^*) + r_j(t^*) - l_{i,j}(t^*) + c(t^*)) \leq 0, \quad (2.26)$$

$$i = \overline{1, n-1}, \quad (2.27)$$

$$j = \overline{i + 1, n}, \quad (2.28)$$

де (2.24) – цільова функція, (2.25) – область визначення функції, (2.26) – умови забезпечення мінімально-допустимого перетину парою датчиків у момент часу t^* , зони покриття яких перетинаються, $l_{i,j}(t^*)$ – відстань між датчиками i та j у момент часу t^* (2.22), n – кількість датчиків, T – верхня межа часового відрізка, що розглядається.

У описаній задачі розглянуто можливість зміни діаметру перетину зон покриття у часі $c(t^*)$. Тобто дане значення може мати різне значення у кожен момент часу t^* . Доведемо існування розв'язку сформульованої задачі [114].

Лема 2.2

Функція $E(r_1, r_2, \dots, r_n, t^*)$ досягає в області G свого мінімального значення за умови, що функції $E r(r_i)$, $i = \overline{1, n}$ неперервні.

Доведення

Функція $E(r_1, r_2, \dots, r_n, t^*)$ є неперервною як сума неперервних функцій (2.23). Область G є обмеженою так як всі змінні мають мінімальне та максимальне значення $r_i \in [r_i^{min}; r_i^{max}]$, $i = \overline{1, n}$, $t^* \in [t_{start}, t_{finish}]$. Також область G є замкненою, так як для всіх змінних відрізки $[r_i^{min}; r_i^{max}]$ є замкненими. Таким чином, область G непорожня і компактна, та, згідно теореми Вейерштрасса, функція $E(r_1, r_2, \dots, r_n, t^*)$ досягає в області G свого мінімального значення. Лему доведено. ■

Теорема 2.2

Задача (2.24) – (2.28) має розв'язок за припущення, що умови (2.25)-(2.28) несуперечливі

Доведення

Функція $E(r_1, r_2, \dots, r_n, t^*)$ є опуклою, неперервною та диференційованою. Згідно Леми 2.2 область G є компактом, тоді, згідно теореми Куна-Такера, існує сідлова точка функції Лагранжа і вона є екстремумом, умови (2.25)-(2.28) задають

непорожню множину, що є перетином компактної та замкненої множини. Таким чином, задача (2.24) – (2.28) має розв’язок. Теорему доведено. ■

Так як функція $E(r_1, r_2, \dots, r_n, t^*)$ є опуклою та диференційованою для знаходження мінімуму цільової функції використаємо метод градієнтного спуску. Розв’язком задачі (2.24) – (2.28) для кожного дискретного моменту часу t^* є вектор $r(t^*) = (r_1(t^*), r_2(t^*), \dots, r_n(t^*))$, елементи якого є радіусами покриття відповідних сенсорів у моменту часу t^* , з використанням яких досягається мінімізація енерговитрат при заданому діаметрі перетину зон покриття у моменту часу t^* .

Алгоритм роботи інформаційної технології та відповідного програмного забезпечення, що було створене для розв’язання описаної задачі складається з етапів, аналогічних пункту 2.1.1 з відмінністю лише у виконанні за умови наявності перетину зон покриття у момент часу t^* . В свою чергу величина t^* обирається з кроком Δt .

2.1.3 Оцінка ефективності покриття та підходи обчислення площі покритої датчиками території у випадку стаціонарних та динамічних датчиків

Для оцінки ефективності покриття введемо відносну оцінку якості покриття $E_f^{i,j}$, що буде рівною відношенню площі покритої території до площі перетину зон покриття пари датчиків s_i та s_j , у вигляді (2.29):

$$E_f^{i,j} = \frac{S_{cov}^{i,j}}{S_{int}^{i,j}}, \quad (2.29)$$

де $S_{cov}^{i,j}$ – площа покрита сенсорами i та j , $S_{int}^{i,j}$ – площа перетину зон покриття датчиків i та j .

Будемо вважати, що зона покриття датчику є коло з центром в точці, що представлена координатами датчику (x_i, y_i) та радіусом r_i , що, в свою чергу, є радіусом покриття сенсору. Таким чином, площу покриття датчиками i та j обчислимо з використанням формули (2.30):

$$S_{cov}^{i,j} = \pi(r_i^2 + r_j^2), \quad (2.30)$$

де r_i та r_j – радіуси покриття датчиків i та j .

Розглянемо випадок перетину датчиків з різними радіусами покриття (Рис. 2.4).

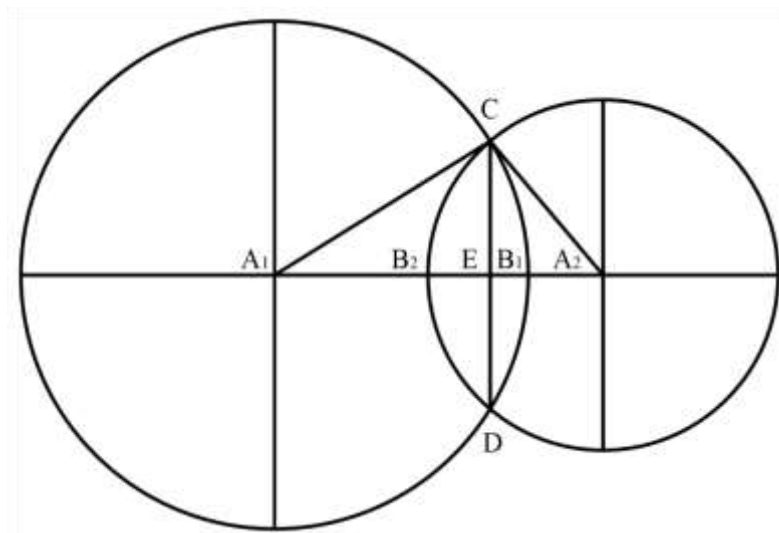


Рисунок 2.4 – Схема перетину зон покриття

Площу перетину зон покриття $S_{int}^{i,j}$ датчиків s_i та s_j можна представити як суму відповідних сегментів зон перетину кожного сенсору S_{segm_i} та S_{segm_j} (2.31):

$$S_{int}^{i,j} = S_{segm_i} + S_{segm_j}. \quad (2.31)$$

Величини S_{segm_i} та S_{segm_j} обчислимо з використанням формул (2.32) та (2.33) [86]:

$$S_{segm_i} = \frac{1}{2}r_i^2(\angle CA_1D - \sin(\angle CA_1D)), \quad (2.32)$$

$$S_{segm_j} = \frac{1}{2}r_j^2(\angle CA_2D - \sin(\angle CA_2D)), \quad (2.33)$$

де $\angle CA_1D = 2\arcsin\left(\frac{DC}{2A_1C}\right)$, $\angle CA_2D = 2\arcsin\left(\frac{DC}{2A_2C}\right)$, $CD = 2CE$, $CE = \frac{2\sqrt{p(p-A_1C)(p-A_2C)(p-A_1A_2)}}{A_1A_2}$, $p = \frac{A_1C+A_2C+A_1A_2}{2}$, $A_1C = r_i$, $A_2C = r_j$.

У описаній вище формулі CE обчислюється як висота, що проведена до сторони A_1A_2 , у трикутнику A_1A_2C з використанням формули Герона.

Під час руху датчик s_i у момент часу t^* знаходиться у певній позиції $(x_i(t^*), y_i(t^*))$ та покриває площу, що рівна

$$S_i(t^*) = \pi r_i^2(t^*), \quad (2.34)$$

де $r_i(t^*)$ – радіус покриття датчику у період часу t^* .

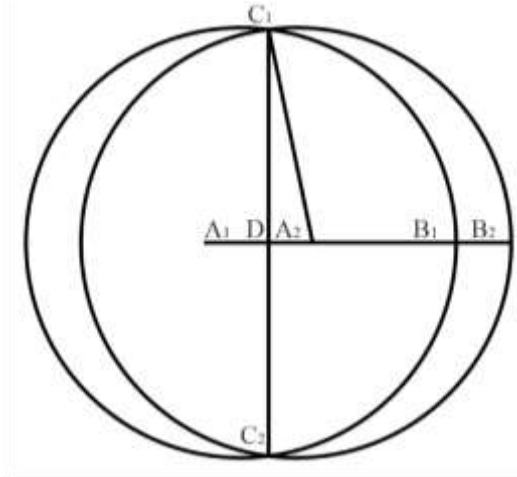


Рисунок 2.5 – Позиція датчику у моменти часу t^* та $t^* + \Delta t$

На Рис. 2.5 точки A_1 та A_2 є позиціями сенсору у моменти часу t^* та $t^* + \Delta t$ з відповідними координатами $(x_i(t^*), y_i(t^*))$ та $(x_i(t^* + \Delta t), y_i(t^* + \Delta t))$. В свою чергу, радіуси покриття будуть рівними $r_i(t^*) = A_1B_1$ та $r_i(t^* + \Delta t) = A_2B_2$ відповідно. У момент часу $t^* + \Delta t$ площа загальної покритої датчиком території $\bar{S}_i(t^* + \Delta t)$ буде рівна сумі площі покриття датчику s_i у момент часу t^* $S_i(t^*)$ та величині приросту покриття $\Delta S_i(t^* + \Delta t)$:

$$\bar{S}_i(t^* + \Delta t) = S_i(t^*) + \Delta S_i(t^* + \Delta t). \quad (2.35)$$

Обчислимо величину приросту покриття $\Delta S_i(t^* + \Delta t)$ як різницю значень $S_i(t^* + \Delta t)$ та величину перетину покриття у моменти часу t^* та $t^* + \Delta t$ у вигляді (2.36) [86]:

$$\Delta S_i(t^* + \Delta t) = S_i(t^* + \Delta t) - \Delta S_i, \quad (2.36)$$

де $\Delta S_i = S_i(t^*) \cap S_i(t^* + \Delta t)$.

Рівняння (2.36) може бути представлене у вигляді:

$$\Delta S_i(t^* + \Delta t) = \pi r_i^2(t^* + \Delta t) - \Delta S_i, \quad (2.37)$$

де $\Delta S_i = S_i(t^*) \cap S_i(t^* + \Delta t)$.

Друга частина рівняння (2.37) може бути обчислена з використанням формул (2.31)-(2.33) або наближено як площа еліпса з великою віссю DB_1 та малою віссю DC_1 . Довжина DB_1 буде рівною:

$$DB_1 = r_i(t^*) - \frac{A_1 A_2}{2}, \quad (2.38)$$

де $A_1 A_2 = \sqrt{(x_i(t^* + \Delta t) - x_i(t^*))^2 + (y_i(t^* + \Delta t) - y_i(t^*))^2}$.

З прямокутного трикутника $A_2 C_1 D$ знайдемо $C_1 D$ (2.39):

$$C_1 D = \sqrt{(A_2 C_1)^2 - (A_2 D)^2}, \quad (2.39)$$

де $A_2 C_1 = r_i(t^* + \Delta t)$.

З врахуванням рівнянь (2.38) та (2.39) рівняння (2.37) буде мати вигляд (2.40):

$$\Delta S_i(t^* + \Delta t) = \pi r_i^2(t^* + \Delta t) - C_1 D \cdot DB_1. \quad (2.40)$$

2.2 Методи максимального покриття території сенсорами з оптимізацією енерговитрат, вартості мережі та кількістю використаних сенсорів

2.2.1 Методи максимального покриття території сенсорами з оптимізацією енерговитрат та кількістю використаних сенсорів

Розглянемо випадок території, що повинна бути покритою датчиками з урахуванням енерговитрат. Будемо розглядати територію у двовимірному лінійному просторі. Очевидно, що територія має площу, позначимо її T_s . Відповідно до форми території, що розглядається, площа може бути обчислена різними способами. Розглянемо такі форми території:

1. Територія прямокутної форми:

$$T_s = ab, \quad (2.41)$$

де a та b – довжина та ширина ділянки.

2. Територія T довільної форми, рівняння, кривої, що обмежує територію відоме:

$$T_s = \iint_T f(x, y) dx dy, \quad (2.42)$$

де $f(x, y)$ – рівняння прямої, що обмежує територію.

3. Територія T довільної форми, рівняння кривої, що обмежує територію невідоме. Застосування теореми Піка [72]:

$$T_s = P_i + \frac{P_b}{2} - 1, \quad (2.43)$$

де P_i – кількість внутрішніх точок, P_b – кількість граничних точок.

Для використання теореми Піка необхідно побудувати на території, що розглядається, рівномірну сітку з цілим кроком. Для збільшення точності обчислення значення площі необхідно зменшити крок сітки. Також територія довільної форми може бути наближена ортогональними багатокутниками [3]. На рисунках нижче наведено приклад наближення території з використанням ортогональних багатокутників (Рис. 2.6) та використання теореми Піка (Рис. 2.7).



а) початкова територія;



б) наближення багатокутником.

Рисунок 2.6 – Наближення території ортогональним багатокутником

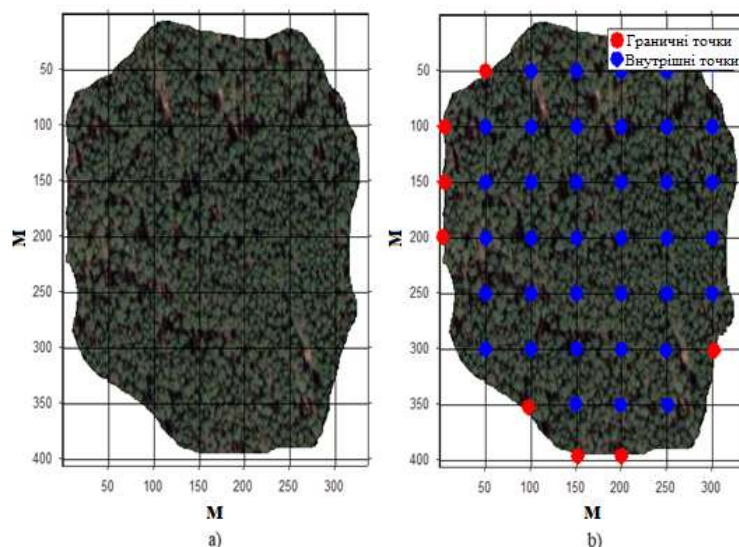


Рисунок 2.7 – а) Покриття території сіткою з рівновіддаленим кроком та б) Використання теореми Піка.

Розглянемо сенсорну мережу $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$, n – кількість сенсорів. В свою чергу, кожен датчик володіє такими параметрами:

$$s_i = s_i(x_i, y_i, r_i, Bc_i), \quad (2.44)$$

де x_i, y_i – координати сенсору, r_i – радіус покриття, Bc_i – об'єм акумулятора датчику(mAh).

Очевидно, що кожен датчик володіє енерговитратами. Будемо обчислювати їх аналогічно до формул (2.1) та (2.2) у вигляді [1]:

$$E = E_r + E_s + E_a, \quad (2.45)$$

де E_r – енерговитрати прийому даних, E_s – енерговитрати передачі даних, E_a – енерговитрати моніторингу покритої території, $E_{a_i} = r_i^2$, r_i – радіус покриття i -сенсору, $i = \overline{1, n}$, n – кількість датчиків.

Проблема полягає у максимальному покритті території при мінімальних енерговитратах. Розглянемо класичну задачу пакування рюкзаку, що полягає у формуванні множини об'єктів мінімальної ваги при максимальній вартості [121]. Дана задача представлена у формі (2.46) – (2.47):

$$F(x_1, x_2, \dots, x_n) \rightarrow \max, \quad (2.46)$$

$$\sum_{i=1}^n x_i w_i \leq W, \quad (2.47)$$

де $F(x_1, x_2, \dots, x_n) = \sum_{i=1}^n x_i p_i$, $x_i \in [0, m_i]$, $x_i \in \mathbb{N}^0$, $m_i \in \mathbb{N}^0$ – кількість об'єктів i -типу, p_i – ціна об'єкту, w_i – вага об'єкту, W – ємність рюкзака, $i = \overline{1, n}$, n – кількість типів об'єктів.

Описана вище задача може бути модифікована для відшукування множини датчиків, що забезпечують максимальне покриття при мінімальних енерговитратах, де «рюкзаком» буде територія, «цінною предмета» буде енерговитрати сенсору, а «вагою предмета» буде площа покриття сенсору. Для цього змінимо цільову функцію (2.46) на відшукування мінімальних енерговитрат з врахуванням (2.45) таким чином:

$$F(x_1, x_2, \dots, x_n) = \sum_{i=1}^n x_i E_i, \quad (2.48)$$

де E_i – енерговитрати датчику i , x_i – кількість датчиків i -типу, $i = \overline{1, n}$, n – кількість типів датчиків.

Обмеження (2.47) сформулюємо як умову досягнення значення площі, покритої датчиками, величини рівної або більшої площі території, що розглядається, у вигляді:

$$\sum_{i=1}^n x_i \pi r_i^2 \geq T_s, \quad (2.49)$$

де r_i – радіус покриття датчику i , x_i – кількість датчиків i -типу, T_s – площа території, $i = \overline{1, n}$, n – кількість типів датчиків.

Враховуючи описане вище, сформулюємо задачу пошуку оптимального набору датчиків при максимізації покритої території з мінімізацією енерговитрат у вигляді (2.50) – (2.53):

$$F(x_1, x_2, \dots, x_n) \rightarrow \min_{x \in G}, \quad (2.50)$$

$$G: \begin{cases} x_1 \in [0; m_1^{max}] \\ x_2 \in [0; m_2^{max}] \\ \dots \\ x_n \in [0; m_n^{max}] \end{cases}, \quad (2.51)$$

$$\sum_{i=1}^n x_i \pi r_i^2 \geq T_s, \quad (2.52)$$

$$i = \overline{1, n}, \quad (2.53)$$

де r_i – радіус покриття i -сенсору, T_s – площа території, m_i^{max} – максимальна доступна кількість сенсорів i типу, n – кількість типів датчиків.

Доведемо існування розв’язку сформульованої задачі.

Лема 2.3

Функція $F(x_1, x_2, \dots, x_n)$ досягає в області G свого мінімального значення.

Доведення

Функція $F(x_1, x_2, \dots, x_n)$ є неперервною як сума неперервних функцій (2.48). Область G є обмеженою так як всі змінні мають мінімальне та максимальне значення $x_i \in [0; m_n^{max}]$, $i = \overline{1, n}$, n – кількість типів датчиків. Також область G є замкненою, так як для всіх змінних відрізки $[0; m_n^{max}]$ є замкненими. Таким чином,

область G є компактом, та, згідно теореми Вейерштрасса, функція $F(x_1, x_2, \dots, x_n)$ досягає в області G свого мінімального значення. Лему доведено. ■

Теорема 2.3

Задача (2.50) – (2.53) має розв'язок.

Доведення

Функція $F(x_1, x_2, \dots, x_n)$ є опуклою, неперервною та диференційованою. Згідно Лема 2.3 область G є компактом, тоді, згідно теореми Куна-Такера, існує сідлова точка функції Лагранжа і вона є екстремумом. Таким чином, задача (2.50) – (2.53) має розв'язок. Теорему доведено. ■

Для розв'язання описаної задачі використаємо метод градієнтного спуску. Розв'язком оптимізаційної задачі (2.50)-(2.53) буде вектор $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, елементи якого будуть означати оптимальну кількість датчиків за яких досягається максимальне покриття при мінімізації енерговитрат.

Розглянемо випадок коли необхідно забезпечити обмін інформацією між сенсорами. У такому випадку необхідною умовою для забезпечення обміну інформацією є перетин зон покриття. Позначимо як c мінімально-допустимий діаметр перетину зон покриття. Схематично це представлено на Рис. 2.2.

Перетин зон покриття датчиків потрібно брати до уваги під розв'язання задачі максимізації покриття при мінімізації енерговитрат. У загальному випадку дану задачу представимо у вигляді (2.54) [26]:

$$\begin{cases} E(r, c) \rightarrow \min \\ Z(r, c) \rightarrow \max \end{cases} \quad (2.54)$$

де $E(r, c)$ – енерговитрати, $Z(r, c)$ – величина покритої території, r – радіус покриття датчиків, c – мінімально-допустимий діаметр перетину зон покриття датчиків.

Беручи до уваги перетин зон покриття датчиків величина покриття $Z(r, c)$ у рівнянні (2.54) може бути представлена як різниця між величинами покритої території та загальною площею перетину зон покриття у вигляді (2.55):

$$Z(r, c) = Z_{covered}(r, c) - Z_{intersected}(r, c). \quad (2.55)$$

Будемо вважати, що зоною покриття сенсору є коло з центром у точці (x_i, y_i) та радіусом r_i . Таким чином значення загальної покритої території будемо обчислювати у вигляді:

$$Z_{covered} = \sum_{i=1}^N \pi r_i^2. \quad (2.56)$$

У рівнянні (2.56) величина N – це загальна кількість сенсорів, що може бути обчислена як ціла частина від ділення значення загальної площі T_s до площі покриття одного датчику (2.57):

$$N = \left\lfloor \frac{T_s}{\pi r^2} \right\rfloor, \quad (2.57)$$

де T_s – площа території, що розглядається (2.40)-(2.42).

Значення величини перетину зон покриття обчислимо з використанням формул (2.30)-(2.32) у вигляді (2.58):

$$Z_{intersected}(r, c) = m \frac{r^2}{2} (K(r, c) - \sin(K(r, c))), \quad (2.58)$$

де $K(r, c) = 2 \arccos\left(\frac{r-c}{r}\right)$, m – кількість перетинів.

Будемо вважати, що кожен датчик має перетин з чотирьох сторін, тобто $m = 4N$.

Таким чином, задача (2.54)-(2.58) є нелінійною задачею багатокритеріальної оптимізації. Представимо значення $Z(r, c)$ як величину непокритої території (2.59):

$$Z(r, c) = T_s - Z_{covered}(r, c) + Z_{intersected}(r, c), \quad (2.59)$$

де T_s – площа території, що розглядається (2.41)-(2.43).

Таким чином, із врахуванням співвідношення (2.59) задача (2.54) буде сформульована у вигляді:

$$\begin{cases} E(r) \rightarrow \min \\ Z(r, c) \rightarrow \min \end{cases} \quad (2.60)$$

$$Z(r, c) = T_s - Z_{covered}(r, c) + Z_{intersected}(r, c), \quad (2.61)$$

$$E = E_r + E_s + E_a, \quad (2.62)$$

$$r_{min} \leq r \leq r_{max}, \quad (2.63)$$

$$c_{min} \leq c \leq r_{max}, \quad (2.64)$$

де r – радіус покриття сенсорів, r_{min} та r_{max} – мінімальне та максимальне значення радіусу покриття сенсорів, c – діаметр перетину зон покриття, c_{min} – мінімально-допустимий діаметр перетину зон покриття, E_r – енерговитрати прийому даних, E_s – енерговитрати передачі даних, $E_a = r^2$ – енерговитрати моніторингу покритої території.

Використовуючи метод згортки параметрів, представимо цільову функцію задачі мінімізації енерговитрат при максимізації покриття з урахуванням перетину зон покриття датчиків у вигляді:

$$F(r, c) = \alpha Z(r, c) + (1 - \alpha)E(r, c), \quad (2.65)$$

де α – експертна оцінка важливості параметрів.

Очевидно, що кількість датчиків є обмеженою величиною. Сформулюємо дане обмеження у таким чином:

$$N(r) \leq N^*, \quad (2.66)$$

де $N(r) = \left\lfloor \frac{T_s}{\pi r^2} \right\rfloor$, N^* – кількість доступних сенсорів.

Враховуючи функцію (2.65) та обмеження (2.66) представимо задачу (2.60) – (2.64) у вигляді:

$$F(r, c) \rightarrow \min_{(r,c) \in G}, \quad (2.67)$$

$$G: \begin{cases} r \in [r_{min}, r_{max}] \\ c \in [c_{min}, r_{max}] \end{cases}, \quad (2.68)$$

$$0 \leq N(r) \leq N^*, \quad (2.69)$$

де $N^* = const$ – кількість доступних сенсорів.

Доведемо існування розв’язку сформульованої задачі [114].

Лема 2.4

Функція $F(r, c)$ досягає в області G свого мінімального значення.

Доведення

Функція $F(r, c)$ є неперервною як сума неперервних функцій (2.65). Область G є обмеженою так як всі змінні мають мінімальне та максимальне значення $r \in [r_{min}, r_{max}]$, $c \in [c_{min}, r_{max}]$. Також область G є замкненою, так як для змінних

r та c відрізки $[r_{min}, r_{max}]$ та $[c_{min}, r_{max}]$ є замкненими. Таким чином, область G є компактом, та, згідно теореми Вейерштрасса, функція $F(r, c)$ досягає в області G свого мінімального значення. Лему доведено. ■

Теорема 2.4

Задача (2.67) – (2.69) має розв’язок.

Доведення

Функція $F(r, c)$ є опуклою я лінійна комбінація опуклих функцій, неперервною та диференційованою. Згідно Леми 2.4 область G є компактом, тоді, згідно теореми Куна-Такера, існує сідлова точка функції Лагранжа і вона є екстремумом. Таким чином, задача (2.67) – (2.69) має розв’язок. Теорему доведено. ■

Для мінімізації кількості датчиків введемо додаткову умову у вигляді $N(r) \rightarrow \min$. З врахуванням даної умови, задачу мінімізації енерговитрат та кількості датчиків при максимізації покриття (2.60) – (2.64) сформулюємо таким чином [74]:

$$\begin{cases} E(r) \rightarrow \min \\ Z(r, c) \rightarrow \min, \\ N(r) \rightarrow \min \end{cases} \quad (2.70)$$

$$0 \leq r \leq r^{max}, \quad (2.71)$$

$$c_{min} \leq c \leq r^{max} \text{ або } c = const. \quad (2.72)$$

Використовуючи метод згортки параметрів, побудуємо цільову функцію у формі:

$$F(r, c) = \alpha_1 Z(r, c) + \alpha_2 E(r, c) + (1 - \alpha_1 - \alpha_2)N(r), \quad (2.73)$$

$$\alpha_1 + \alpha_2 \leq 1, \quad (2.74)$$

де α_1 та α_2 – експертні оцінки важливості параметрів.

Умова (2.74) вводиться для того, щоб третій доданок у функції (2.73) не міг бути від’ємним.

Таким чином, проблему (2.70) – (2.72) представимо у вигляді:

$$F(r, c) \rightarrow \min_{(r,c) \in G}, \quad (2.75)$$

$$G: \begin{cases} r \in [r_{min}, r_{max}] \\ c \in [c_{min}, r_{max}] \end{cases}, \quad (2.76)$$

$$\alpha_1 + \alpha_2 \leq 1. \quad (2.77)$$

Доведення існування розв'язку описаної проблеми аналогічне Лемі 2.4 та Теоремі 2.4.

У цільових функціях (2.65) та (2.73) відповідні параметри α , α_1 та α_2 можна використовувати як невідомі змінні. Таким чином цільові функції будуть мати вигляд:

$$F_1(r, c, \alpha) = \alpha Z(r, c) + (1 - \alpha)E(r, c), \quad (2.78)$$

$$F_2(r, c, \alpha_1, \alpha_2) = \alpha_1 Z(r, c) + \alpha_2 E(r, c) + (1 - \alpha_1 - \alpha_2)N(r). \quad (2.79)$$

Відповідно до функції (2.78) задача (2.67) – (2.69) буде мати вигляд:

$$F_1(r, c, \alpha) \rightarrow \min_{(r,c,\alpha) \in G}, \quad (2.80)$$

$$G: \begin{cases} r \in [r_{min}, r_{max}] \\ c \in [c_{min}, r_{max}] \\ \alpha \in [0,1] \end{cases}, \quad (2.81)$$

$$0 \leq N(r) \leq N^*. \quad (2.82)$$

Доведемо існування розв'язку описаної задачі [114].

Лема 2.5

Функція $F_1(r, c, \alpha)$ досягає в області G свого мінімального значення.

Доведення

Функція $F_1(r, c, \alpha)$ є неперервною як сума неперервних функцій (2.76). Область G є обмеженою так як всі змінні мають мінімальне та максимальне значення $r \in [r_{min}, r_{max}]$, $c \in [c_{min}, r_{max}]$, $\alpha \in [0,1]$. Також область G є замкненою, так як для змінних r , c та α відрізки $[r_{min}, r_{max}]$, $[c_{min}, r_{max}]$ та $[0,1]$ є замкненими. Таким чином, область G є компактом, та, згідно теореми Вейерштрасса, функція $F_1(r, c, \alpha)$ досягає в області G свого мінімального значення. Лему доведено. ■

Теорема 2.5

Задача (2.80) – (2.82) має розв’язок.

Доведення

Функція $F_1(r, c, \alpha)$ є опуклою як лінійна комбінація опуклих функцій, неперервною та диференційованою. Згідно Лема 2.5 область G є компактом, тоді, згідно теореми Куна-Такера, існує сідлова точка функції Лагранжа і вона є екстремумом. Таким чином, задача (2.80) – (2.82) має розв’язок. Теорему доведено. ■

Відповідно до функції (2.79) задача (2.75) – (2.77) буде мати вигляд:

$$F_2(r, c, \alpha_1, \alpha_2) \rightarrow \min_{(r, c, \alpha_1, \alpha_2) \in G}, \quad (2.83)$$

$$G: \begin{cases} r \in [r_{min}, r_{max}] \\ c \in [c_{min}, r_{max}] \\ \alpha_1 \in [0, 1] \\ \alpha_2 \in [0, 1] \end{cases}, \quad (2.84)$$

$$\alpha_1 + \alpha_2 \leq 1. \quad (2.85)$$

Доведемо існування розв’язку описаної задачі.

Лема 2.6

Функція $F_2(r, c, \alpha_1, \alpha_2)$ досягає в області G свого мінімального значення.

Доведення

Функція $F_2(r, c, \alpha_1, \alpha_2)$ є неперервною як сума неперервних функцій (2.79). Область G є обмеженою так як всі змінні мають мінімальне та максимальне значення $r \in [r_{min}, r_{max}]$, $c \in [c_{min}, r_{max}]$, $\alpha_1 \in [0, 1]$, $\alpha_2 \in [0, 1]$. Також область G є замкненою, так як для змінних r , c , α_1 та α_2 відрізки $[r_{min}, r_{max}]$, $[c_{min}, r_{max}]$ та $[0, 1]$ є замкненими. Таким чином, область G є компактом, та, згідно теореми Вейерштрасса, функція $F_2(r, c, \alpha_1, \alpha_2)$ досягає в області G свого мінімального значення. Лему доведено. ■

Теорема 2.6

Задача (2.83) – (2.85) має розв’язок.

Доведення

Функція $F_2(r, c, \alpha_1, \alpha_2)$ є опуклою як лінійна комбінація опуклих функцій, неперервною та диференційованою. Згідно Леми 2.6 область G є компактом, тоді, згідно теореми Куна-Такера, існує сідлова точка функції Лагранжа і вона є екстремумом. Таким чином, задача (2.81) – (2.82) має розв’язок. Теорему доведено. ■

Для пошуку розв’язків задач (2.67) – (2.69), (2.75) – (2.77), (2.80) – (2.82) та (2.83) – (2.85) використаємо метод градієнтного спуску. Розв’язками задач буде пара величин (r_{opt}, c_{opt}) , що будуть величиною оптимального радіусу покриття та величини перетину зон покриття за яких досягається максимальне покриття при мінімізації енерговитрат.

2.2.2 Метод максимального покриття території сенсорами з оптимізацією вартості мережі

Очевидно, що сенсори мають свою вартість, що складається з вартості зарядки акумулятора, вартості обслуговування, вартості розробки програмного забезпечення, вартості ремонту та підтримки. Як наслідок, збільшення кількості датчиків призводить до зростання загальної вартості мережі.

Розглянемо територію довільної форми, площа якої рівна T_S м². Цю зону необхідно покрити датчиками з радіусом охоплення r м. Позначимо зону покриття одного датчика як S_1 . Вартість всієї мережі буде дорівнює кількості використаних датчиків помноженій на вартість одного датчика. Під вартістю датчика розумітимуть загальні витрати, пов’язані з покупкою, експлуатацією та обслуговуванням датчика. Позначимо вартість одного датчика P_1 , а площу охопленої зони як $S_{covered}$. Таким чином, задача мінімізації вартості мережі з максимізацією покриття можна записати у вигляді [62]:

$$\begin{cases} P(r) = N(r)P_1 \rightarrow \min \\ S_{covered}(r, c) \rightarrow \max \end{cases} \quad (2.86)$$

де N – кількість сенсорів.

У формулі (2.86) N – кількість сенсорів, що обчислюється як ціла частина від ділення площі території на площу покриття одного датчику:

$$N(r) = \left\lfloor \frac{T_s}{S_1} \right\rfloor, \quad (2.87)$$

де T_s – площа території, S_1 – площа покриття одного датчику.

Щоб знайти точну кількість датчиків, слід враховувати можливість перетину зон покриття датчика та розмір площі неохопленої території. Згідно цього твердження площа покриття одного датчика не повинна розглядатися як πr^2 , а повинна бути обчислена як площа квадрата, описаного навколо кола з радіусом охоплення r :

$$S_1(r) = 4r^2. \quad (2.88)$$

Розглянемо випадок покриття території чотирма датчиками з перетином зон покриття, що схематично можна представити у вигляді:

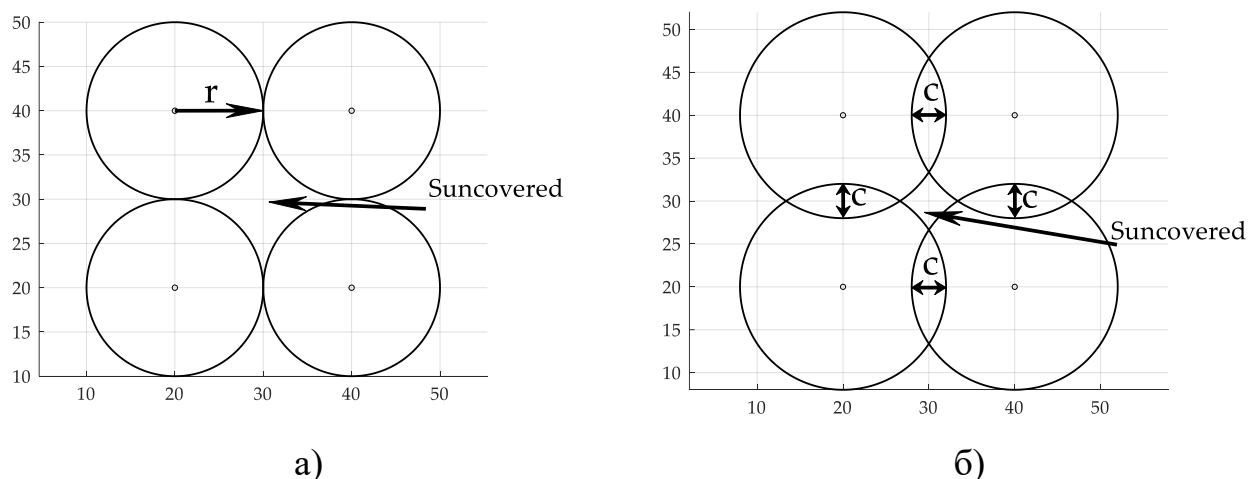


Рисунок 2.8 – Охоплення території: а) без перетину зон покриття; б) з перетином зон покриття

Згідно з рисунком 2.8а значення площі непокритої території можна розрахувати як різницю між площею квадрата зі стороною r^2 і площею чотирьох сегментів з кутом 90 градусів або як різницю площі квадрата та площі кола таким чином:

$$S_{uncovered}(r) = (2r)^2 - 4\pi r^2 \frac{90}{360} = (2r)^2 - \pi r^2 \approx 0.86r^2. \quad (2.89)$$

На рисунку 2.8б значення c є рівнем перетину зон покриття датчика. З урахуванням цієї величини значення охопленої одним датчиком площі (2.88) та неохопленої території (2.89) можна обчислити у вигляді:

$$S_1(r, c) = (2r - c)^2, \quad (2.90)$$

$$S_{uncovered}(r, c) = (2r - c)^2 - \pi r^2. \quad (2.91)$$

При максимізації охоплення території площа неохопленої території мінімізується. Таким чином, можна вимагати мінімізації непокритої площі, у зв'язку з чим задачу мінімізації вартості сенсорної мережі при максимізації покриття (2.86) з урахуванням (2.87)-(2.91) можна сформулювати у формі:

$$\begin{cases} P(r, c) \rightarrow \min \\ S_{uncovered}(r, c) \rightarrow \min \end{cases} \quad (2.92)$$

$$r_{min} \leq r \leq r_{max}, \quad (2.93)$$

$$0 \leq c \leq c_{max}. \quad (2.94)$$

У задачі (2.92)-(2.94) врахована можливість регуляції радіусу покриття (2.93) та діаметру перетину зон покриття (2.94). Результатом розв'язання описаної задачі буде множина парето-оптимальних пар радіусів покриття та рівнів перетину зон покриття з використанням яких досягається максимальне покриття території при мінімальній вартості мережі.

Використовуючи метод згортки критеріїв побудуємо цільову функцію:

$$F(r, c) = \alpha P(r, c) + (1 - \alpha) S_{uncovered}(r, c), \quad (2.95)$$

де α – експертна оцінка важливості параметрів.

З використанням функції (2.95) перепишемо задачу (2.92)-(2.94) у вигляді:

$$F(r, c) \rightarrow \min_{(r,c) \in G}, \quad (2.96)$$

$$G: \begin{cases} r \in [r_{min}, r_{max}] \\ c \in [c_{min}, c_{max}] \end{cases}. \quad (2.97)$$

Доведемо існування розв'язку описаної проблеми [114].

Лема 2.7

Функція $F(r, c)$ (2.96) досягає в області G (2.97) свого мінімального значення.

Доведення

Доведення аналогічне доведенню Лема 2.4. ■

Теорема 2.7

Задача (2.96) – (2.97) має розв’язок.

Доведення

Доведення аналогічне доведенню Теорема 2.4. ■

Параметр α можна включити у функцію $F(r, c)$ у якості невідомого параметру. Таким чином отримуємо задачу вигляді:

$$F_1(r, c, \alpha) \rightarrow \min_{(r, c, \alpha) \in G}, \quad (2.98)$$

$$G: \begin{cases} r \in [r_{min}, r_{max}] \\ c \in [c_{min}, r_{max}] \\ \alpha \in [0, 1] \end{cases} \quad (2.99)$$

Доведемо існування розв’язку описаної задачі.

Лема 2.8

Функція $F_1(r, c, \alpha)$ (2.98) досягає в області G (2.99) свого мінімального та максимального значення.

Доведення

Доведення аналогічне доведенню Лема 2.5. ■

Теорема 2.8

Задача (2.98) – (2.99) має розв’язок.

Доведення

Доведення аналогічне доведенню Теорема 2.5. ■

Для пошуку розв’язків задач (2.96) – (2.97) та (2.98) – (2.99) використаємо метод градієнтного спуску. Розв’язками задач буде пара величин (r_{opt}, c_{opt}) , що

будуть величиною оптимального радіусу покриття та величини перетину зон покриття за яких досягається максимальне покриття при мінімізації енерговитрат.

2.3 Алгоритми побудови оптимальної траєкторії руху датчиків

2.3.1 Побудова оптимальної траєкторії руху датчиків з використанням принципів динамічного програмування

Розглянемо територію, що має довільну форму та розміри. Також дана територія містить ділянки, що вже покриті стаціонарними датчиками або є перешкодами. Задача полягає у відшуванні оптимальної траєкторії для рухомого сенсору з урахуванням обмежень, що полягають у покритті максимальної території з мінімальним перетином зон покриття з перешкодами або з вже покритими ділянками.

Розглянемо датчик, що володіє такими параметрами:

$$s(t) = s(x(t), y(t), v(t), r(t), Bc), \quad (2.100)$$

де $x(t), y(t)$ – позиція сенсору у момент часу t , $v(t), r(t)$ – швидкість руху та радіус покриття датчику у момент часу t , Bc – ємність акумулятора датчику.

Рівняння руху будемо розглядати у вигляді системи диференціальних рівнянь у вигляді (2.101):

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = v_x(t) \cos(\alpha(t)) \\ \frac{dy}{dt} = v_y(t) \sin(\alpha(t)) \end{cases}. \quad (2.101)$$

Використавши наближення диференціальних рівнянь методом скінчених різниць з використанням явної схеми апроксимації першого порядку перепишемо рівняння (2.101) у вигляді (2.102):

$$\begin{cases} x_{i+1} = x_i + \Delta t v_{yi} \cos \alpha_i \\ y_{i+1} = y_i + \Delta t v_{xi} \sin \alpha_i \end{cases}. \quad (2.102)$$

У випадку декількох сенсорів системи (2.101) та (2.102) будуть мати вигляд (2.103) – (2.104) [103]:

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dt} = v_{x1}(t)\cos(\alpha_1(t)) \\ \frac{dy_1}{dt} = v_{y1}(t)\sin(\alpha_1(t)) \\ \vdots \\ \frac{dx_n}{dt} = v_{xn}(t)\cos(\alpha_n(t)) \\ \frac{dy_n}{dt} = v_{yn}(t)\sin(\alpha_n(t)) \end{cases}, \quad (2.103)$$

$$\begin{cases} x_{i+1}^1 = x_i^1 + \Delta t v_{i+1}^{x1} \cos \alpha_{i+1}^1 \\ y_{i+1}^1 = y_i^1 + \Delta t v_{i+1}^{y1} \sin \alpha_{i+1}^1 \\ \vdots \\ x_{i+1}^n = x_i^n + \Delta t v_{i+1}^{xn} \cos \alpha_{i+1}^n \\ y_{i+1}^n = y_i^n + \Delta t v_{i+1}^{yn} \sin \alpha_{i+1}^n \end{cases}, \quad (2.104)$$

де x^i, y^i – позиції сенсорів, v_x^i, v_y^i – компоненти вектору швидкості, $i = \overline{1, n}$, n – кількість датчиків.

Введемо поняття «одичного руху», тобто руху за одичний момент часу $\Delta t = 1$. У такому випадку рівняння (2.104) перепишемо у вигляді:

$$\begin{cases} x_{i+1}^1 = x_i^1 + v_{i+1}^{x1} \cos \alpha_{i+1}^1 \\ y_{i+1}^1 = y_i^1 + v_{i+1}^{y1} \sin \alpha_{i+1}^1 \\ \vdots \\ x_{i+1}^n = x_i^n + v_{i+1}^{xn} \cos \alpha_{i+1}^n \\ y_{i+1}^n = y_i^n + v_{i+1}^{yn} \sin \alpha_{i+1}^n \end{cases}. \quad (2.105)$$

Позначимо другі доданки у правих частинах рівняння (2.105) як Δx та Δy . Розглянемо випадок руху датчику у 4 напрямках вздовж координатних осей відносно поточної позиції сенсору. В свою чергу це призведе до зміни координат. Зміна координат з урахуванням «одичного руху» представлена у таблиці 2.3:

Таблиця 2.3 – Рух датчику вздовж осей координат

Напрямок руху	Рівняння руху
$\uparrow OY$	$\begin{cases} x_{i+1} = x_i \\ y_{i+1} = y_i + v \end{cases}$
$\downarrow OY$	$\begin{cases} x_{i+1} = x_i \\ y_{i+1} = y_i - v \end{cases}$

$\leftarrow OX$	$\begin{cases} x_{i+1} = x_i - v \\ y_{i+1} = y_i \end{cases}$
$\rightarrow OX$	$\begin{cases} x_{i+1} = x_i + v \\ y_{i+1} = y_i \end{cases}$

Для досягнення зменшення енерговитрат введемо до розгляду можливість діагонального руху. Остаточно сенсор може рухатися у вісьмох напрямках, тобто переходити у кожен сусідній до поточного вузол. Схематично це можна представити таким чином (Рис. 2.9) [70, 103]:

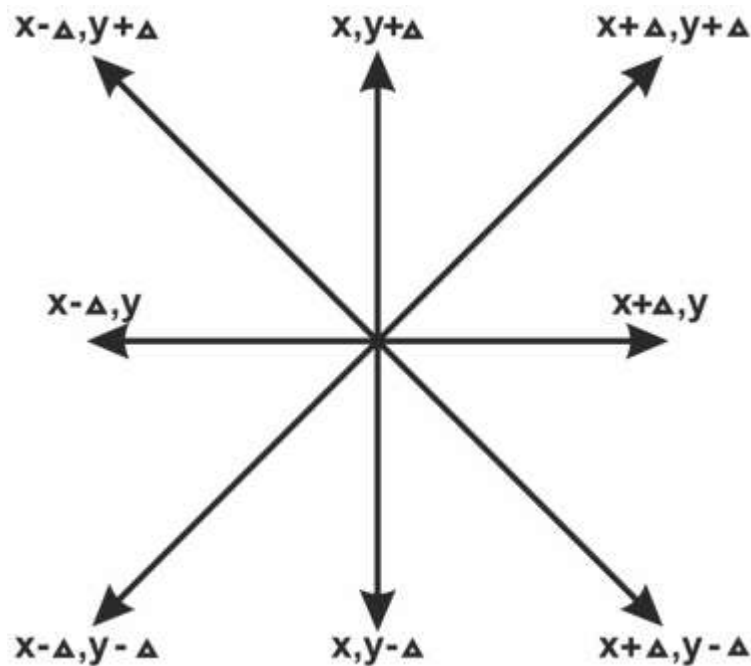


Рисунок 2.9 – Допустимі напрямки руху датчику

У роботі [7] розглядається поетапне вирішення підзавдань під час вирішення основного завдання. У нашому випадку основною проблемою є відшукування оптимального маршруту сенсору для максимізації покриття датчиків. В свою чергу підзадачами будуть відшукування напрямку руху датчику у кожен момент часу t .

Для визначення напрямку «одиничного руху» обчислимо оцінку для кожного з восьми напрямків, що описані вище. Позначимо дані оцінки як c_i^k , де $i = \overline{1,8}$, $k = \overline{1,n}$, n – кількість датчиків. Описані оцінки будемо обчислювати з використанням формули (2.106) [103]:

$$c_i^k = A_{io}^k + A_{iz}^k + A_{is}^k, \quad (2.106)$$

$$A_{io}^k = \frac{1}{2} r_k^2 (\theta - \sin\theta), \quad \theta = 2 \arccos \left(\frac{r_k - h}{r_k} \right), \quad (2.107)$$

де A_{oi}^k – площа ділянки покритої сенсором за межами території, A_{zi}^k – площа ділянки перетину зони покриття датчику та вже покритої зони або перешкоди, A_{is}^k – площа перетину зони покриття з зонами покриття іншими сенсорами $i = \overline{1,8}$, $k = \overline{1,n}$, n – кількість датчиків.

Схематично величини A_{io}^k , A_{iz}^k , A_{is}^k можна зобразити таким чином (Рис. 2.10):

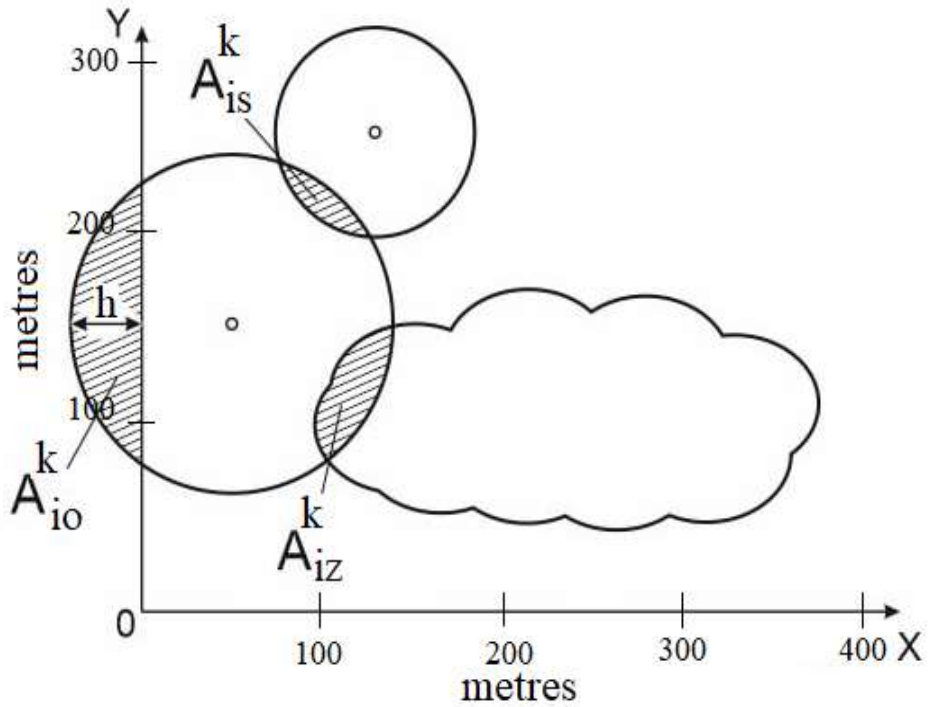


Рисунок 2.10 – Покрита територія та зони перетину

Значення величин A_{iz}^k та A_{is}^k можуть бути обчислені з використанням формул (2.30)-(2.40). Використовуючи принцип Беллмана [6] наступним етапом серед всіх оцінок c_i^k , $i = \overline{1,8}$, $k = \overline{1,n}$, n – кількість датчиків, обираємо найменшу, індекс якої буде напрямком руху датчику на наступному кроці [70]:

$$d_k = \min_i c_i^k. \quad (2.108)$$

Для вибору напрямку руху датчику у випадку наявності декількох однакових оцінок введемо для кожного датчику поняття пріоритетного напрямку руху pw_1^k та другого пріоритетного напрямку руху pw_2^k . Після визначення пріоритетного напрямку d_k (2.108) порівнюємо отримане значення з пріоритетними напрямками.

У випадку $pw_1^k == d_k$ обираємо даний напрямок. В протилежному випадку, коли $pw_1^k \neq d_k$, перевіряємо рівність напрямку другому пріоритетному напрямку, та обираємо його у випадку рівності $pw_2^k == d_k$. У випадку нерівності напрямку жодному з пріоритетних обираємо напрямок, що має мінімальну оцінку та є найближчим до пріоритетних. Для уникнення випадків руху в протилежному напрямку введемо поняття попереднього напрямку pd_k та при виборі напрямку будемо вимагати виконання умови:

$$d_k \neq pd_k. \quad (2.109)$$

У випадку, коли значення кожної з оцінки напрямку руху перевищує певне допустиме значення, що є визначеним експертом C_{max} (2.110) зменшуємо крок руху датчику Δ за формулою (2.111):

$$min c_i^k \geq C_{max}, \quad (2.110)$$

$$\Delta = \frac{\Delta_{current}}{2}. \quad (2.111)$$

Для зупинки алгоритму введемо мінімально допустиму величину кроку Δ_{min} та на кожній ітерації алгоритму будемо перевіряти умову (2.112):

$$\Delta \geq \Delta_{min}. \quad (2.112)$$

Схематично описаний вище алгоритм може бути представлений у вигляді блок-схеми (Рис. 2.11):

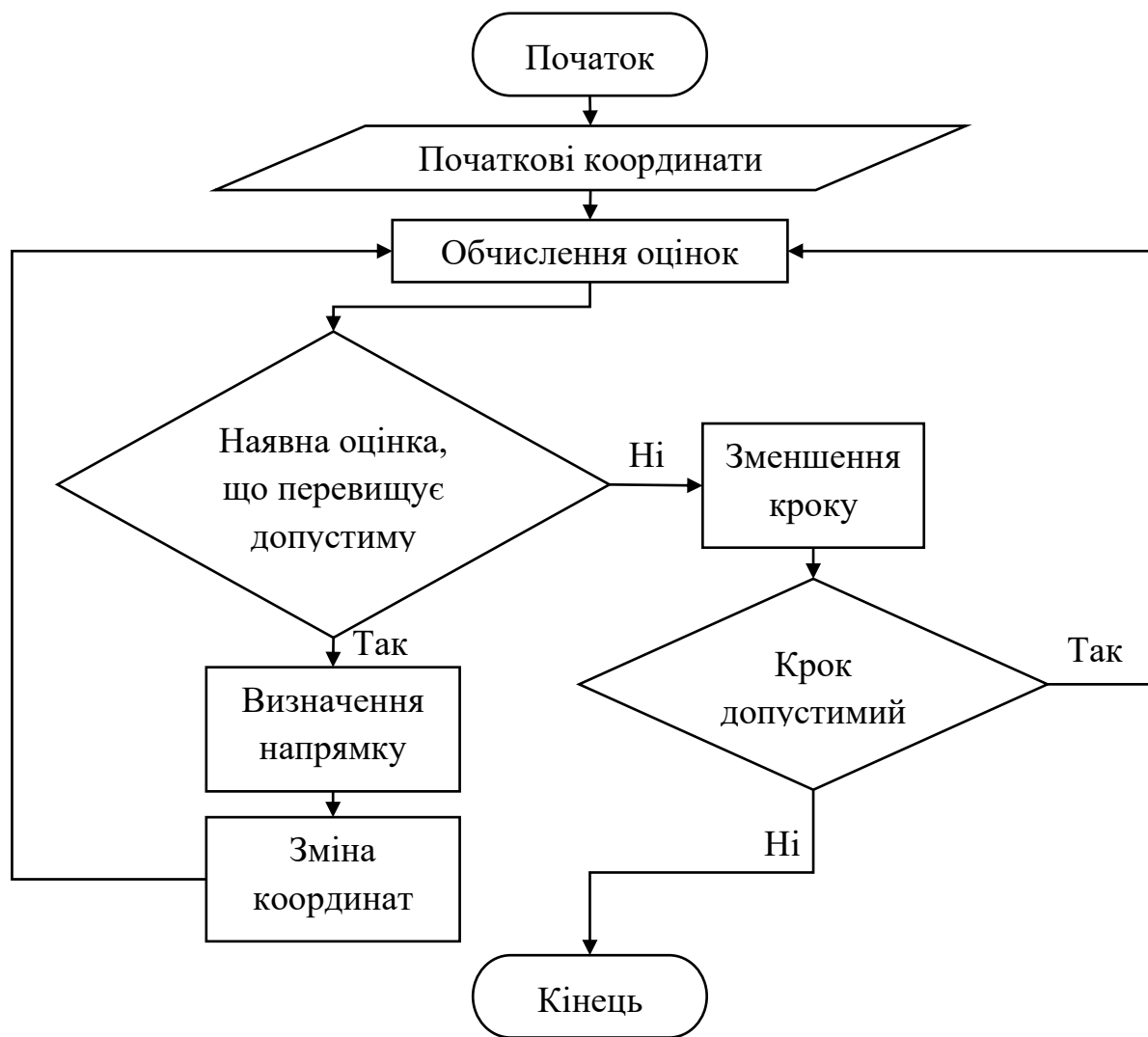


Рисунок 2.11 – Блок-схема алгоритму побудови траєкторії руху датчику з використанням принципів динамічного програмування

Відповідне програмне забезпечення, що працює у режимі реального часу, реалізоване з використанням клієнт-серверної архітектури. Сенсор шле запит до серверу кожен момент часу, коли $t_i \bmod period = 0$. Запит містить ідентифікатор сенсору id , координат, пріоритетних та попереднього напрямків. Після обробки сервер надсилає відповідь, що складається з ідентифікатору датчику, напрямок руху та ознаку зупинки. Обмін даними відбувається у форматі json. У випадку, коли датчик не отримує відповіді протягом певного визначеного часу він продовжує рух у тому самому напрямку [103]. Приклад запиту та відповіді представлено в Таблиці 2.4.

Таблиця 2.4 – Приклад запиту сенсору та відповіді серверу при визначенні напрямку руху

Request	Response
<pre>{ "id": 1; "x": 54.8; "y": 36; "pw1": 2; "pw2": 8; "pd": 5; }</pre>	<pre>{ "id": 1; "direction": 2; "stop": false; }</pre>

2.3.2 Побудова оптимальної траєкторії руху датчиків з використанням сіткового методу

Розглянемо проблему пошуку оптимальної траєкторії руху датчику при обльоті території. Серед всіх характеристик датчику будемо брати до розгляду лише радіус покриття r . Нехай дано територію довільної форми. Будемо розглядати територію у двовимірному просторі. Також територія може містити перешкоди та вже покриті ділянки. Для відшукування оптимальної траєкторії перенесемо територію на площину XOY , таким чином, щоб межі території дотикалися до координатних OX та OY у одній точці. Наступним етапом побудуємо на отриманій площині сітку з кроком, що рівний радіусу покриття датчику r . Територію позначимо як T . Схематично описане вище можна представити таким чином (Рис. 2.12):

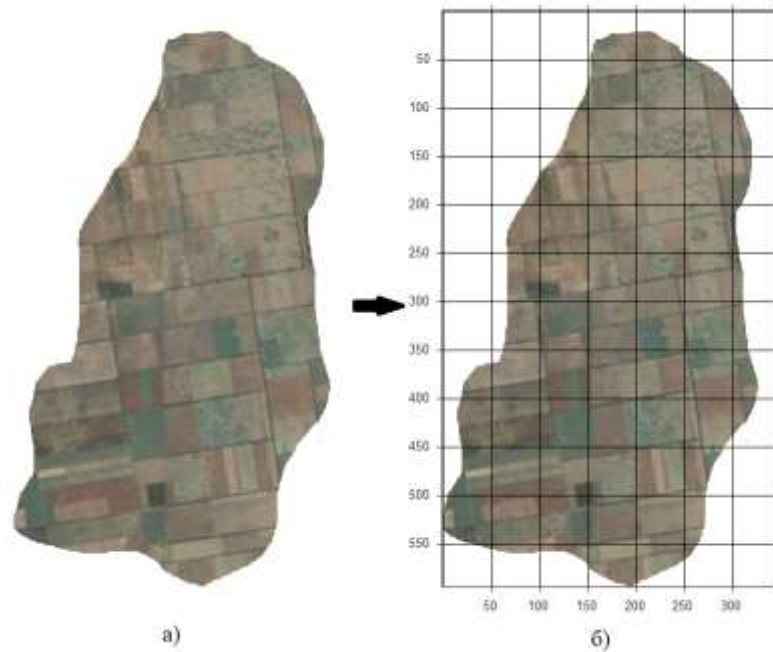


Рисунок 2.12 – а) Вхідна територія; б) Перенесення та покриття території сіткою

Наступним етапом пронумеруємо вузли сітки починаючи з одиниці вздовж осі OX та сформуємо вектор A , елементи якого є відповідними вузлами сітки. Значення елементів вектору будуть рівними площі території s_i , яку покриває сенсор у даній точці або нулю у випадку, вузол сітки не належить території T [74]:

$$a_i = \begin{cases} s_i, & a_i \in T \\ 0, & a_i \notin T \end{cases} \quad (2.113)$$

Значення s_i можуть бути обчислені з використанням формул (2.30)-(2.32) або з використанням теореми Піка [72]. Для використання теореми Піка необхідно додатково побудувати сітку з малим кроком у квадраті, що описаний навколо даної позиції сенсора. Точки даного квадрату будуть мати координати $(x_c - R, y_c - R)$, $(x_c - R, y_c + R)$, $(x_c + R, y_c + R)$, $(x_c + R, y_c - R)$ відповідно.

Також значення елементів вектору A будуть рівними нулю у випадку, коли значення покритої площі у даному вузлі сітки менше певного експертного значення мінімально допустимої площі покриття, яке позначимо S_{min} :

$$a_i = \begin{cases} s_i, & a_i \in T \\ 0, & a_i \notin T \vee s_i \leq S_{min} \end{cases} \quad (2.114)$$

Наступним етапом сформуємо матрицю переходів між вузлами P . Елементи даної матриці p_{ij} будуть рівними одиниці у випадку, коли значення $a_i > 0$ та $a_j > 0$. У випадку, коли $a_i = 0$ або $a_j = 0$ значення p_{ij} буде рівним нулю:

$$p_{ij} = \begin{cases} 1, & a_i > 0 \wedge a_j > 0 \\ 0, & a_i = 0 \vee a_j = 0 \end{cases} \quad (2.115)$$

Після формування матриці P задача полягає у відшуванні гамільтонового шляху [11], тобто шляху що проходить кожен вузол лише один раз.

Розглянемо випадок багатозв'язної області. У такому випадку траєкторія, побудована з використанням описаного вище алгоритму, буде покривати не всю область, що розглядається. Для забезпечення повноти покриття приведемо область до однозв'язної шляхом об'єднання областей. Дане об'єднання будемо проводити за допомогою додаткових переходів між вузлами. Будемо додавати один зв'язок між найближчими вузлами для кожної пари однозв'язних областей [74]. На рисунку 2.13а представлено двозв'язну область. Для перетворення її в однозв'язну область (Рис. 2.13б) необхідно додати перехід між вузлом 39 та 46, тобто значення відповідних елементів матриці переходів зробити рівними одиниці: $p_{39,45} = 1$ та $p_{45,39} = 1$. Схематично це можна зобразити таким чином (Рис. 2.13):

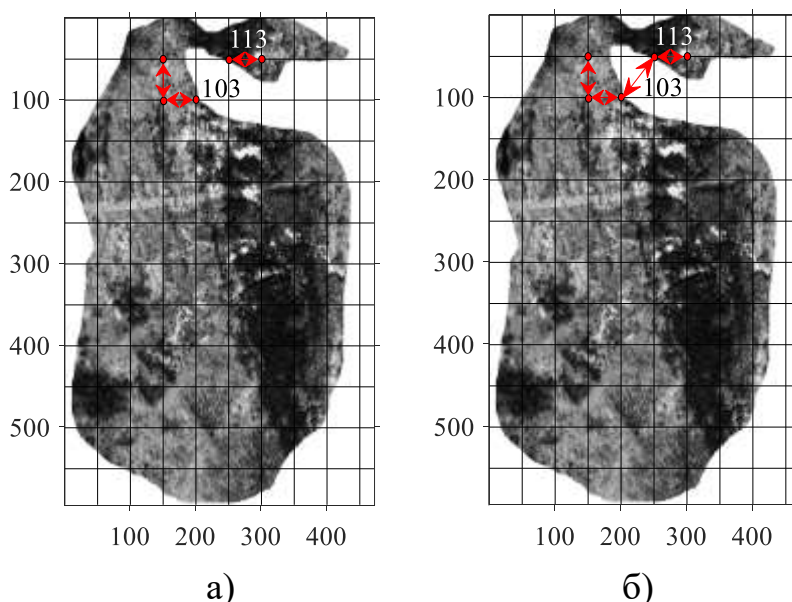


Рисунок 2.13 – Приклад приведення двозв'язної області до однозв'язної: а) двозв'язна область; б) однозв'язна область

Остаточно алгоритм запропонованого підходу можна зобразити у вигляді блок-схеми (Рис. 2.14) [74]:

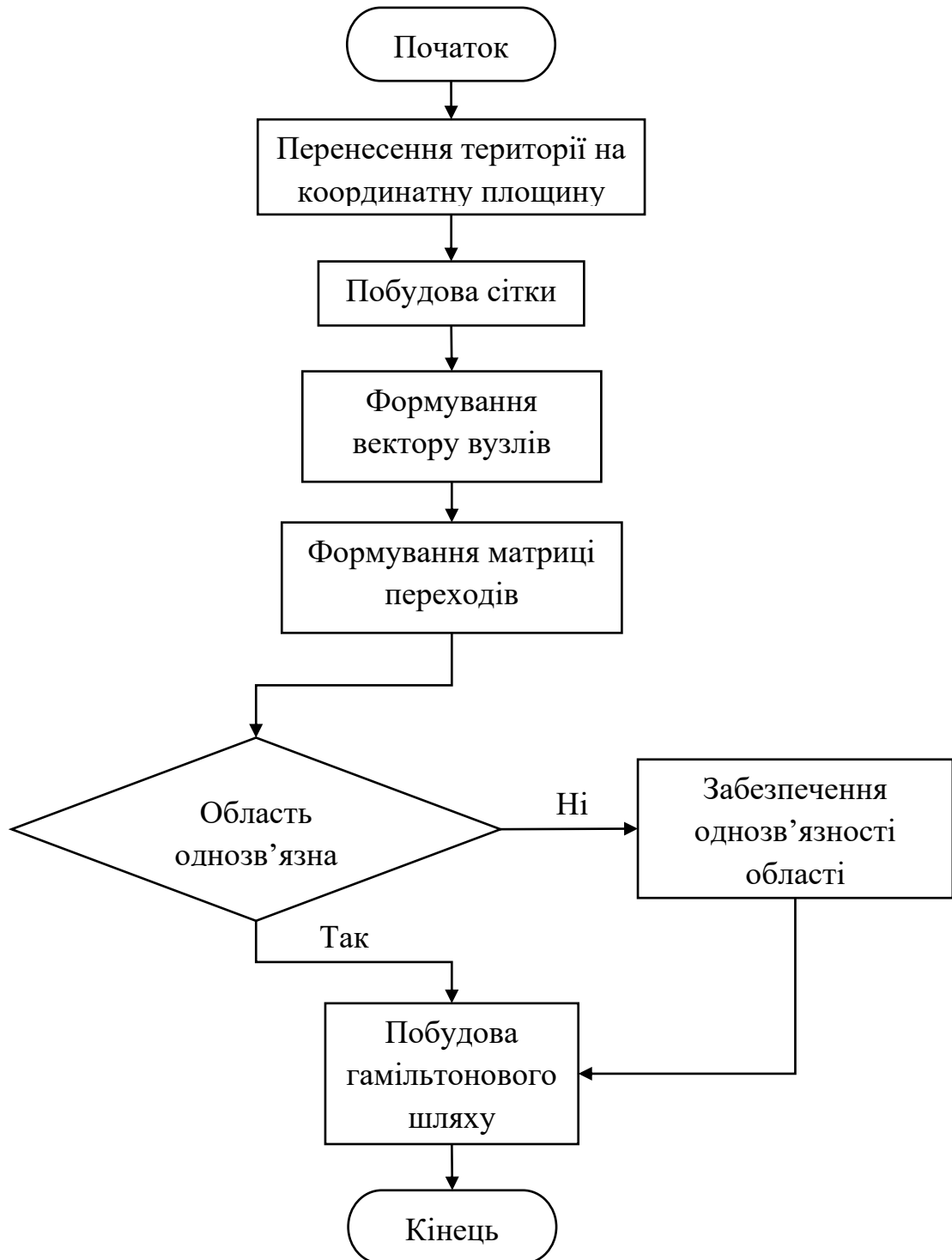


Рисунок 2.14 – Блок-схема сіткового алгоритму побудови траєкторій руху датчиків

Під час формування гамільтонового шляху початкова точка може вибиратися експертом. У випадку за замовчуванням початкова точка обирається як найближчий вузол до початку координат, який належить території T .

2.3.3 Метод побудови оптимальної траєкторії руху датчиків з урахуванням важливості ділянок території та ймовірності виявлення об'єктів

У більшості сучасних методів побудови оптимальних траєкторій руху датчиків отримані траєкторії задовольняють умови максимального покриття та енергоефективності, а також враховано перешкоди та вже покриті області. У реальних умовах, крім перешкод та вже покритих ділянок, існують території, деякі області яких представляють більший інтерес, тобто є важливішими ніж інші області. Назвемо такі території територіями з неоднорідною важливістю областей [41]. Позначимо територію як T , область або зону позначимо як Z , тобто $T = Z_1 \cup Z_2 \cup \dots \cup Z_c$, c – кількість областей з яких складається територія. Під важливістю області або зони $I(Z_i)$ будемо вважати можливу цінність об'єктів у області, що досліджується. Значення дана величини розглядаємо на проміжку від нуля до одиниці, тобто $I(Z_i) \in [0,1]$, $i = \overline{1,c}$, c – кількість зон.

Також у реальних умовах наявні області, у яких ймовірність виявлення об'єктів, що представляють інтерес або потребують уваги, є вищою ніж у інших областях. Позначимо як $P(Z_i)$ ймовірність виявлення об'єкта в області, $0 \leq P(Z_i) \leq 1$, $i = \overline{1,c}$, c – кількість зон. Назвемо такі території територіями з областями неоднорідної ймовірності виявлення об'єктів. Якщо на практиці визначення $P(Z_i)$ не є можливим, то можна вважати ймовірність виявлення однаковою для всіх областей та далі враховувати лише важливість об'єктів.

У теорії ризиків використовують поняття математичного очікування прибутку, що обчислюється як добуток абсолютного прибутку на ймовірність його отримання. За аналогією введемо поняття можливої (ймовірної) цінності або значущості виявлених об'єктів у областях, через які пролягає траєкторія руху датчику. Можливу цінність виявлених об'єктів у зоні Z_i позначимо $IP(Z_i)$ та

будемо обчислювати як добуток важливості зони та ймовірність виявлення об'єкта у даній зоні у вигляді [41]:

$$IP(Z_i) = I(Z_i)P(Z_i), \quad (2.116)$$

де $I(Z_i)$ – важливість зони Z_i , $P(Z_i)$ – ймовірність виявлення об'єкта у зоні Z_i , $i = \overline{1, c}$, c – кількість зон.

При цьому, слід враховувати, що важливість об'єктів та ймовірність виявлення об'єктів можуть:

1. Змінюватися у часі t : $I(Z_i, t)$, $P(Z_i, t)$;
2. Бути різними для різних сценаріїв подій j , реалізація яких залежить від факторів впливу \mathcal{E}_j [58].

З врахуванням можливості зміни характеристик області у часі t та залежність від факторів впливу \mathcal{E}_j можлива цінність виявлених об'єктів матиме вигляд:

$$IP(Z_i, t, \mathcal{E}_j) = I(Z_i, t, \mathcal{E}_j)P(Z_i, t, \mathcal{E}_j), \quad (2.117)$$

Назвемо такі території територіями з неоднорідними характеристиками областей.

Таким чином, задача полягає у побудові траєкторії за комплексним функціоналом якості, в якому досягається максимальне значення суми можливої цінності виявлених об'єктів, максимуму покриття та енергоефективності. Сума можливої цінності виявлених об'єктів означає суму можливої цінності виявлених об'єктів у всіх ділянках, через які пролягає побудована траєкторія. Максимум покриття означає охоплення датчиком всієї території під час руху заданою траєкторією. В свою чергу, максимум енергоефективності розглядаємо як побудову траєкторії мінімальної довжини, наслідком чого є мінімум енерговитрат.

На першому етапі при побудові необхідної траєкторії позначимо на території області в залежності від їх важливості. Для позначення даних областей доцільним є використання різних кольорів або умовних позначень. Об'єднаємо кольори, умовні позначення, міри важливості та значення числового еквіваленту важливості ділянок території у класи важливості областей. Розглядаємо сім класів важливості областей (Табл. 2.5) [41].

Таблиця 2.5 – Класи важливості ділянок території

Клас важливості	Міра важливості	Числовий еквівалент	Кольоровий еквівалент	Умовне позначення
I_1	Обов'язково	1	#FF0000 (Червоний)	*
$I_{0.9}$	Дуже важливо	0,9	#008000 (Зелений)	+
$I_{0.7}$	Важливо	0,7	#FF3F48CC (Синій)	x
$I_{0.5}$	Не дуже важливо	0,5	#FF6600 (Оранжевий)	#
$I_{0.3}$	Майже не важливо	0,3	#FFFF00 (Жовтий)	^
$I_{0.1}$	Неважливо	0.1	#FF7F7F7F (Сірий)	-
I_0	Зовсім неважливо	0	#FFFFFF (Білий)	Пробіл

Другим етапом після позначення областей в залежності від їх важливості є позначення зон в залежності від ймовірності виявлення в них об'єктів. Для цього також використаємо кольорове позначення (Табл. 2.6).

Таблиця 2.6 – Класи ймовірності виявлення об'єктів в зоні

Клас ймовірності	Значення ймовірності	Кольоровий еквівалент	Умовне позначення
P_1	1	#FF0000 (Червоний)	*
$P_{0.9}$	0,9	#008000 (Зелений)	+
$P_{0.7}$	0,7	#FF3F48CC (Синій)	x
$P_{0.5}$	0,5	#FF6600 (Оранжевий)	#
$P_{0.3}$	0,3	#FFFF00 (Жовтий)	^
$P_{0.1}$	0.1	#FF7F7F7F (Сірий)	-
P_0	0	#FFFFFF (Білий)	Пробіл

Очевидно, що поділ на зони за важливістю та ймовірністю виявлення об'єктів може бути різним. Таким чином отримуємо два шари, що накладаються на вхідну територію. Накладемо отримані шари один на одного та отримаємо один шар можливої цінності виявлених об'єктів (Рис. 2.15).

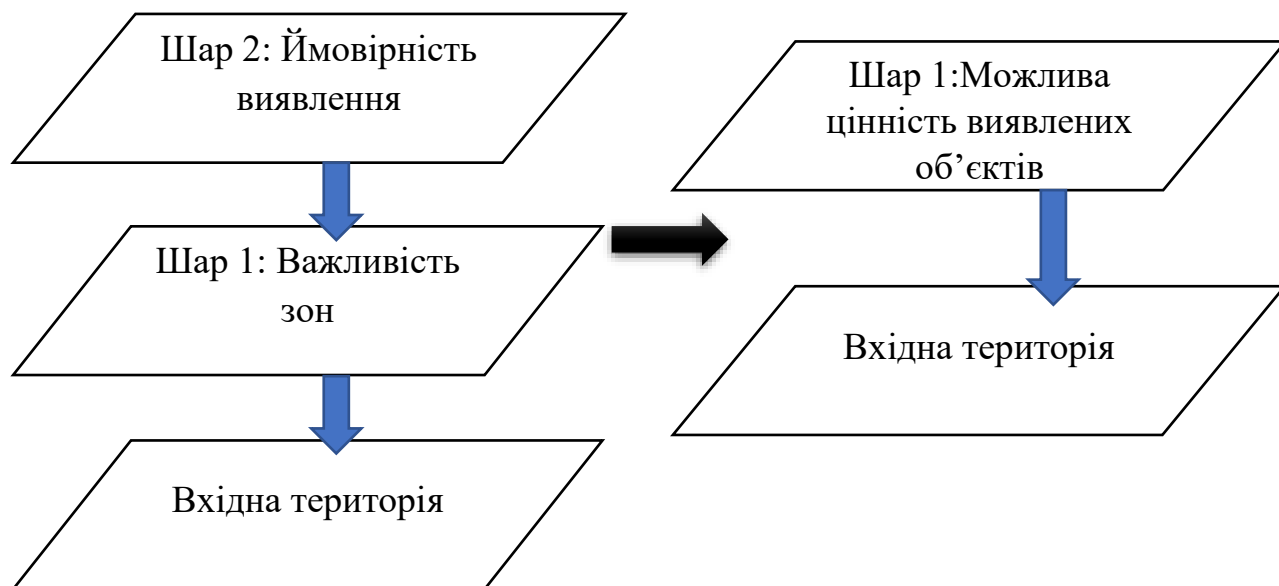


Рисунок 2.15 – Побудова шару можливої цінності виявлених об'єктів

Значення можливої цінності виявлених об'єктів у зонах отриманого шару будемо обчислювати з використанням формули (1). У випадку, коли розглядається лише важливість зон, всі зони шару ймовірності виявлення об'єктів розглядаються як зони класу P_1 , і навпаки. Під час об'єднання класів важливості та ймовірності виявлення отримаємо 49 діапазонів значень (наприклад $I_{0.6} \cup P_{0.7} = IP_{0.42}$), які об'єднаємо у 7 класів можливої цінності виявлених об'єктів (Табл. 2.7).

Таблиця 2.7 – Класи можливої цінності виявлених об'єктів

Клас можливої цінності виявлених об'єктів	Значення можливої цінності	Числовий еквівалент	Умовне позначення
IP_1	(0.9;1]	1	*
$IP_{0.9}$	(0.7;0,9]	0,9	+
$IP_{0.7}$	(0.5;0.7]	0,7	x

$IP_{0.5}$	(0.3;0.5]	0,5	#
$IP_{0.3}$	(0.1;0.3]	0,3	^
$IP_{0.1}$	(0;0.1]	0.1	-
IP_0	0	0	Пробіл

Після розподілення областей за класами можливої цінності виявлених об'єктів побудуємо рівномірну сітку з кроком h , значення якого обирається експертом. Наступним етапом є заповнення матриці можливої цінності виявлених об'єктів D , елементи якої є значенням можливої цінності виявлених об'єкта у вузлах сітки. Кожен вузол сітки є точкою деякої області території, що належить певному класу важливості та ймовірності виявлення.

Розмірність матриці можливої цінності виявлених об'єктів D залежить від кроку сітки, розміру території та може досягати великих значень. Для полегшення обчислень, зменшення кількості операцій та врахуванні значень можливої цінності виявлених об'єктів при побудові траєкторії слід зменшити кількість вузлів. Щоб зменшити кількість вузлів виконаємо процедуру заміни вузлів, що полягає у заміні певної кількості сусідніх вузлів, що мають однакове значення, одним вузлом. Будемо використовувати 5-точкову, 3-точкову та 2-точкову заміни [41]. Для прикладу розглянемо 3-точкову заміну. Спочатку обходимо область по рядкам та розглядаємо кожні трійки елементів. Якщо значення трьох підряд елементів рівне – залишаємо лише центральне значення, значення бокових двох елементів замінюємо на нуль. У випадку 5-точкової заміни залишаємо третій елемент. У випадку 2-точкової заміни залишаємо будь-який елемент з пари елементів. Після проходження по рядкам виконуємо проходження по стовпцям. Схематично 3-точкову заміну можна зобразити таким чином (Рис. 2.16):

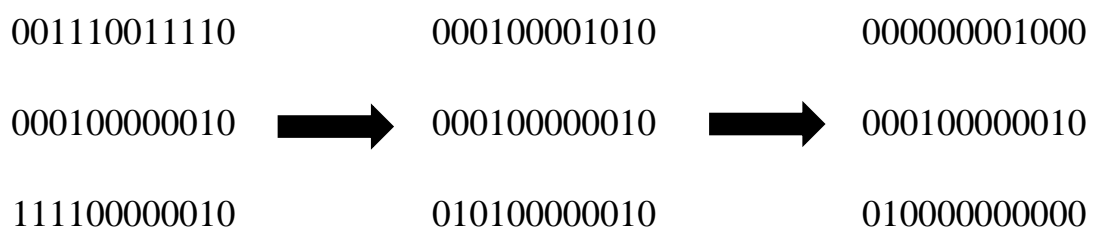


Рисунок 2.16 – Приклад 3-точкової заміни вузлів

Після виконання заміни вузлів виконуємо побудову траєкторії, що проходить кожен вузол лише один раз. Для цього використано генетичний алгоритм. Також можливе використання нейронних мереж.

Для кожного класу важливості будемо виконувати такі заміни вузлів (Табл. 2.8):

Таблиця 2.8 – Заміна вузлів для класів важливості

Клас можливої цінності виявлених об'єктів	Заміна вузлів
IP_1	Без заміни вузлів
$IP_{0.9}$	2-точкова заміна
$IP_{0.7}$	3-точкова заміна
$IP_{0.5}$	3-точкова заміна 2-точкова заміна
$IP_{0.3}$	5-точкова заміна 3-точкова заміна
$IP_{0.1}$	5-точкова заміна 3-точкова заміна 2-точкова заміна
IP_0	Елементи = 0

Заміни вузлів для класів важливості виконуються послідовно у порядку спадання кількості точок у заміні.

Таким чином, алгоритм побудови траєкторії, за якої досягається максимальне значення ймовірного виявлення об'єктів та задовольняються умови максимального покриття та енергоефективності, можна представити у вигляді (Рис. 2.17) [41]:

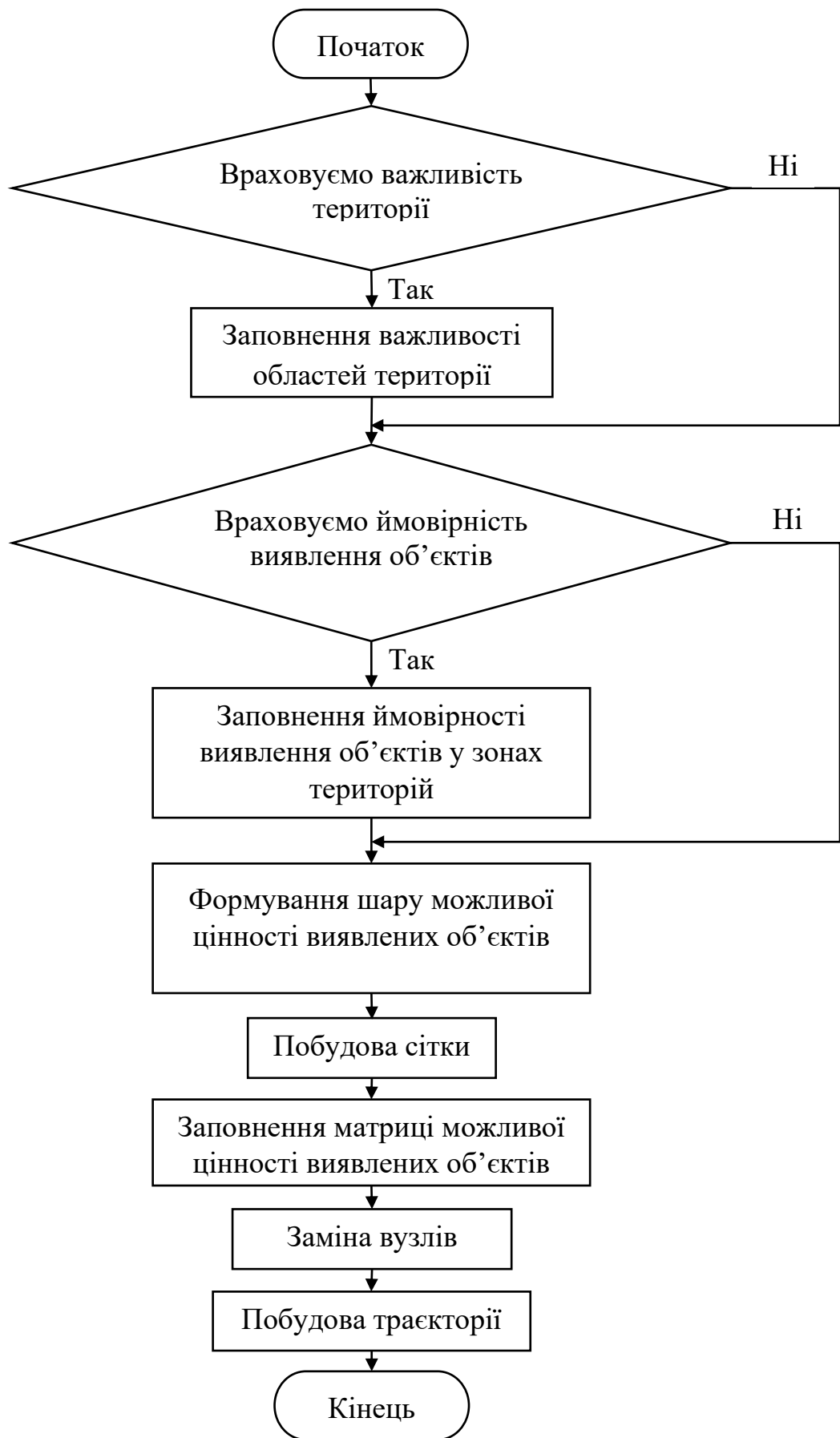


Рисунок 2.17 – Блок-схема алгоритму побудови траєкторії руху датчиків з урахуванням можливої цінності ділянок території

Позначимо як S траєкторію руху датчику, що складається з пар точок з координатами (x, y) : $S = \{(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)\}$, n – кількість точок, з яких складається траєкторія. Довжину траєкторії позначимо $L(S)$. Енерговитрати будемо обчислювати як довжину траєкторії руху датчику помножену на енерговитрати одного кроку руху датчику:

$$E = L(S)\Delta e, \quad (2.118)$$

де $L(S)$ – довжина траєкторії, Δe – енерговитрати одного кроку руху датчику.

Величина E буде означати енерговитрати датчику за один обліт території за заданою траєкторією S . Так як енерговитрати (2.118) прямопропорційні довжині траєкторії $L(S)$, очевидно, що мінімальні енерговитрати досягаються при мінімальній довжині траєкторії.

Очевидно, що кожний рухомий датчик володіє акумулятором або паливним баком певної ємності (Табл. 2.9), позначимо дану величину як V .

Таблиця 2.9 – Характеристики сучасних безпілотних літальних апаратів

Модель БПЛА	Об'єм баку/акумулятора	Час автономної роботи
Bayraktar TB2	300 літрів	≈ 27 годин
Griflion H	27 літрів	≈ 15 годин
RQ-4 Global Hawk	6985 літрів	≈ 36 годин
MQ-9 Reaper	1300 літрів	≈ 27 годин
IAI Heron	450 літрів	≈ 46 годин
DJI Mavic 3 Cine	5000 mAh	≈ 50 хвилин
Autel EVO II Dual Rugged Bundle	7100 mAh	≈ 40 хвилин

Позначимо $RC(E, V)$ кількість обльотів території при заданих енерговитратах [41]:

$$RC(E, V) = \frac{V}{E}. \quad (2.119)$$

Для оцінки ефективності запропонованого методу побудуємо траєкторію для покриття такої самої території, але з однорідними характеристиками, тобто можлива цінність виявлених об'єктів рівна 1 для всіх областей території: $IP(Z_i) = 1, i = \overline{1, c}, c$ – кількість зон.

В якості еталонного значення ефективності виберемо значення кількості об'єктів території при класі ймовірності IP_1 . Для всіх інших класів можливої цінності виявлених об'єктів значення ефективності будемо обчислювати як відношення кількості об'єктів території для даного класу до кількості об'єктів для класу IP_1 :

$$E_{ff} = \frac{RC_i(E, V)}{RC_{IP_1}(E, V)}, \quad (2.120)$$

де $RC_{IP_1}(E, V)$ – кількість об'єктів для класу IP_1 , $RC_i(E, V)$ – кількість об'єктів для класу $i, i = \overline{1, 4}$.

Виграш ефективності обчислимо у вигляді:

$$\overline{E_{ff}} = (E_{ff} - 1) * 100\% . \quad (2.121)$$

Клас можливої цінності виявлених об'єктів IP_0 не розглядаємо, так як точки даного класу не розглядаються при побудові траєкторії. Відмінність однорідності визначаємо як різниця між одиницею та середнім значенням класу можливої цінності виявлених об'єктів.

Величина кроку сітки також впливає на довжину траєкторії, тому остаточну ефективність для заданого кроку сітки h будемо обчислювати як мінімальне значення виграшу ефективності для всіх класів можливої цінності виявлення об'єктів крім першого:

$$\overline{E_{ffh}} = \min_i \overline{E_{ffi}}, \quad (2.122)$$

де $i = \overline{2, 4}$.

Як зазначалося вище, важливість об'єктів та ймовірність виявлення об'єктів можуть змінюватися у часі та бути різними для різних сценаріїв подій j , реалізація яких залежить від факторів впливу E_j .

Розглянемо випадок зміни характеристик областей у часі. Нехай перед побудовою траєкторії у початковий момент часу t_0 значення можливої цінності виявлених об'єктів (2.116) у кожній області території рівні $IP(Z_i, t_0)$:

$$IP(Z_i, t_0) = I(Z_i, t_0)P(Z_i, t_0), \quad (2.223)$$

де $I(Z_i, t_0)$ – важливість зони Z_i у момент часу t_0 , $P(Z_i, t_0)$ – ймовірність виявлення об'єкта у зоні Z_i у момент часу t_0 , $i = \overline{1, c}$, c – кількість зон.

З використанням описаного вище методу у момент часу t_0 побудовано траєкторію: $S(t_0) = \{(x_1, y_1, t_0), (x_2, y_2, t_0), \dots, (x_n, y_n, t_0)\}$, n – кількість точок з яких складається траєкторія.

Кожна точка траєкторії належить певній зоні Z_i та також володіє таким самим значенням можливої цінності виявлення об'єкта що і зона Z_i . Позначимо як $IP(S, t_0)$ загальний виграш (загальну цінність) траєкторії, що побудована у момент часу t_0 . Дана величина буде рівна сумі можливої цінності точок, з яких складається траєкторія:

$$IP(S, t_0) = \sum_{i=1}^n IP(x_i, y_i, t_0), \quad (2.224)$$

де n – кількість точок з яких складається траєкторія.

Під час зміни характеристик областей території загальна цінність однієї і тієї ж траєкторії буде змінюватися та може не забезпечувати необхідний виграш траєкторії, наслідком чого буде накопичення недостатнього обсягу інформації. Для забезпечення максимального охоплення областей слід перебудувувати траєкторію під час зміни характеристик областей. Рух датчику вздовж траєкторії будемо розглядати як дискретний процес з кроком у часі Δt . Під час перебудови траєкторії у момент часу t^* точка, у якій знаходився датчик у момент часу t^* додається до вузлів сітки після заміни вузлів. Рух датчику продовжується з даної точки по новій траєкторії. З урахуванням руху датчику, часу побудови траєкторії та обміну інформацією між датчиком та оператором керування зміна траєкторії може відбуватися із затримкою часі. У такому випадку зміна траєкторії руху буде відбуватися у точках, де попередня S_{old} та нова траєкторії S_{new} перетинаються: $\{(x_i, y_i)\}, (x_i, y_i) \in S_{old} \wedge (x_i, y_i) \in S_{new}$.

Зміну факторів впливу E_j , від яких залежать сценарії подій j [58] розглядаємо як зміну розподілу та значень можливої цінності виявлення областей. Тобто, кожен сценарій – це окрема пара шарів розподілу ймовірності виявлення об’єктів та важливості зон, що об’єднуються у шар можливої цінності виявлення об’єктів сценарію j . На основі об’єднання всіх шарів отримуємо шар можливої цінності виявлення об’єктів для сценарію j (Рис. 2.18).

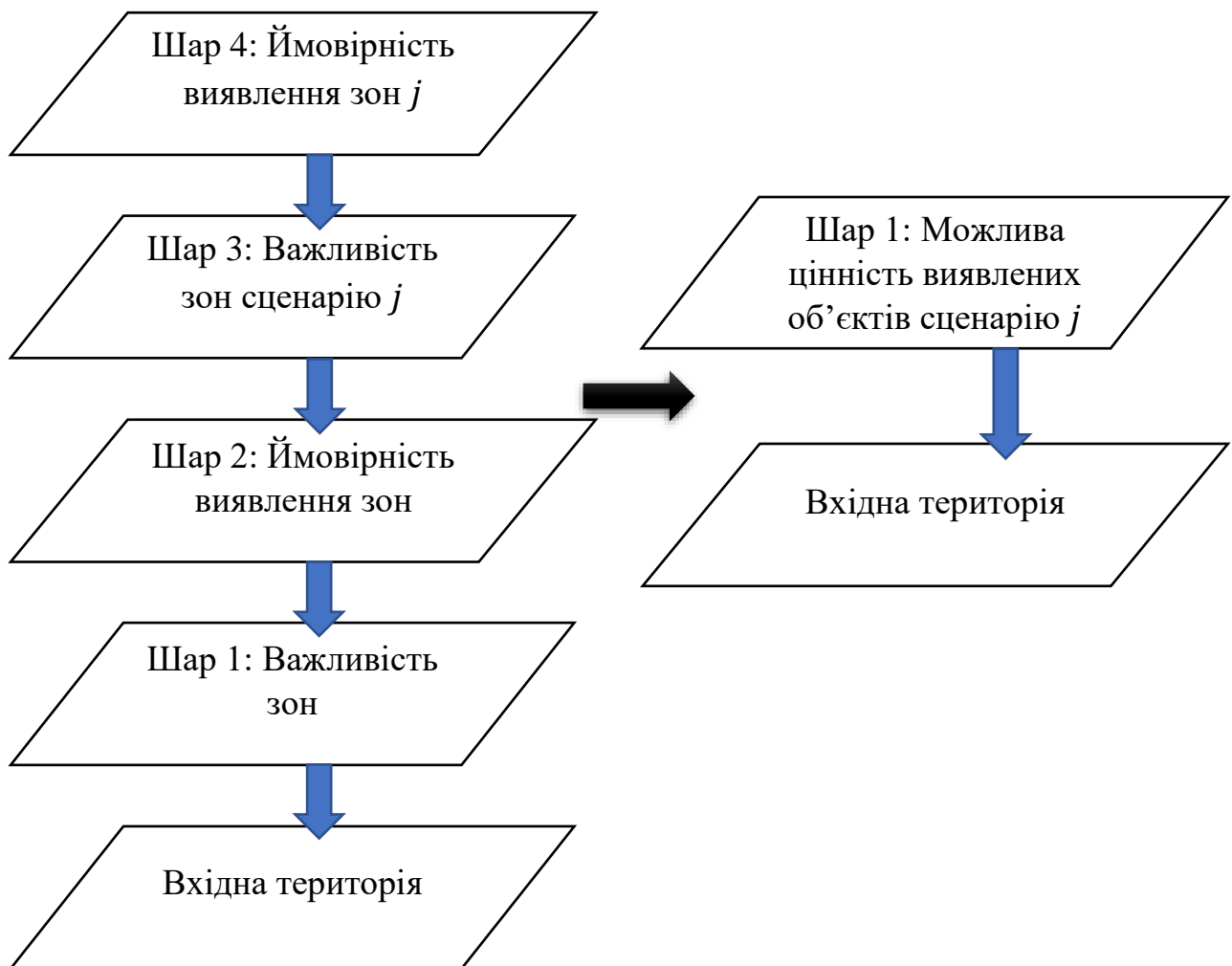


Рисунок 2.18 – Побудова шару можливої цінності виявлених об’єктів для сценарію j

Остаточний алгоритм побудови траєкторії руху датчиків з врахуванням можливості зміни характеристик областей у часі буде мати вигляд (Рис. 2.19):

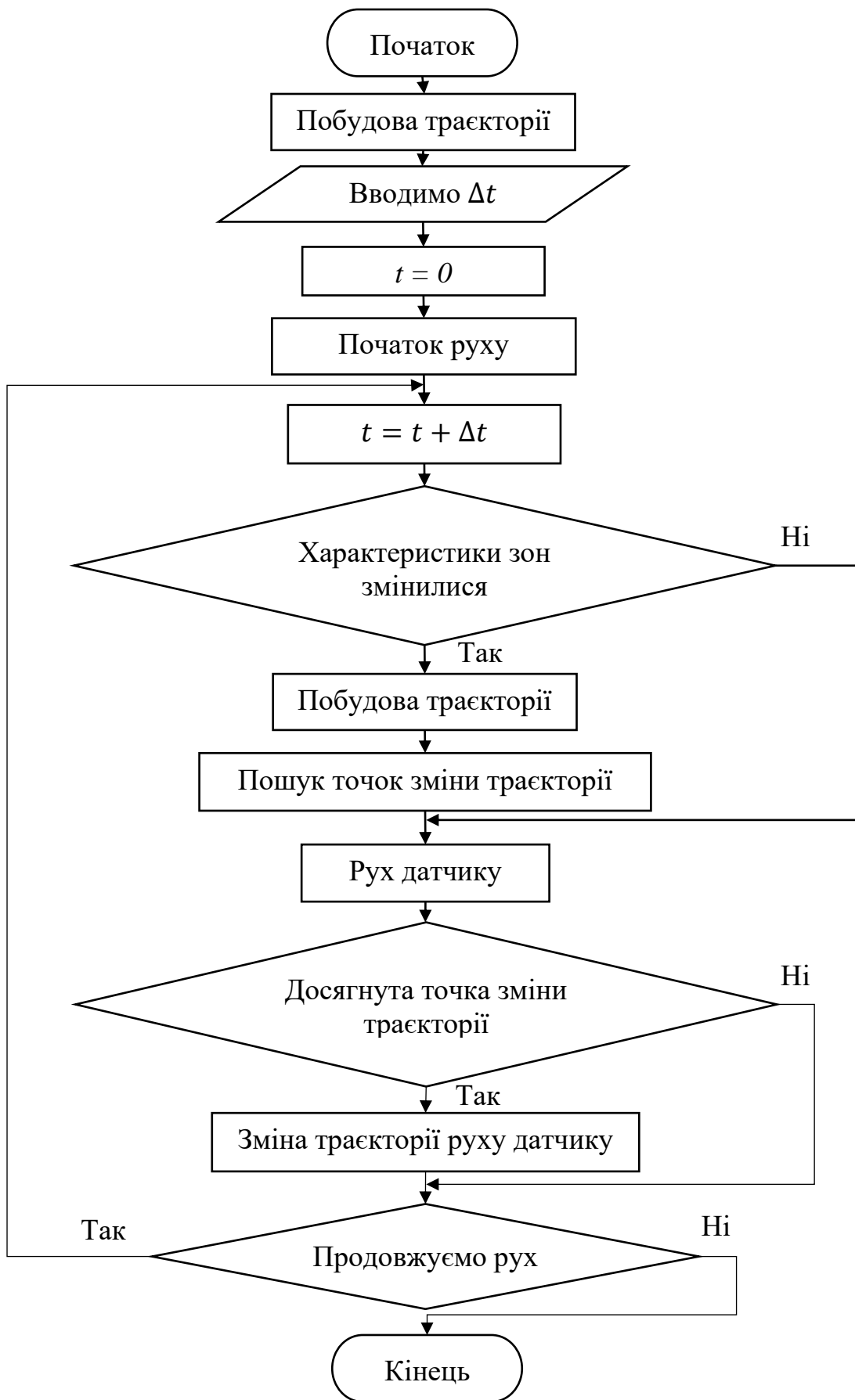


Рисунок 2.19 – Блок-схема алгоритму побудови траєкторії руху датчиків з врахуванням можливості зміни характеристик областей у часі

Дія «Побудова траєкторії» (Рис. 2.19) означає виконання всіх етапів побудови траєкторії руху датчиків з урахуванням можливої цінності ділянок території (Рис. 2.17).

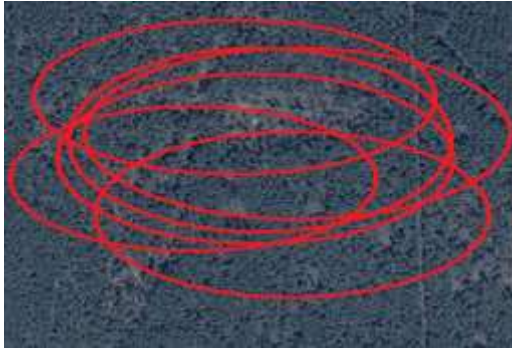
Зміна характеристик зон розглядається як зміна розподілу можливої цінності виявлених об'єктів (зміна ймовірності виявлення об'єктів та/або зміна важливості зон) та/або зміна сценарію.

Оптимальна траєкторія формується шляхом зміни траєкторії руху датчику у момент зміни розподілу зон можливої цінності виявлених об'єктів.

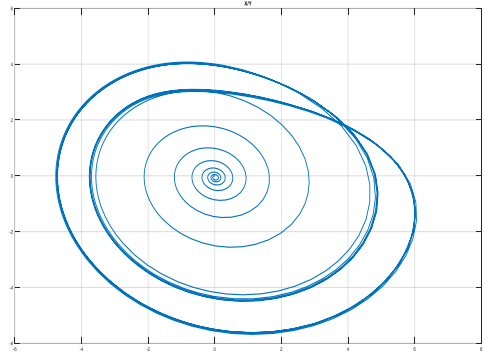
2.3.4 Забезпечення квазіхаотичності траєкторій з використанням дивних атракторів

Представлені вище методи забезпечують побудову енергоефективних траєкторій об'їзду територій. Проте, у реальних умовах виникають ситуації, коли детермінованість траєкторії є негативним фактором. Для позбавлення детермінованості траєкторій доцільним є забезпечення заплутаності траєкторії. Введемо поняття квазіхаотичності, що означає випадковість, що не доведена строго [111]. Для забезпечення квазіхаотичності побудованих траєкторій використаємо дивні атрактори. Згідно з [111] дивні атрактори – це множина точок у фазовому просторі, до якої збігаються фазові траєкторії нелінійної системи, яка є далекою від стану рівноваги.

Розглянемо випадок руху датчику за циклічною еліпсоїдальною траєкторією. Змінюючи параметри рівняння руху датчику отримаємо сімейство траєкторій (Рис. 2.20а). Дані траєкторії схожі на фазові траєкторії певних атракторів, наприклад атрактору Рьосслера у двовимірному випадку (Рис. 2.20б). Тому для побудови квазіхаотичних траєкторій можливе використання дивних атракторів у поєднанні з вище описаними підходами.



а)



б)

Рисунок 2.2 – а) сімейство еліпсоїдальних траєкторій; б) фазовий портрет атрактора Рьосслера

Нехай дано траєкторію руху датчику P , що у кожний момент часу t_i представлена як точка:

$$P(t_i) = (x_i, y_i, z_i). \quad (2.125)$$

Для забезпечення квазіхаотичності траєкторій використаємо атрактори Лоренца, Рьосслера, Ван дер Пола.

Атрактор Лоренца це система трьох нелінійних диференціальних рівнянь:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = -\sigma x + \sigma y \\ \frac{dy}{dt} = -xz + \lambda x - y, \\ \frac{dz}{dt} = xy - bz \end{cases} \quad (2.126)$$

де σ – число Прандтля, $\lambda = \frac{Ra}{Rc}$, Ra – число Релея, $Rc = \pi^4 \frac{(1+\alpha^2)^3}{\alpha^2}$, $b = \frac{4}{(1+\alpha^2)}$, α – коефіцієнт теплового розширення.

Атрактор Рьосслера представлено системою диференціальних рівнянь:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = -y - z \\ \frac{dy}{dt} = x + ay \\ \frac{dz}{dt} = b + z(x - c) \end{cases} \quad (2.127)$$

де a, b, c – додатні константи.

Атрактор Ван дер Пола представлено системою диференціальних рівнянь:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = y \\ \frac{dy}{dt} = (a - x^2)y - c \end{cases}, \quad (2.128)$$

де $-2 \leq a \leq 2$.

Розв'язками систем рівнянь (2.126)-(2.128) при $t \in \overline{t_0, t_n}$ є відповідні множини точок $X(t), Y(t)$ та $Z(t)$. Для забезпечення квазіхаотичності траєкторій додамо до кожної точки траєкторії P значення відповідної координати розв'язків (2.126)-(2.128) у довільний момент часу $t^* \in \overline{t_0, t_n}$, де t^* вибирається довільним чином. Таким чином координати траєкторії P у тривимірному випадку будуть рівними:

$$P(t_i) = (x_i + X(t^*), y_i + Y(t^*), z_i + Z(t^*)). \quad (2.129)$$

Оцінимо ефективність запропонованого підходу. Для цього обчислимо середнє значення відстані між точками початкової та псевдохаотичної траєкторії та поділимо отримане значення на відстань між точками:

$$Eff = \frac{L}{\Delta}, \quad (2.130)$$

де $L = \frac{\sum_{i=1}^n l(p_s^i, p_c^i)}{n}$ – середнє значення відстані між точками початкової та псевдохаотичної траєкторії, p_s^i – точка початкової траєкторії, p_c^i – точка псевдохаотичної траєкторії, n – кількість точок у траєкторії, Δ - відстань між вузлами сітки при побудові траєкторії.

Відстань між точками траєкторій $l(p_s^i, p_c^i)$ обчислюємо як евклідову відстань.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2

У розділі 2 представлено моделі та алгоритми покриття території сенсорами з мінімізацією енерговитрат. Оптимізація енерговитрат досягається шляхом регуляції радіусів покриття датчиків. До уваги береться необхідність наявності перетину зон покриття датчиків для обміну інформацією. Для цього вводиться величина мінімально допустимої величини перетину зон покриття датчиків. Отримано такі результати:

1. Представлено метод пошуку розв'язку проблеми максимізації покриття території датчиками з мінімізацією енерговитрат з врахуванням необхідності перетину зон покриття. Задача сформована у вигляді багатокритеріальної задачі нелінійного програмування. Критеріями оптимальності є мінімізація енерговитрат при мінімізації непокритих ділянок території, що розглядається. Використано метод згортки.

2. Запропоновано аналітичні методи обчислення покритої території датчиками з врахуванням перетину зон покриття.

3. Для знаходження оптимальної траєкторії руху сенсорів використано принцип динамічного програмування Беллмана. Із певною частотою на кожному моменті часу обчислюється оцінка руху для кожного напрямку руху та обирається найкраща. Оцінка представлена як сума площі перетину зони покриття датчику із вже покритою територією, із зонами покриття інших датчиків та величина покриття поза межами території.

4. Розроблено сітковий алгоритм пошуку шляху, що базується на пошуку гамільтонового шляху на однозв'язній території. Представлено алгоритм приведення багатозв'язної області до однозв'язної.

5. Вперше запропоновано алгоритм побудови траєкторії руху датчику з урахуванням важливості областей території та алгоритми заміни вузлів для зменшення кількості операцій під час побудови траєкторії.

6. Запропоновано метод забезпечення квазіхаотичності траєкторій руху сенсорів з використанням дивних атракторів.

РОЗДІЛ 3. АЛГОРИТМИ ОЦІНКИ ТА ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЖИВУЧОСТІ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ

3.1 Оцінка живучості та виявлення вразливих елементів сенсорних мереж

Одними із ключових аспектів проектування програмно-апаратних систем на основі сенсорних мереж є питання забезпечення живучості системи. В свою чергу під час проектування мережі положення сенсорів може бути визначене з використанням методів та алгоритмів, описаних у Розділі 2. Наступним етапом після знаходження позицій сенсора є оцінка живучості мережі. Згідно з [18] живучість – властивість, що характеризує здатність системи ефективно функціонувати за наявності ушкоджень або відновлювати цю здатність за визначений проміжок часу. Спорідненими поняттями є поняття відмовостійкості як властивості системи зберігати повну або часткову працездатність у випадках відмов окремих елементів, що не пов'язані із зовнішніми нерегламентованими діями, та безвідмовності як властивості безперервно зберігати працездатний стан протягом деякого часу роботи чи деякого напрацювання. У дисертаційній роботі розглянуто саме поняття живучості так як розглядаються випадки відмов компонентів сенсорної мережі у зв'язку із впливом зовнішніх чинників. Фахівці виділяють функціональну та структурну живучість [19]. Під функціональною живучістю розуміють здатність системи виконувати свої функції в умовах цілеспрямованих зовнішніх і внутрішніх деструктивних впливів, коли компенсувати нештатні ситуації, потоки відмов і збоїв можна лише за рахунок внутрішніх резервів системи і впливу на джерело деструктивних впливів. Структурна живучість розглядається як можливість реконструкції, реорганізації, реконфігурації, реструктуризації системи для забезпечення функціонування системи у випадку несприятливих випадків. Будемо формувати значення параметру загальної живучості мережі у вигляді одночасної живучості мережі відносно втрати датчику та зв'язків між датчиками для елементів мережі, які забезпечують максимальну пропускну здатність мережі.

Розглядаємо живучість як параметр системи, значення якого належить відрізьку $[0,1]$. Під оцінкою живучості мережі розуміємо обчислення значення параметру живучості мережі.

Розглянемо сенсорну мережу, що складається з n сенсорів $s = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$. Очевидно, що між сенсорами може існувати передача даних. Опишемо зв'язки між сенсорами відповідною матрицею зв'язків A , елементи якої будуть рівними одиниці у випадку існування передачі даних та нулю у випадку відсутності передачі даних:

$$a_{i,j} = \begin{cases} 1, \text{ зв'язок між сенсорами існує} \\ 0, \text{ зв'язок між сенсорами відсутній} \end{cases}, \quad (3.1)$$

де $i = \overline{1, n}, j = \overline{1, n}, n$ – кількість сенсорів у мережі.

Використовуючи експертні оцінки важливості елементів мережі сформуємо матрицю важливості датчиків з елементами $0 \leq c_{i,j} \leq 1$. Перед формуванням даної матриці всі оцінки повинні бути нормованими.

Наступним етапом є обчислення важливості каналів передачі інформації між сенсорами. Для цього сформуємо матрицю важливості каналів передачі, елементи якої будуть рівними:

$$k_{i,j} = a_{i,j} \left(\frac{c_i + c_j}{2} \right), \quad (3.2)$$

де $i = \overline{1, n}, j = \overline{1, n}, n$ – кількість сенсорів у мережі.

Для знаходження значення параметру живучості сенсорної мережі сформуємо матрицю переходів H та модифікуємо матрицю оцінок важливості каналів передачі (3.2) у вигляді:

$$h_{i,j} = \begin{cases} 1, \text{ існує передача даних від } i \text{ сенсору до } j \text{ сенсору} \\ 0, \text{ передача даних від } i \text{ сенсору до } j \text{ сенсору відсутня} \end{cases} \quad (3.3)$$

$$k_{i,j}^* = (1 - k_{i,j}), \quad (3.4)$$

де $i = \overline{1, n}, j = \overline{1, n}, n$ – кількість сенсорів у мережі.

Використовуючи алгоритм Дейкстри або алгоритм Лі [115, 126], матриці H та K^* знайдемо найкоротший шлях від джерела s_1 до приймача s_n . Позначимо знайдений шлях як s_{min} . Враховуючи перетворення (3.4), елементи вектору s_{min} є найважливішими сенсорами мережі. У випадку, коли кількість елементів у

найкоротшому шляху менша за кількість сенсорів, тобто $n > m$, $m = |s_{min}|$ живучість сенсорної мережі може бути оцінена у випадку втрати сенсору або зв'язку між датчиками.

Позначимо як h_{min} переходи між сенсорами у найкоротшому шляху s_{min} . Для оцінки живучості сенсорної мережі у випадку втрати з'єднання між датчиками виберемо перший елемент вектору h_{min} . Обраний елемент є певним елементом $h_{i,j}^*$ матриці переходів H . Замінімо значення відповідного елементу $h_{i,j}^*$ у матриці H на 0 та знайдемо найкоротший шлях від s_1 до s_n . У разі відсутності можливості знаходження шляху додаємо даний зв'язок до множини вразливих зв'язків h_{weak} . Повертаємо попереднє значення $h_{i,j}^*$ у матриці H та обираємо наступний елемент вектору h_{min} . Виконуємо дану перевірку для всіх елементів h_{min} . Значення параметру живучості сенсорної мережі відносно втрати зв'язку між датчиками обчислюється за формулою [85]:

$$c_h = 1 - \frac{c_0}{m_t}, \quad (3.5)$$

де c_0 – кількість елементів у векторі h_{weak} , m_t – кількість елементів вектору h_{min} .

Схематично описаний вище алгоритм можна зобразити у вигляді (Рис. 3.1):

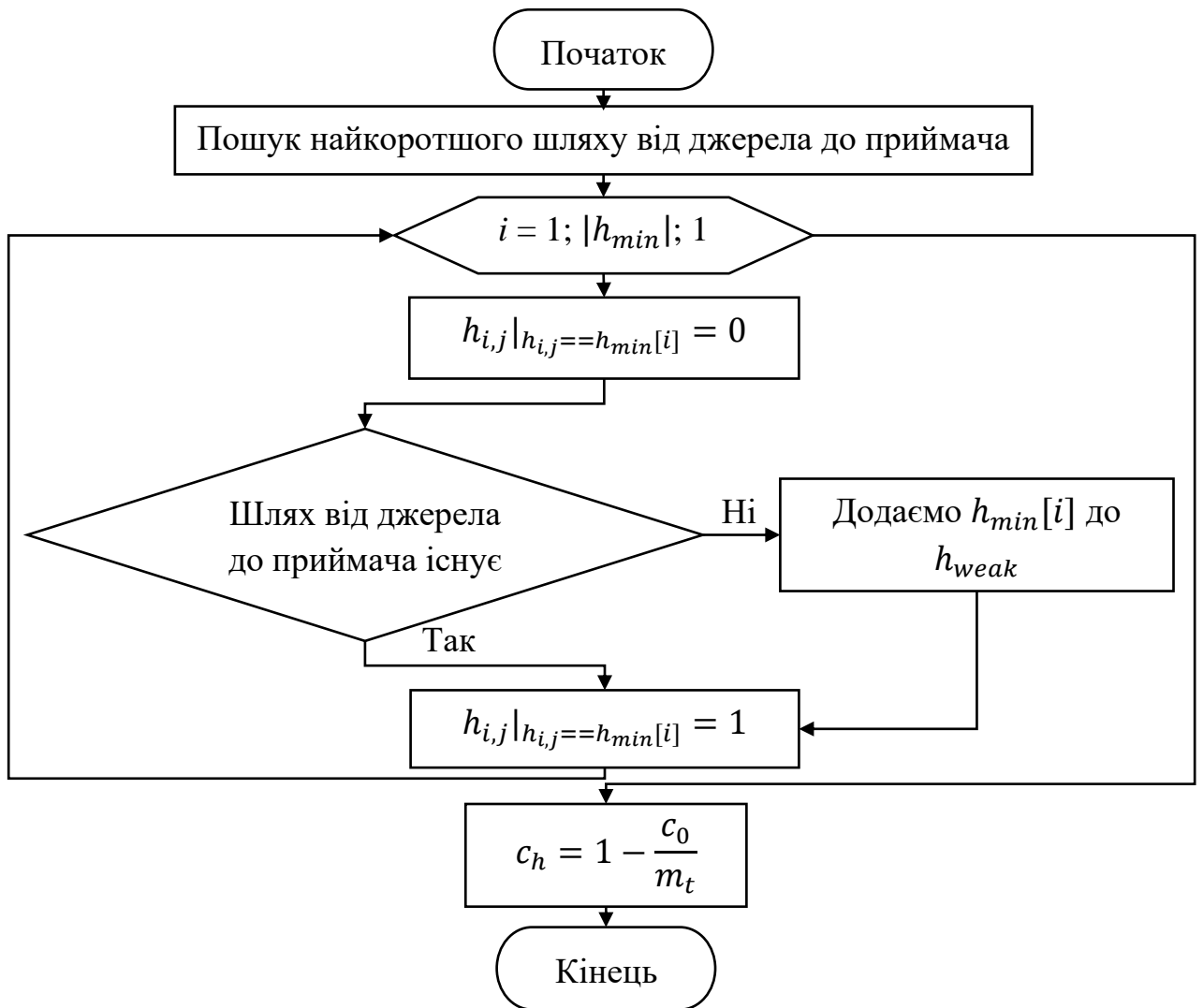


Рисунок 3.1 – Блок-схема алгоритму оцінки живучості у випадку втрати зв'язку між датчиками.

Алгоритм оцінки живучості сенсорної мережі у випадку втрати датчику схематично можна представити у вигляді:

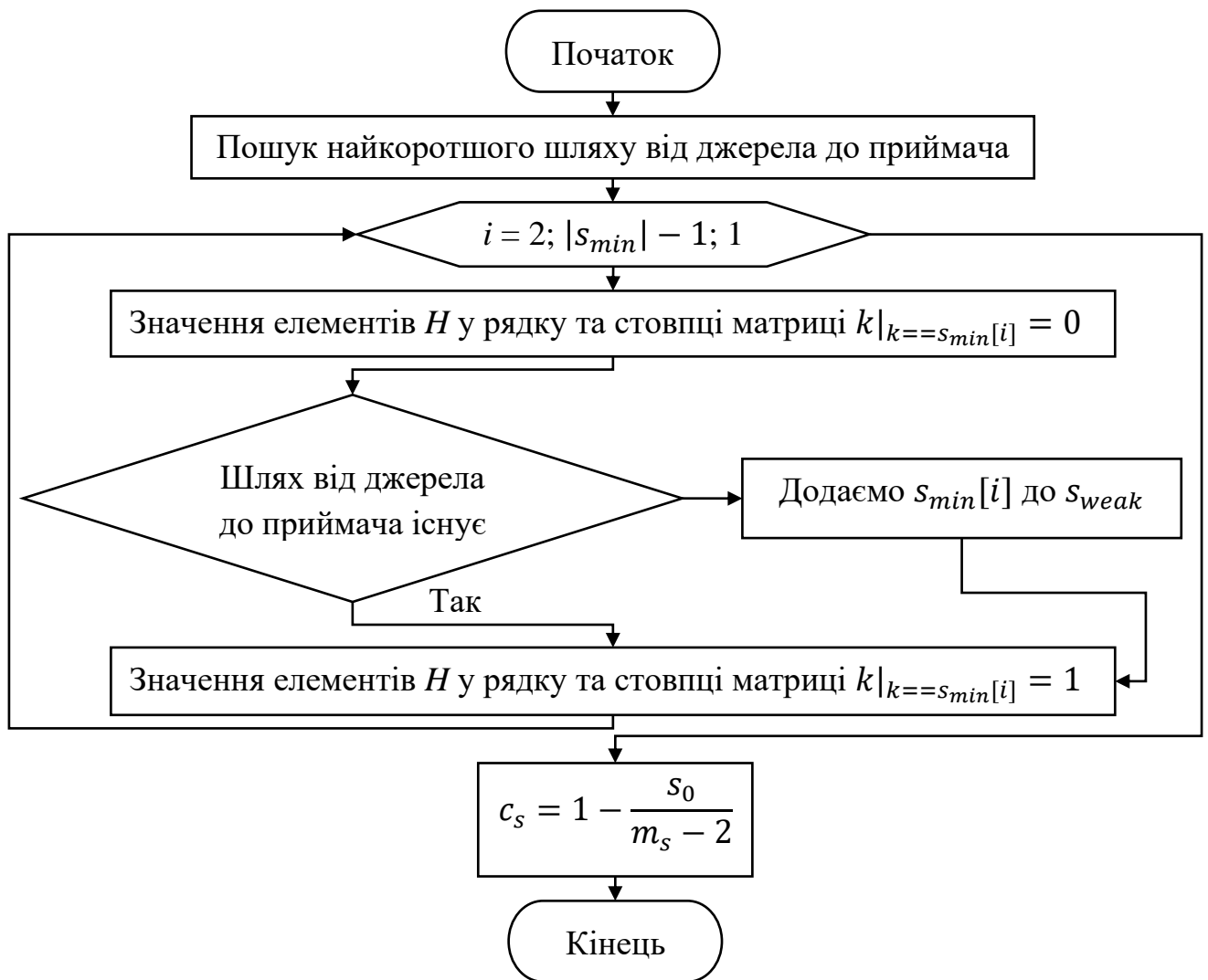


Рисунок 3.2 – Блок-схема алгоритму оцінки живучості у випадку втрати датчику

Для оцінки живучості сенсорної мережі у випадку втрати датчика візьмемо другий елемент вектору s_{min} . Даний елемент є певним елементом s_i^* сенсорної мережі s . Замінімо значення елементів i рядка та i стовпця матриці H на 0 та знайдемо найкоротший шлях від s_1 до s_n . У разі відсутності можливості знаходження шляху додаємо даний датчик до множини вразливих сенсорів s_{weak} . Повертаємо попередні значення i рядка та i стовпця матриці H та обираємо наступний елемент вектору s_{min} . Дана перевірка виконується для всіх елементів вектору s_{min} крім s_1 до s_n так як дані сенсори є джерелом та приймачем відповідно, та за їх відсутності передача інформації неможлива. Значення параметру живучості сенсорної мережі відносно втрати датчику обчислюється у вигляді [85]:

$$c_s = 1 - \frac{s_0}{m_s - 2}, \quad (3.6)$$

де s_0 – кількість елементів у векторі s_{weak} , m_s – кількість елементів вектору s_{min} .

Значення параметру живучості сенсорної мережі означає одночасну живучість відносно втрати каналу зв'язку та втрати датчика. Це значення можна обчислити як імовірність одночасного виникнення двох незалежних подій [85, 90]:

$$c = c_s c_h. \quad (3.7)$$

Значення параметру $c = 1$ означає живучість сенсорної мережі відносно втрати переходу та втрати датчика.

Описаний вище підхід не враховує пропускну здатність елементів сенсорної мережі. В залежності від типу каналу зв'язку та протоколу передачі даних пропускну здатність каналів зв'язку у сенсорній мережі буде різною [14, 47]. Також слід враховувати факт того, що різні типи сенсорів можуть мати різну пропускну спроможність, що може включати в себе накопичення, прийом, обробку та передачу даних [10]. Позначимо пропускну здатність сенсору як p_i^s , а пропускну здатність каналу зв'язку між двома сенсорами як $p_{i,j}^h$, $i = \overline{1, n}$, $j = \overline{1, n}$, n – кількість сенсорів у мережі. Будемо вимагати, щоб значення p_i^s та $p_{i,j}^h$ були нормалізованими, тобто $0 \leq p_i^s \leq 1$, $0 \leq p_{i,j}^h \leq 1$.

У випадку різної пропускну спроможності каналів передачі даних елементи матриці K (3.4) будуть мати вигляд [62]:

$$k_{i,j}^* = (1 - k_{i,j})(1 - p_{i,j}^h), \quad (3.8)$$

де $i = \overline{1, n}$, $j = \overline{1, n}$, n – кількість сенсорів у мережі.

Також у випадку різної пропускну спроможності можна оцінити живучість сенсорної мережі у випадку втрати датчика або каналу зв'язку що забезпечують найкращу пропускну спроможність. Для обчислення значення параметру живучості знайдемо канали та датчики, що забезпечують максимальний потік. Для цього використаємо алгоритм Форда-Фалкерсона [107]. Позначимо отримані вектори як P_{max}^s та P_{max}^h відповідно, а значення максимального потоку як P_{max} . Обчислення значення параметру живучості сенсорної мережі у випадку втрати датчику або каналу зв'язку схоже на описаний вище алгоритм. Відмінність полягає

у пошуку значення максимального потоку. Відповідно до цього вектори m_p^h та m_p^s будуть містити елементи за відсутності яких не досягається значення максимального потоку P_{max} . Значення параметрів живучості сенсорної мережі у випадку втрати датчику або каналу зв'язку, що забезпечують максимальну пропускну здатність сенсорної мережі сформуємо у вигляді [62]:

$$c_p^h = 1 - \frac{c_0^h}{m_p^h}, \quad (3.9)$$

$$c_p^s = 1 - \frac{s_0^h}{m_p^s - 2}, \quad (3.10)$$

де c_0^h – кількість елементів у векторі h_{weak}^{max} , m_p^h – кількість елементів вектору P_{max}^h , s_0^h – кількість елементів у векторі c_{weak}^{max} , m_p^s – кількість елементів вектору P_{max}^s .

Враховуючи значення параметрів живучості сенсорної мережі відносно втрати елементів мережі, що забезпечують максимальний потік остаточне значення параметру живучості мережі обчислимо таким чином [62]:

$$c = c_s c_h c_p^h c_p^s. \quad (3.11)$$

Величина c_p^h буде набувати значення 1 у випадку рівної пропускну спроможності каналів зв'язку. В свою чергу, величина c_p^s буде набувати значення 1 у випадку рівної пропускну спроможності сенсорів.

Розглянемо випадок різної пропускну спроможності датчиків при рівній пропускну спроможності каналів зв'язку. У такому випадку виникає проблема знаходження елементів мережі, що забезпечують максимальну передачу даних. Виникнення даної проблеми пов'язане із можливістю наявності датчиків з пропускними спроможностями що є меншими за пропускну спроможність каналу зв'язку. Для вирішення описаної проблеми та подальшого використання алгоритму знаходження елементів мережі, що забезпечують максимальний потік, необхідно сформувати пропускну матрицю використавши ітераційну процедуру, що полягає у присвоєнні каналу зв'язку пропускну спроможності мінімального значення пропускну спроможності двох датчиків:

$$p_{i,j}^h = \min \{p_i^s, p_j^s\}. \quad (3.12)$$

Наступним етапом є зміна значення пропускної спроможності датчиків, що використовують канал зв'язку $p_{i,j}^h$ на мінімальне значення:

$$p_i^s = \min \{p_i^s, p_j^s\}, p_j^s = \min \{p_i^s, p_j^s\}. \quad (3.13)$$

Дана процедура виконується по чергово для кожного каналу зв'язку та для сенсорів, що приймають участь у передачі даних. Схематично роботу алгоритму можна зобразити таким чином (Рис. 3.3) [62]:

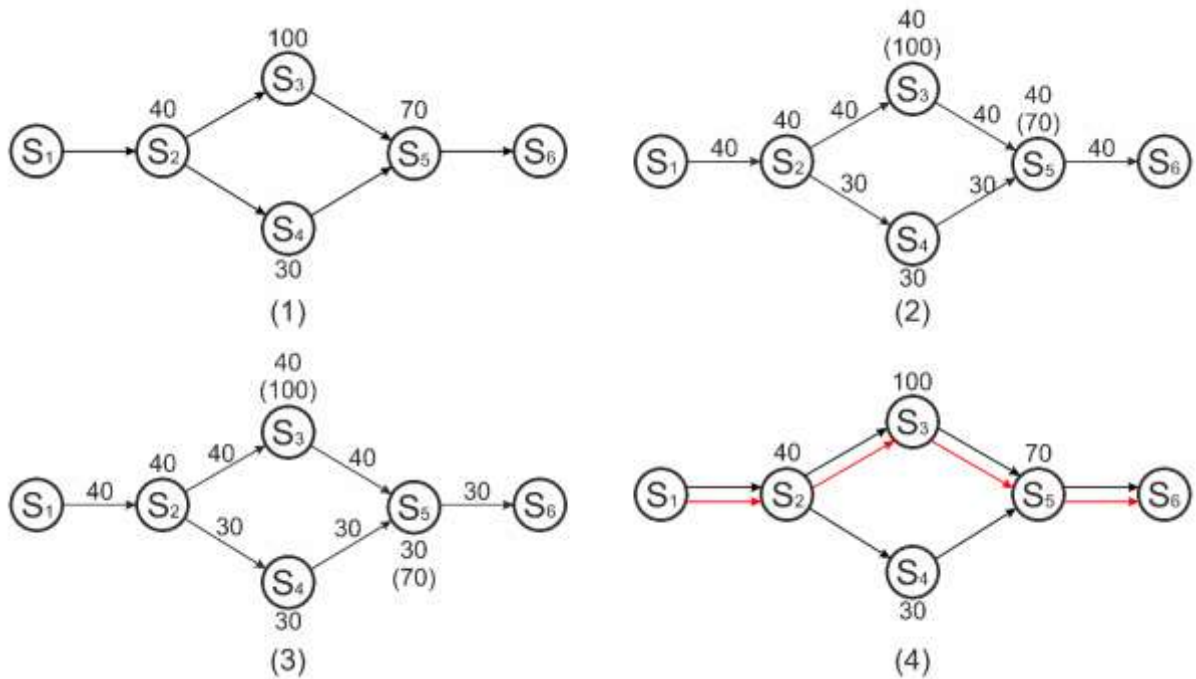


Рисунок 3.3 – Приклад формування пропускних спроможностей каналів зв'язку

Наступним методом є умовна заміна датчику на два датчики з'єднаних каналом зв'язку з пропускною спроможністю обраного датчику. Після розв'язання задачі знаходження максимального потоку та зворотної заміни отримаємо датчики та відповідні канали зв'язку, що забезпечують максимальну передачу даних у мережі. Схематично це можна зобразити у вигляді (Рис. 3.4) [62]:

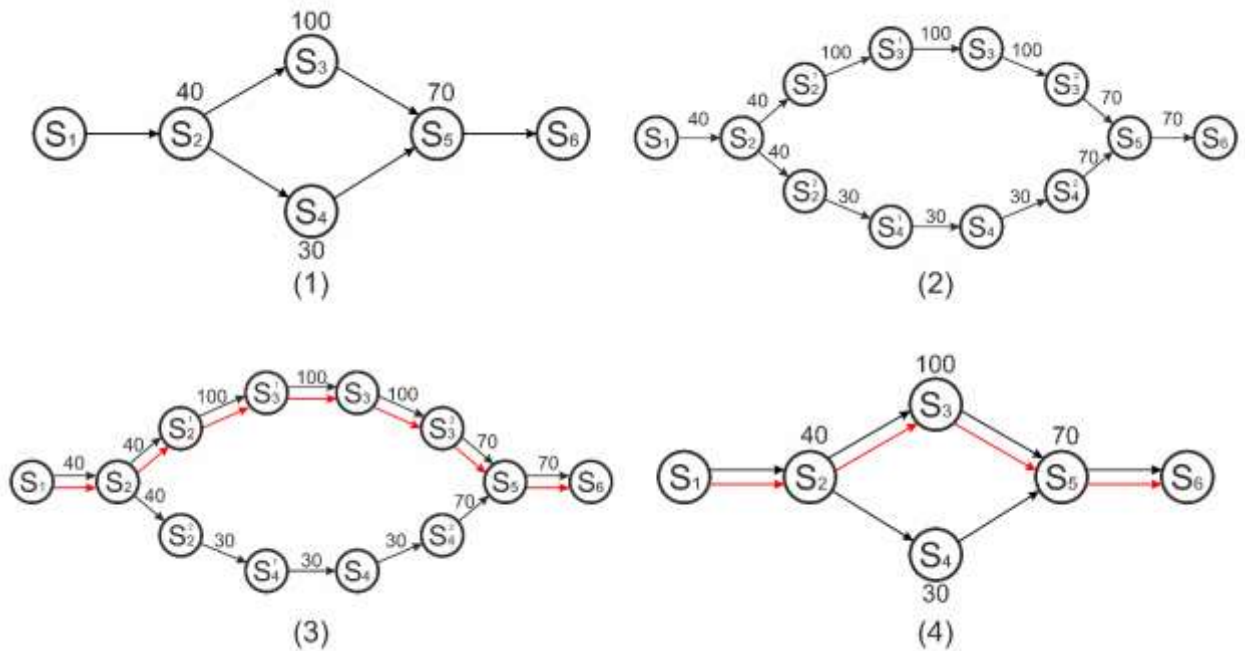


Рисунок 3.4 – Використання заміни датчиків

У випадку різної пропускної спроможності датчиків та каналів зв'язку описані вище підходи застосовуються для отримання матриці пропускних спроможностей каналів зв'язку.

3.2 Оцінка живучості мереж розповсюджених топологій

Топологія мережі в значній мірі впливає на функціональні можливості та живучість мереж. Згідно з [22] під топологією (компонуванням, конфігурацією, структурою) комп'ютерної мережі розуміється фізичне розташування комп'ютерів мережі один щодо іншого та спосіб їх з'єднання лініями зв'язку. Також даний термін застосовується і до БСМ.

Найбільш поширеними топологіями комп'ютерних мереж виділяють [53]:

1. Шина – тип мережевої топології, в якій робочі станції розташовані вздовж однієї ділянки кабелю, що називається сегментом (Рис. 3.5).

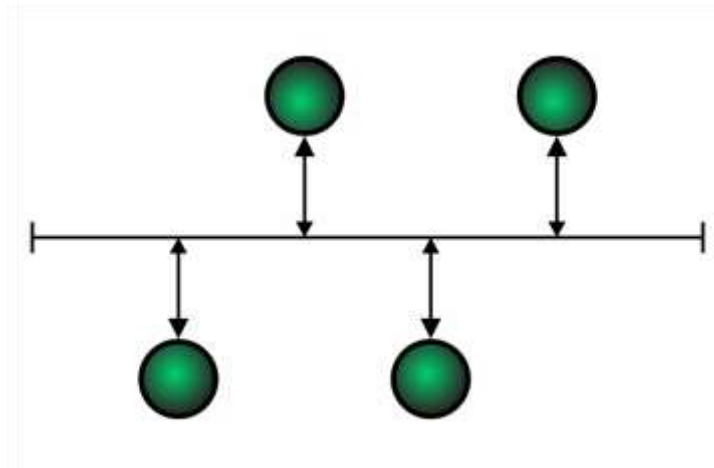


Рисунок 3.5 – Топологія шина

Згідно з підходом, що описаний у підрозділі 3.1, типова матриця зв'язків для

мереж даної топології буде рівна $A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & \ddots & \vdots \\ 1 & 1 & 1 & \dots & 0 \end{pmatrix}$. З врахуванням наявності

шини описану матрицю можна представити у вигляді bA , де $b = \begin{cases} 1, & \text{шина присутня} \\ 0, & \text{шина відсутня} \end{cases}$. Можна зробити висновок, що відсутність або несправність

шини призводить до втрати зв'язку між елементами мережі, тобто живучість сенсорної мережі відносно втрати зв'язку між датчиками буде рівна нулю $c_h = 0$, наслідком чого є значення загальної живучості мережі $c = 0$.

З використанням запропонованого підходу отримано такі результати:

- значення параметру живучості сенсорної мережі відносно втрати зв'язку між датчиками $c_h = 0$;
- значення параметру живучості сенсорної мережі відносно втрати датчику $c_s = 0$;
- загальна живучість мережі $c = 0$;
- вразливі компоненти мережі: шина, датчики, зв'язки між датчиками.

2. Зірка – це мережева топологія (Рис. 3.6), в якій всі робочі станції приєднано до вузлу (наприклад, до концентратора), який встановлює, підтримує і розриває зв'язки між робочими станціями.

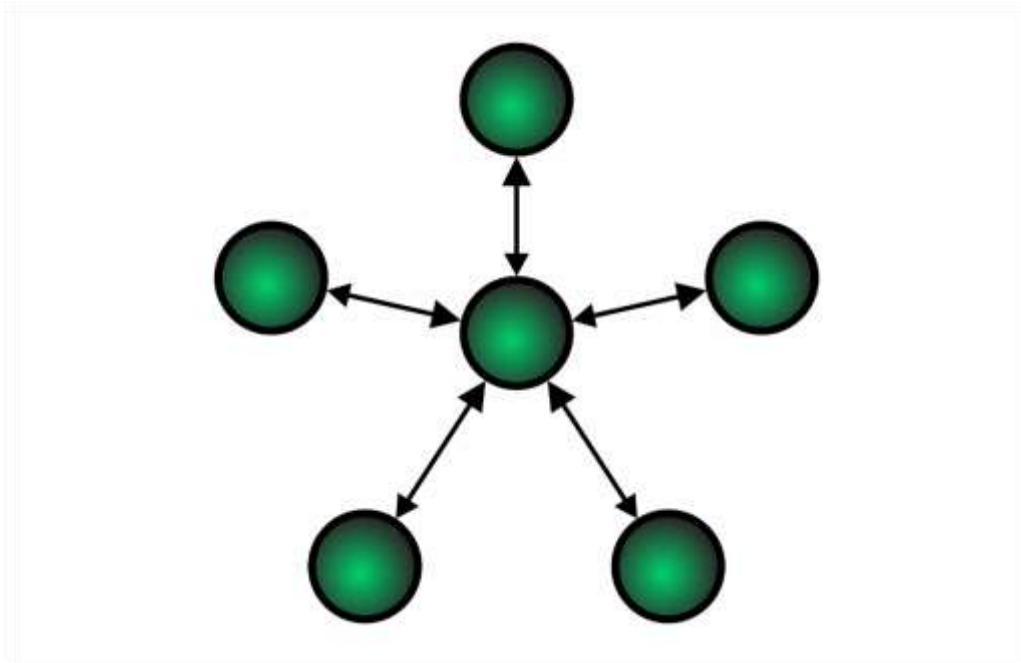


Рисунок 3.6 – Топологія зірка

Типова матриця зв'язків для мереж даної топології буде рівна $A =$

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & \ddots & \vdots \\ 1 & 1 & 1 & \dots & 0 \end{pmatrix}. \text{ З використанням запропонованого підходу отримано такі}$$

результати:

- значення параметру живучості сенсорної мережі відносно втрати зв'язку між датчиками $c_h = 0$;
- значення параметру живучості сенсорної мережі відносно втрати датчику $c_s = 0$;
- загальна живучість мережі $c = 0$;
- вразливі компоненти мережі: центральний датчик, зв'язки між датчиками.

3. Кільце – це топологія мережі, в якій кожна робоча станція з'єднана з двома іншими робітниками станціями, утворюючи кільце (Рис. 3.7). Дані передаються від однієї робочої станції до іншої в одному напрямку (по колу). Кожна робоча станція виконує роль повторювача, ретранслюючи повідомлення до наступної робочої

станції. Якщо елемент мережі отримує дані, призначені для іншого елемента мережі, він передає їх далі по кільцю, в іншому випадку вони далі не передаються.

Згідно з підходом, що описаний у підрозділі 3.1, типова матриця зв'язків для

мереж даної топології буде рівна $A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \ddots & \vdots \\ 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \end{pmatrix}$, а у випадку з'єднання

елементів у протилежному порядку $A = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \end{pmatrix}$. Згідно з

запропонованим підходом отримано такі результати:

- значення параметру живучості сенсорної мережі відносно втрати зв'язку між датчиками $c_h = 0$;
- значення параметру живучості сенсорної мережі відносно втрати датчику $c_s = 0$;
- загальна живучість мережі $c = 0$;
- вразливі компоненти мережі: датчики, зв'язки між датчиками.

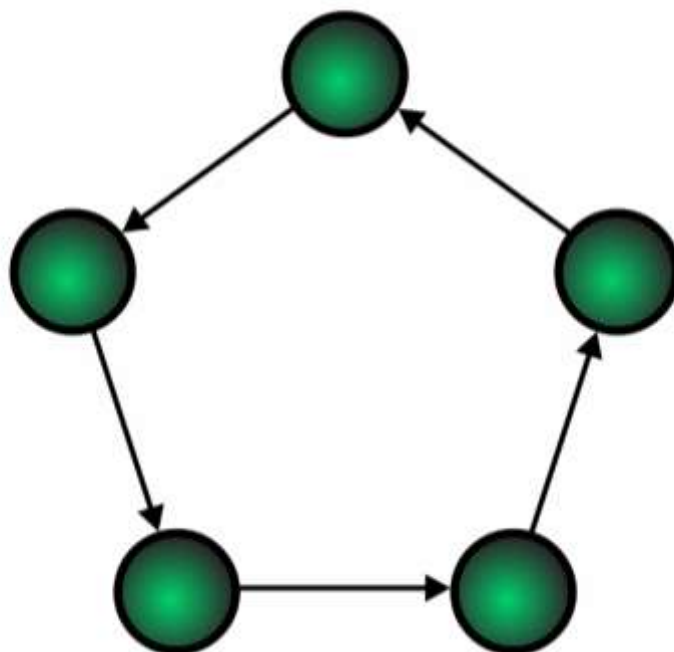


Рисунок 3.7 – Топологія кільце

4. Подвійне кільце – топологія мережі, побудована на двох кільцях. Перше кільце – основний шлях для передачі даних. Друге – резервний шлях, дублюючий основний. При нормальному функціонуванні першого кільця, дані передаються тільки по ньому. При його виході з ладу воно об'єднується з другим і мережа продовжує функціонувати. Дані при цьому за першим кільцем передаються в одному напрямку, а по другому в зворотному. Прикладом може служити мережа FDDI [22].

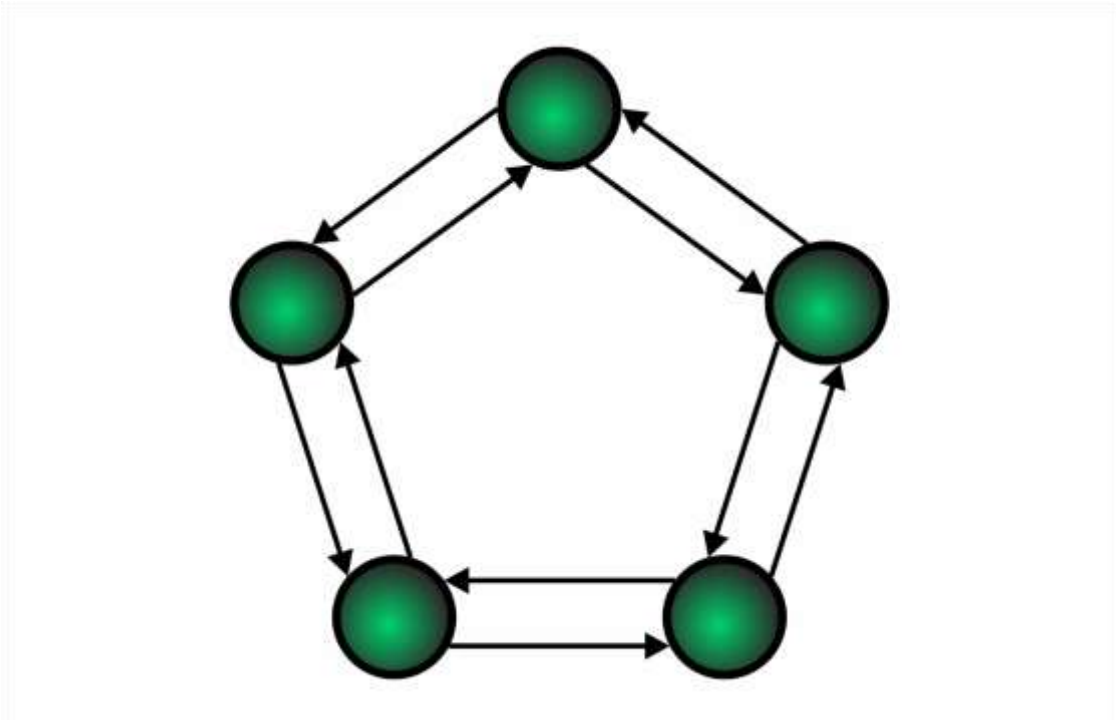


Рисунок 3.8 – Топологія подвійне кільце

Типова матриця зв'язків для мереж даної топології буде рівна $A =$

$$\begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & \ddots & \vdots \\ 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \end{pmatrix}. \text{ З використанням підходу оцінки живучості сенсорних мереж}$$

отримано такі результати:

- значення параметру живучості сенсорної мережі відносно втрати зв'язку між датчиками $c_h = 1$;

- значення параметру живучості сенсорної мережі відносно втрати датчику $c_s = 1$;
- загальна живучість мережі $c = 1$;
- вразливі компоненти мережі: відсутні.

5. Сітчаста (Mesh) топологія – топологія мережі, в якій кожен вузол (називається вузлом меш) передає дані по мережі і виступає в ролі комутатора. Всі вузли співпрацюють у розподілі даних в мережі, тобто кожен вузол бере участь у передачі даних.

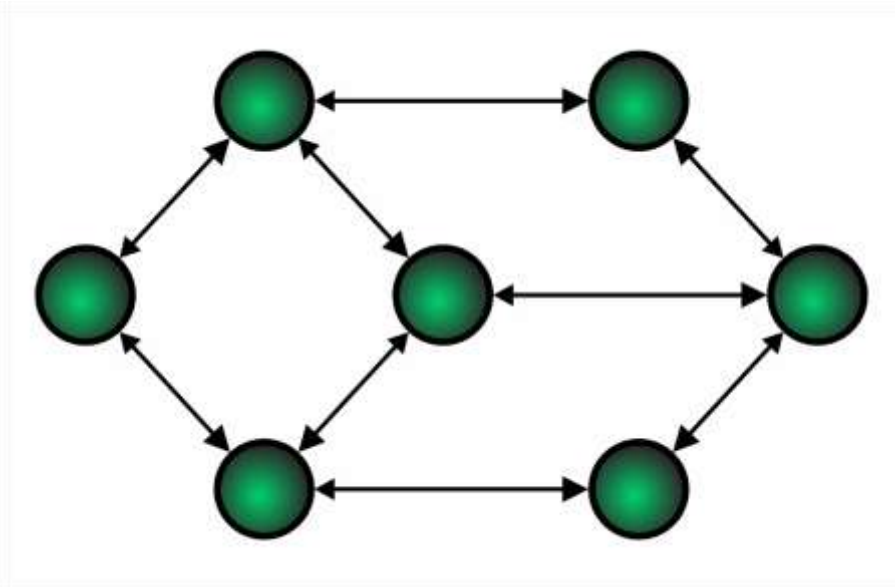


Рисунок 3.9 – Сітчаста топологія

Згідно з підходом, що описаний у підрозділі 3.1, матриця зв'язків для мереж

даної топології буде рівна $A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \end{pmatrix}$. Згідно з

запропонованим підходом отримано такі результати:

- значення параметру живучості сенсорної мережі відносно втрати зв'язку між датчиками $c_h = 1$;
- значення параметру живучості сенсорної мережі відносно втрати датчику $c_s = 1$;

- загальна живучість мережі $c = 1$;
- вразливі компоненти мережі: відсутні.

6. Деревовидна топологія – побудова мережі за схемою двійкового дерева, де кожен вузол більш високого рівня пов'язаний з двома вузлами наступного по порядку більш низького рівня (Рис. 3.10).

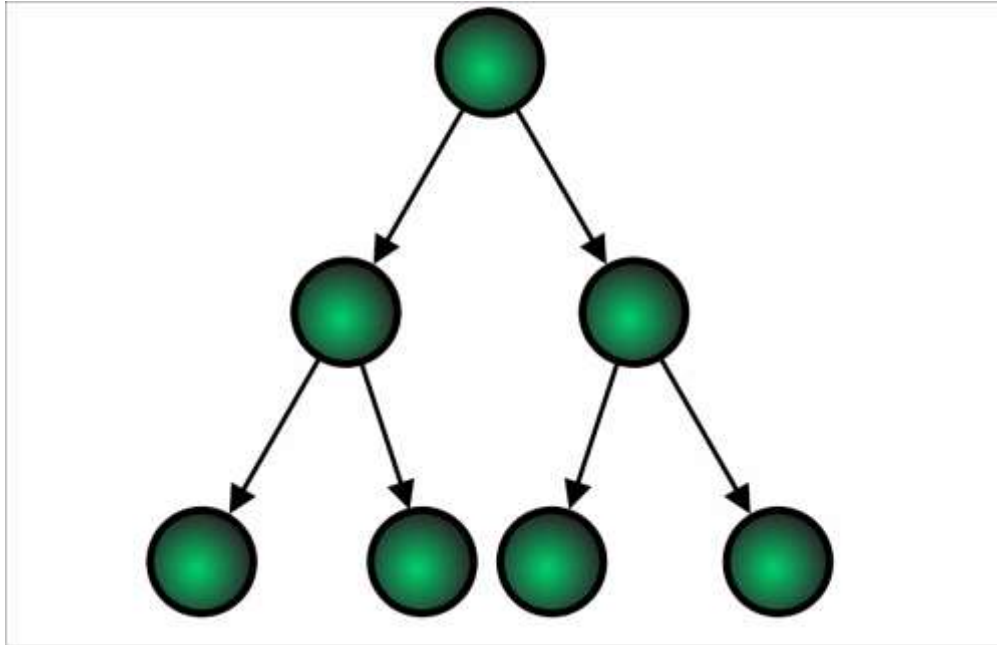


Рисунок 3.10 – Деревовидна топологія

7. Потовщене дерево (fat tree) – топологія комп'ютерної мережі, винайдена Charles E. Leiserson, є дешевою і ефективною для суперкомп'ютерів. На відміну від класичної топології дерево, в якій всі зв'язки між вузлами однакові, зв'язки в потовщеному дереві стають ширшими (товстими, продуктивними по пропускній спроможності) з кожним рівнем в міру наближення до кореня дерева. Часто використовують подвоєння пропускної спроможності на кожному рівні. Мережі з топологією fat tree є переважними для побудови кластерних міжз'єднань на основі технології Infiniband.

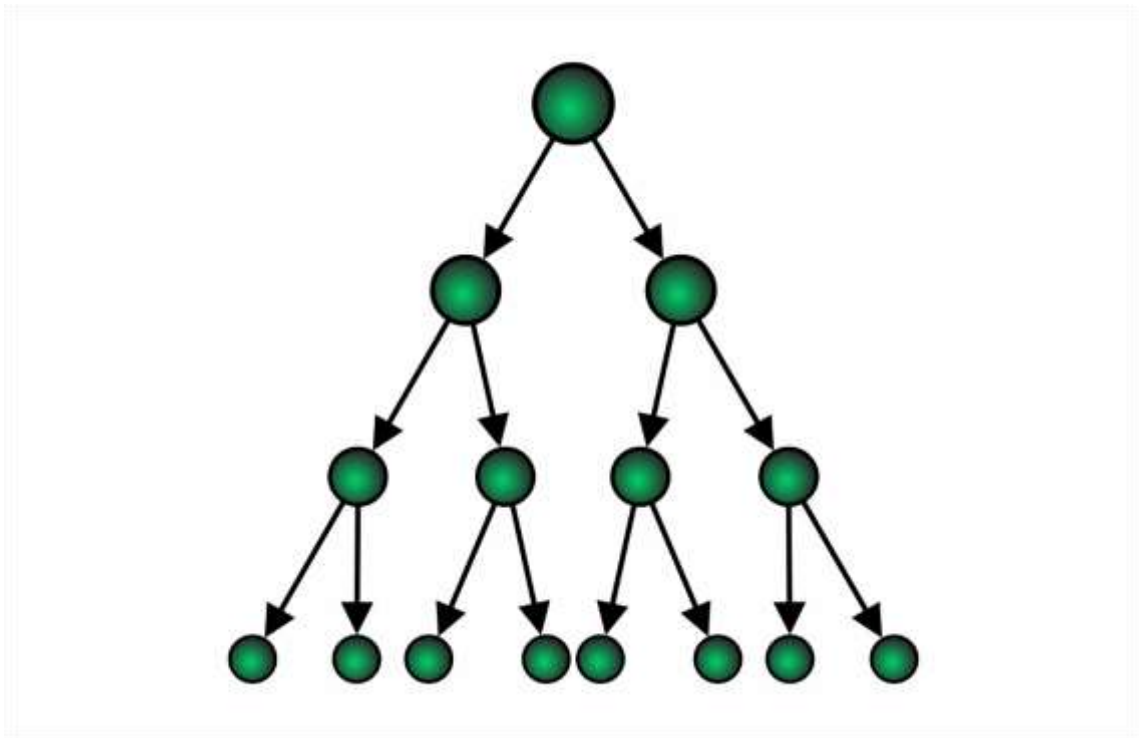


Рисунок 3.11 – Топологія потовщеного дерева

Згідно запропонованого підходу, отримано результати оцінки живучості сенсорних мереж, що є однаковими для деревовидної та потовщеної деревовидної топології:

- значення параметру живучості сенсорної мережі відносно втрати зв'язку між датчиками $c_h = 0$;
- значення параметру живучості сенсорної мережі відносно втрати датчику $c_s = 0$;
- загальна живучість мережі $c = 0$;
- вразливі компоненти мережі: датчики, зв'язки між датчиками.

8. Повнозв'язна топологія – топологія мережі, в якій кожна робоча станція підключена до всіх інших (Рис. 3.12). Цей варіант є громіздким і неефективним, незважаючи на свою логічну простоту. Для кожної пари повинна бути виділена незалежна лінія, кожен елемент мережі повинен мати стільки комунікаційних портів скільки пристроїв в мережі. З цих причин мережа може мати тільки порівняно невеликі кінцеві розміри. Найчастіше ця топологія використовується в багатомашинних комплексах або глобальних мережах при малій кількості робочих станцій.

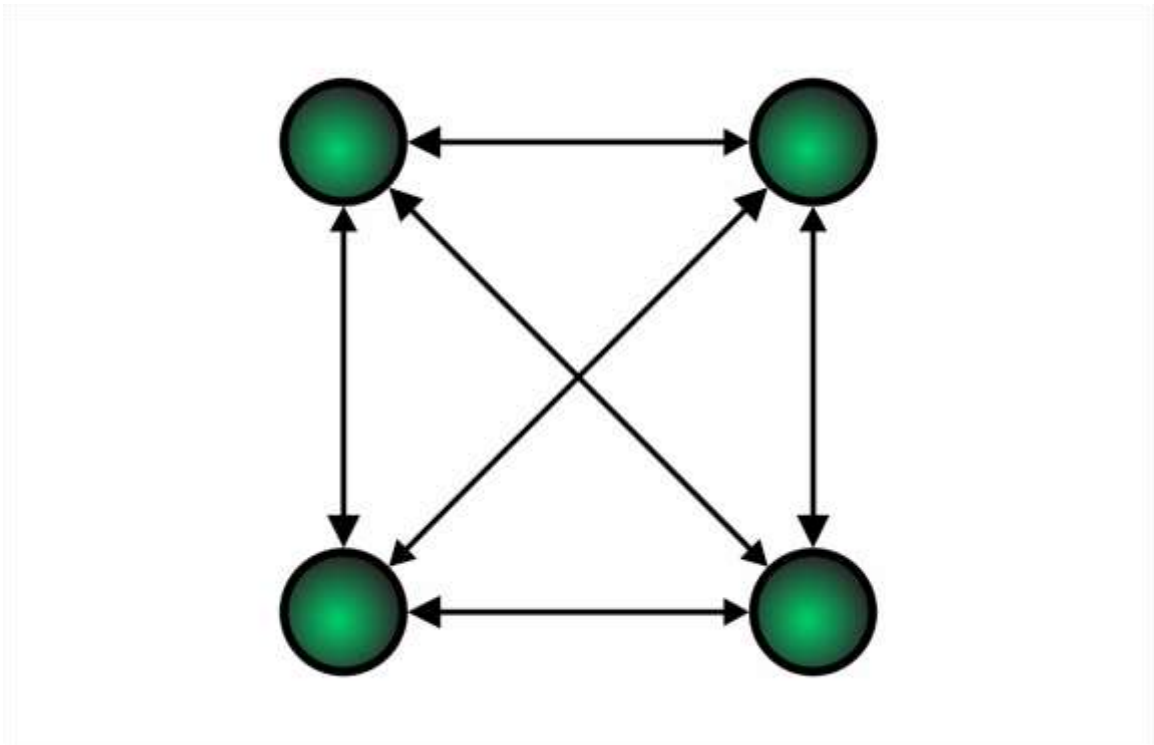


Рисунок 3.12 – Повнозв’язна топологія

Типова матриця зв'язків для мереж даної топології буде рівна $A =$

$$\begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & \ddots & \vdots \\ 1 & 1 & 1 & \dots & 0 \end{pmatrix}$$

З використанням підходу оцінки живучості сенсорних мереж

отримано такі результати:

- значення параметру живучості сенсорної мережі відносно втрати зв'язку між датчиками $c_h = 1$;
- значення параметру живучості сенсорної мережі відносно втрати датчику $c_s = 1$;
- загальна живучість мережі $c = 1$;
- вразливі компоненти мережі: відсутні.

Результати оцінки живучості сенсорних мереж поширених топологій з врахуванням описаного вище можна представити у вигляді таблиці (Табл. 3.1).

Таблиця 3.1 – Значення параметру живучості мереж поширених топологій

Назва топології	Живучість відносно втрати датчику (c_h), %	Живучість відносно втрати зв'язку (c_s), %	Загальна живучість мережі (c), %	Вразливі компоненти мережі
Шина	0	0	0	Шина, зв'язки між датчиками та шиною.
Зірка	0	0	0	Центральний датчик, зв'язки між датчиками
Кільце	0	0	0	Датчики, зв'язки між датчиками
Подвійне кільце	100	100	100	Відсутні
Сітчаста	100	100	100	Відсутні
Дерево	0	0	0	Датчики, зв'язки між датчиками
Товсте дерево	0	0	0	Датчики, зв'язки між датчиками
Повнозв'язна	100	100	100	Відсутні

Аналіз отриманих результатів вказує на низький рівень живучості мереж розповсюджених топологій відносно втрати датчиків та зв'язків між елементами мережі.

3.3 Алгоритм забезпечення живучості сенсорних мереж

У представлених вище підрозділах представлено метод оцінки живучості сенсорних мереж та виявлення вразливих компонентів мережі. Також представлена значення параметру живучості сенсорних мереж поширених топологій. Проте, крім оцінки живучості мережі необхідно забезпечувати живучість мережі у випадку низького значення параметру живучості мережі. Забезпечення живучості буде відбуватися шляхом приєднання до мережі додаткових датчиків.

Розглянемо мережу, що складається з n датчиків та певну територію, що покривається сенсорною мережею. Територію позначимо як A . Кожен датчик володіє характеристиками:

$$s_i = s_i(x_i, y_i, r_i), \quad (3.14)$$

де x_i, y_i – координати датчику, r_i – радіус покриття.

Живучість мережі будемо розглядати як наявність зв'язку між всіма сенсорами. Необхідною умовою передачі даних та наявності зв'язку між датчиками є перетин зон покриття сенсорів. Схематично перетин зон покриття датчиків з величиною перетину c можна зобразити таким чином (Рис. 3.13):

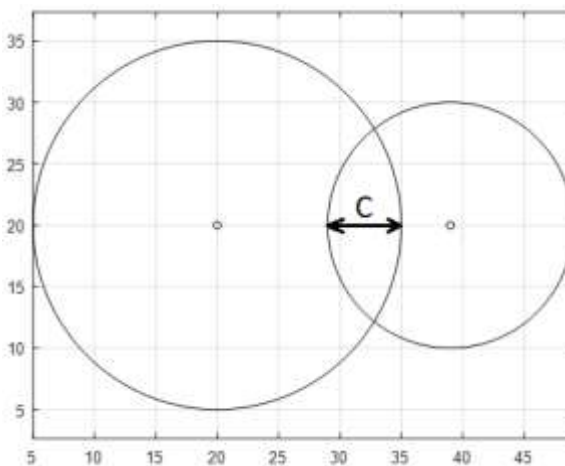


Рисунок 3.13 – Зміст величини перетину зон покриття датчиків c

Для знаходження датчиків між якими відсутній зв'язок пронумеруємо сенсори в довільному порядку. Побудуємо матрицю зв'язків H , елементи якої будуть рівними:

$$h_{i,j} = \begin{cases} 1, \text{ зв'язок між сенсорами присутній} \\ 0, \text{ зв'язок між сенсорами відсутній} \end{cases} \quad (3.15)$$

Використовуючи описану вище матрицю зв'язків H та алгоритми пошуку в ширину чи в глибину [126] знайдемо компоненти зв'язності неорієнтованого графа, що може бути побудований з використанням матриці H . Наявність більше однієї компоненти зв'язності означає відсутність зв'язку між всіма датчиками i , як наслідок не відповідність умові живучості. Також у випадку багатозв'язної мережі таку мережу можна умовно поділити на підмножини сенсорів, що є зв'язними між собою, позначимо дані множини як S_1, S_2, \dots, S_k , де k – кількість компонент зв'язності мережі. Для пари множин S_1 та S_2 знайдемо датчики $s_i \in S_1$ та $s_j \in S_2$ відстань між якими є мінімальною. Для знаходження позиції «з'єднуючого» сенсору з максимальним радіусом покриття r_a та рівнем перетину зон покриття c шляхом розв'язання системи рівнянь:

$$\begin{cases} \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} = r_i + r_a - c \\ \sqrt{(x - x_j)^2 + (y - y_j)^2} = r_j + r_a - c \end{cases} \quad (3.16)$$

де x_i, y_i, r_i – координати та радіус покриття сенсору s_i , x_j, y_j, r_j – координати та радіус покриття сенсору s_j , r_a – радіус покриття додаткового сенсору.

Розв'язком описаного вище рівняння (3.16) буде дві пари координат. Серед отриманих розв'язків необхідно обрати пару координат, зона покриття сенсору з даними координатами буде менше виходити за межі загальної території A та менше перетинатися з зонами покриття інших датчиків. У випадку, коли обидва результати задовольняють даний критерій, координати обираються довільним чином.

Розглянемо випадок відсутності розв'язку системи (3.16), що означає неможливість знаходження позицій додаткового сенсору із заданими параметрами. Знайдемо у даному випадку мінімально допустимий радіус покриття та координати додаткового сенсору. Очевидно, що додатковий сенсор буде мати мінімально допустимий радіус покриття при позиції на координатах, що лежать на умовній

прямій між датчиками s_i та s_j . Радіус покриття додаткового датчику r_a та координати (x_a, y_a) знайдемо шляхом розв'язання рівняння [87]:

$$\begin{cases} \sqrt{(x_a - x_i)^2 + (y_a - y_i)^2} = r_i + r_a - c \\ \sqrt{(x_a - x_j)^2 + (y_a - y_j)^2} = r_j + r_a - c \\ \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} = \sqrt{(x_a - x_i)^2 + (y_a - y_i)^2} + \sqrt{(x_a - x_j)^2 + (y_a - y_j)^2} \end{cases}, \quad (3.17)$$

де x_i, y_i, r_i – координати та радіус покриття сенсору s_i , x_j, y_j, r_j – координати та радіус покриття сенсору s_j .

Таким чином для забезпечення живучості мережі необхідно додати сенсор у позицію з координатами (x_a, y_a) та радіусом покриття r_a . У випадку відсутності у наявності датчику з відповідним радіусом покриття r_a необхідно використати декілька існуючих датчиків, що будуть розташовані вздовж умовної прямої між датчиками s_i та s_j та мати однакові радіуси покриття, що будуть задовольняти умову:

$$\begin{cases} r_a \bmod (r - c) = 0 \\ r \leq r^{max} \end{cases}, \quad (3.18)$$

де r^{max} – максимальний радіус покриття доступного сенсору.

Розглянемо випадок динамічних сенсорів. Нехай дано сенсорну мережу, що складається з стаціонарних та рухомих сенсорів. Опишемо дану мережу таким чином:

$$S = \{s_1, s_2, \dots, s_n, s_1^m, s_2^m, \dots, s_k^m\}, \quad (3.19)$$

де s_i – стаціонарні сенсори (1), $i = \overline{1, n}$, n – кількість стаціонарних сенсорів, s_j^m – динамічні сенсори, $j = \overline{1, k}$, k – кількість динамічних сенсорів.

Динамічні сенсори володіють такими параметрами:

$$s_j^m = s_j^m(f_j(x_j^m, y_j^m, t), r_j^m), \quad (3.20)$$

де $f_j(x_j^m, y_j^m, t)$ – рівняння руху датчику, x_j^m, y_j^m – координати датчику, r_j^m – радіус покриття, $j = \overline{1, k}$, k – кількість динамічних сенсорів.

Введемо поняття «час тиші» як період часу протягом якого відсутній зв'язок всіх датчиків між собою. Забезпечення живучості мережі, що складається з стаціонарних та динамічних датчиків, полягає у мінімізації «часу тиші». Даний результат досягається шляхом забезпечення зв'язності мережі, що будемо досягати шляхом додавання до мережі додаткових сенсорів.

Ітераційний підхід забезпечення живучості сенсорної мережі у випадку динамічних датчиків може бути покроково описаний таким чином [87]:

1. Серед всіх сенсорів мережі S обираємо датчик, що є найближчим до динамічного сенсору, позначаємо його $s_{nearest}(x_{nearest}, y_{nearest}, r_{nearest})$. Формуємо систему рівнянь виду:

$$Q = \begin{cases} \sqrt{(x - x_{nearest})^2 + (y - y_{nearest})^2} = r_{nearest} + r_{additional} - c \\ \sqrt{(x - x(t_i^*))^2 + (y - y(t_i^*))^2} = r(t_i^*) + r_{additional} - c \end{cases}; (3.21)$$

2. Шукаємо розв'язок системи (3.21);

3. У випадку існування розв'язку додаємо до системи рівнянь Q рівняння що містить координати рухомого датчику у момент часу t_i^* , переходимо до наступного моменту часу $t_{i+1}^* = t_i^* + \Delta t$, виконуємо перевірку умови зупинки алгоритму та перехід до кроку 2 у випадку негативного результату перевірки умови зупинки. У загальному вигляді рівняння Q представимо у формі:

$$Q = \begin{cases} \sqrt{(x - x_{nearest})^2 + (y - y_{nearest})^2} = r_{nearest} + r_{additional} - c \\ \sqrt{(x - x(t_{i+1}^*))^2 + (y - y(t_{i+1}^*))^2} = r(t_{i+1}^*) + r_{additional} - c \\ \sqrt{(x - x(t_i^*))^2 + (y - y(t_i^*))^2} = r(t_i^*) + r_{additional} - c \\ \sqrt{(x - x(t_{i-1}^*))^2 + (y - y(t_{i-1}^*))^2} = r(t_{i-1}^*) + r_{additional} - c \\ \dots \\ \sqrt{(x - x(t_0^*))^2 + (y - y(t_0^*))^2} = r(t_0^*) + r_{additional} - c \end{cases}; (3.22)$$

4. У випадку відсутності розв'язку рівняння Q додаємо сенсор з характеристиками, що є розв'язками рівняння Q у момент часу t_i^* , $s(x_{solution}(t_i^*), y_{solution}(t_i^*), r_{additional})$ до статичних датчиків мережі S та переходимо до наступного моменту часу $t_{i+1}^* = t_i^* + \Delta t$. Виконуємо перевірку умови зупинки алгоритму та перехід до кроку 1 у випадку негативного результату перевірки умови зупинки.

Умовою зупинки алгоритму буде вихід динамічного сенсору за межі території або досягнення сенсором початкової точки у випадку руху датчику за циклічною траєкторією.

Схематично описаний вище алгоритм забезпечення живучості сенсорної мережі можна зобразити таким чином (Рис. 3.14) [87]:

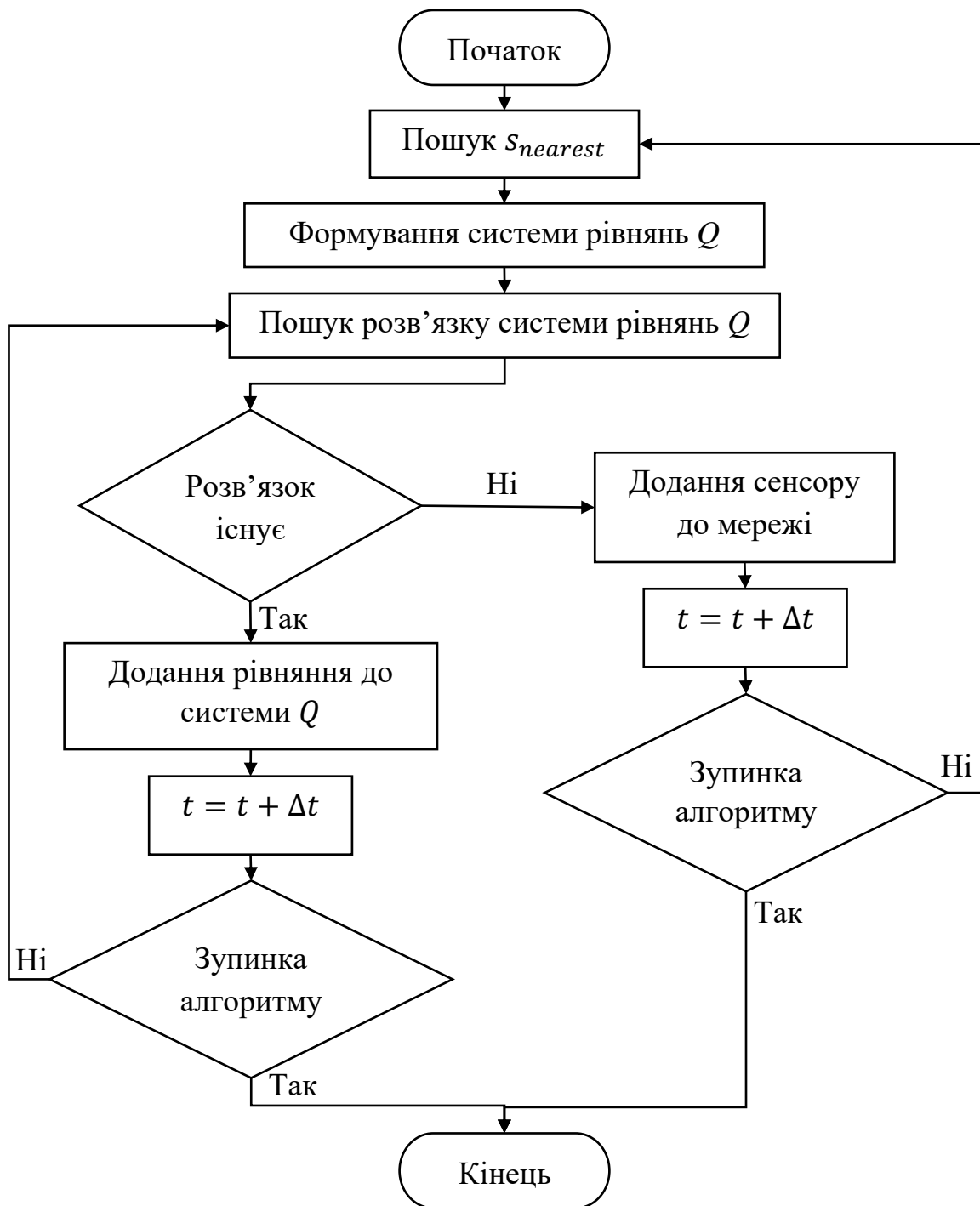


Рисунок 3.14 – Блок-схема алгоритму пошуку позиції додаткових сенсорів

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3

У розділі представлено метод оцінки живучості сенсорних мереж, алгоритм забезпечення живучості сенсорних мереж, знайдено значення параметрів живучості мереж розповсюджених топологій. Отримано такі результати:

1. Вперше запропоновано метод оцінки живучості сенсорних мереж у випадках втрати елементів мережі з урахуванням пропускних спроможностей елементів мережі. Значення параметру живучості мережі формується як одночасна живучість мережі відносно втрати датчиків, що є найважливішими у мережі та зв'язків між ними. Дані датчики обираються шляхом експертного оцінювання. Метод оцінки живучості мережі відносно втрати датчиків базується на використанні алгоритму Дейкстри з модифікацією вхідних параметрів. Також одним із компонент значення параметру загальної живучості мережі є оцінка мережі відносно втрати компонентів (датчиків та зв'язків між ними), що забезпечують найвищу пропускну здатність мережі. Вважається, що кожен компонент мережі володіє власною пропускну спроможністю, що залежить від технічних характеристик елемента. Для знаходження вразливих елементів мережі з урахуванням пропускних спроможностей компонентів мережі використано алгоритм Форда-Фалкерсона;

2. Проведено аналіз та оцінку живучості мереж розповсюджених топологій. Аналіз отриманих результатів продемонстрував низькі значення параметрів живучості мереж розповсюджених топологій відносно втрати елементів мережі та зв'язків між ними;

3. Запропоновано алгоритми забезпечення живучості мереж у випадку статичних та рухомих датчиків. У алгоритмах враховано необхідність перетину зон покриття датчиків як необхідну умову існування передачі даних між сенсорами. Алгоритми представлені ітераційними процедурами почергового включення додаткових датчиків до сенсорної мережі.

РОЗДІЛ 4. ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПРОГРАМОВАНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ СТРУКТУРИ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ

4.1 Метод програмованої оптимізації структури сенсорних мереж

Під структурою сенсорної мережі розглядаємо значення параметрів радіусу покриття, діаметру перетину зон покриття датчиків, траєкторія обльоту території та живучості. Значення радіусу покриття датчиків, діаметру перетину зон покриття датчиків та траєкторія обльоту території впливають на енергоефективність мережі та величину покриття території мережею. Живучість сенсорної мережі розглядаємо як властивість, що характеризує здатність системи ефективно функціонувати за наявності ушкоджень або відновлювати цю здатність за визначений проміжок часу [18].

Під програмованою оптимізацією розуміємо можливість зміни характеристик мережі (радіус покриття датчиків, діаметр перетину зон покриття, топологія) під час функціонування мережі для досягнення оптимальності за певними критеріями (енергоефективність, покриття, вартість мережі). Тобто, на етапі проектування програмного забезпечення ми закладаємо можливість масштабування користувачем структури та характеристик сенсорної мережі, оцінки живучості та виявлення вразливих елементів мережі на етапі експлуатації.

Метод програмованої оптимізації структури сенсорних мереж представимо у вигляді набору таких дій:

1. Оптимізації енерговитрат мережі з заданим рівнем перетину зон покриття (Розділ 2.1);
2. Пошуку оптимальних параметрів мережі (Розділ 2.2);
3. Побудова оптимальних траєкторій обльоту території (Розділ 2.3);
4. Оцінка та забезпечення живучості, виявлення вразливих елементів сенсорних мереж (Розділ 3.1, 3.3).

Дані дії представимо у вигляді окремих модулів. Кожен модуль може бути використаний як окремо так і у поєднанні з іншими модулями. При спільному

використанні декількох модулів вхідними даними для наступного модулю будуть результати використання попереднього модулю. Схема використання розробленого представлено на рис. 4.1.

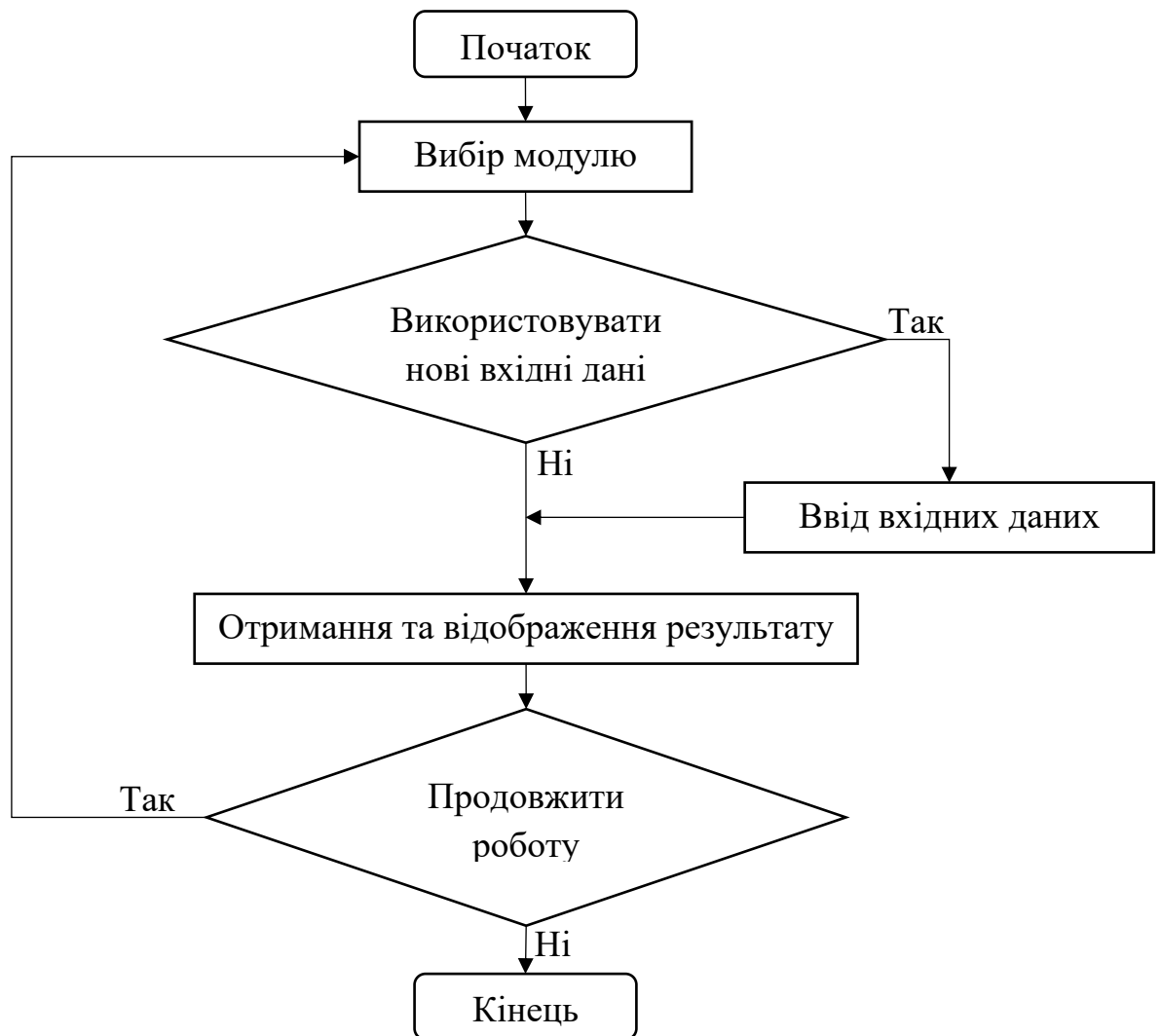


Рисунок 4.1 – Схема методу програмованої оптимізації структури сенсорних мереж

Розглянемо дану схему більш детально. Наприклад, після оптимізації енерговитрат мережі шляхом регулювання радіусів покриття із заданим рівнем перетину зон покриття можливо оцінити живучість отриманої мережі, знайти оптимальні параметри мережі або побудувати траєкторію обльоту території. У випадку побудови траєкторії, ділянки, покриті результуючою мережею, будуть розглядатися як вже покриті ділянки, а при знаходженні оптимальних параметрів мережі обмеженням буде заданий діаметр перетину зон покриття. Після побудови

мережі використовуючи оптимальні параметри мережі можливо оцінити живучість результуючої мережі.

На рисунку 4.2 представлено схему взаємозв'язків модулів розробленого методу.

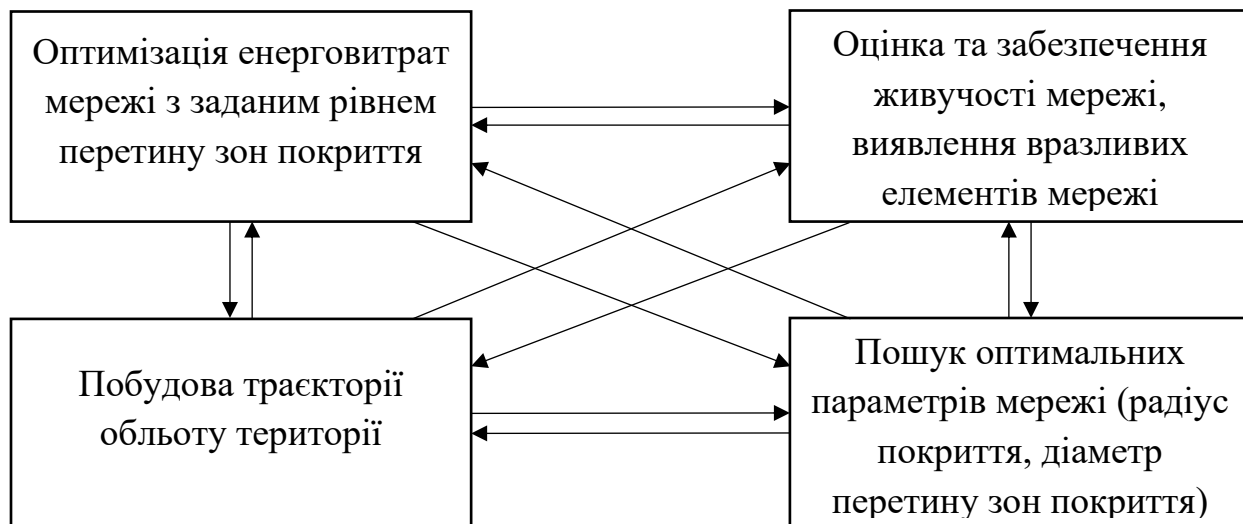


Рисунок 4.2 – Схема взаємозв'язків модулів розробленого методу

Таким чином, розроблено загальний метод програмованої оптимізації структури сенсорних мереж, що об'єднує всі методи, що розроблені у Розділах 2 та 3.

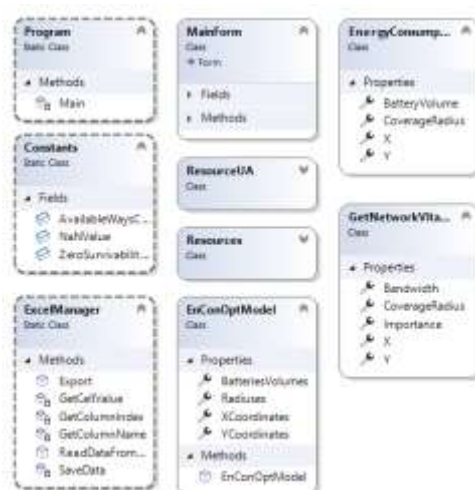
4.2 Опис використаних технологій та особливості реалізації програмного забезпечення

Програмна реалізація методу забезпечення енергоефективності сенсорних мереж та оцінкою їх живучості виконана у вигляді динамічно-приєднуваної бібліотеки (.dll) із використанням платформи .Net 6 [9, 69]. Особливостями обраної платформи є висока продуктивність та багатоплатформність. В свою чергу, багатоплатформність (кросплатформність, мультиплатформність) – властивість програмного забезпечення працювати більш ніж на одній програмній (в тому числі – операційній системі) або апаратній платформі; технології, що дозволяють досягти такої властивості. Кросплатформність дозволяє суттєво скоротити витрати на

розробку нового або адаптацію існуючого програмного забезпечення [56]. Ще однією особливістю обраної платформи є довгострокова підтримка (Long term support, LTS, Extended-support release, ESR). Довгострокова підтримка – це частина життєвого циклу програмного забезпечення (ПЗ), яка означає, що стабільний реліз буде підтримуватися довгий час і буде вважатися стандартною версією до поширення. Термін зазвичай застосовується до відкритого ПЗ. У LTS важливий принцип надійності розробки. LTS збільшує період супроводу ПЗ, також змінюючи тип патчів і частоту їх виходу, оскільки переслідуються цілі зменшення ризиків, вартості та кількості зривів термінів розгортання. Однак це не обов'язково означає технічну підтримку.

Розроблена бібліотека надає доступ до чотирьох класів: EnergyConsumptionOptimizer, TrajectoryBuilder, SensorNetworkVitalityTester та TerritoryCoverageOptimizer. У даних класах представлено методи, що дозволяють побудувати максимальне покриття території з заданим рівнем перетину зон покриття та мінімізацією енерговитрат, побудувати оптимальний маршрут об'їзду території та оцінити стійкість мережі відносно втрати датчиків та зв'язків, що забезпечують передачу даних та максимальний потік в мережі.

Описана бібліотека використана у розробленому додатку максимізації покриття території з мінімізацією енерговитрат та оцінкою живучості сенсорних мереж. Розроблений додаток має монолітну архітектуру. На рис. 4.3 представлено діаграму класів розробленого додатку.



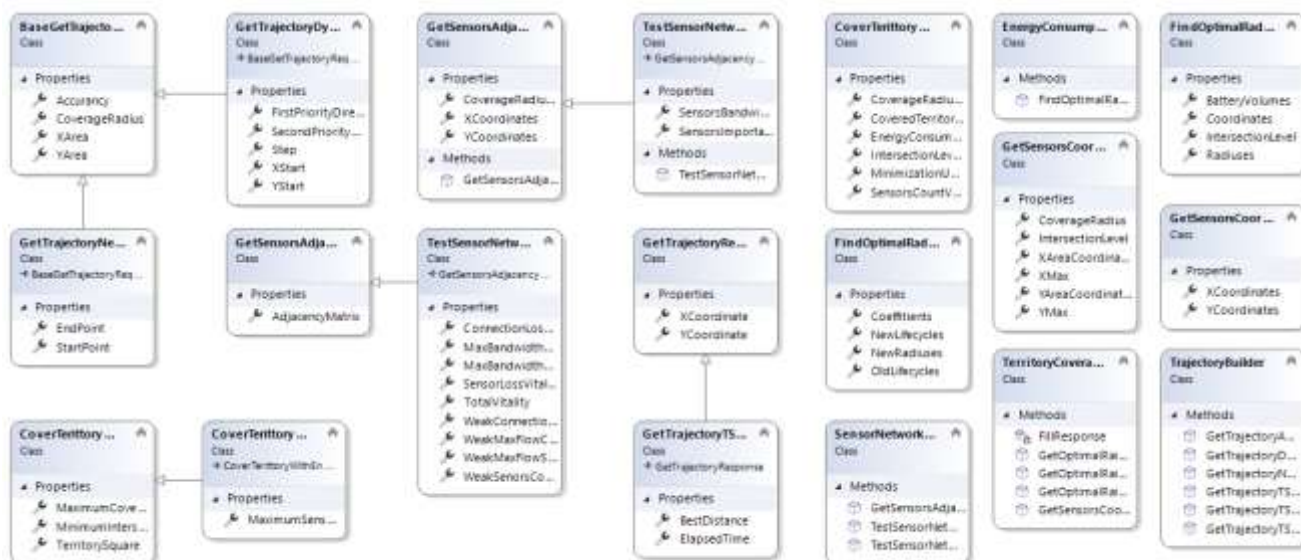


Рисунок 4.3 – Діаграма класів додатку пошуку оптимальних параметрів мережі

Користувацький інтерфейс було розроблено із використанням технології WinForms. Перевагами використання даної технології можна відзначити:

1. Легкість та зрозумілість у використанні;
2. Велика спільнота підтримки;
3. Прості та звичні елементи керування;
4. Елементи керування на основі подій;
5. Відкритий код.

Користувацький інтерфейс розробленого програмного забезпечення представлений у вигляді однієї основної форми та елемента TabControl, що містить чотири сторінки класу TabPage. В свою чергу, кожна сторінка відповідає використанню методів одного з чотирьох представлених класів EnergyConsumptionOptimizer, TrajectoryBuilder, SensorNetworkVitalityTester та TerritoryCoverageOptimizer що забезпечує зручність користувацького інтерфейсу.

Розглянемо детально структуру та використання кожної окремої вкладки. На рисунку 4.40 представлено першу вкладку під назвою “Optimal territory coverage”. Дана вкладка представляє користувацький інтерфейс використання методів класу TerritoryCoverageOptimizer, що забезпечують максимізацію покриття з

мінімізацією енерговитрат з можливістю обмеження кількості датчиків. Детальний опис моделей та методів розв’язання представлено у розділі 2. Для розв’язання проблеми максимізації покриття при мінімізації енерговитрат користувачу необхідно завантажити територію, захопити межі території, заповнити вхідні дані. Запуск оптимізаційного методу відбувається при натисненні відповідної кнопки лише після перевірки повноти та коректності введених даних.

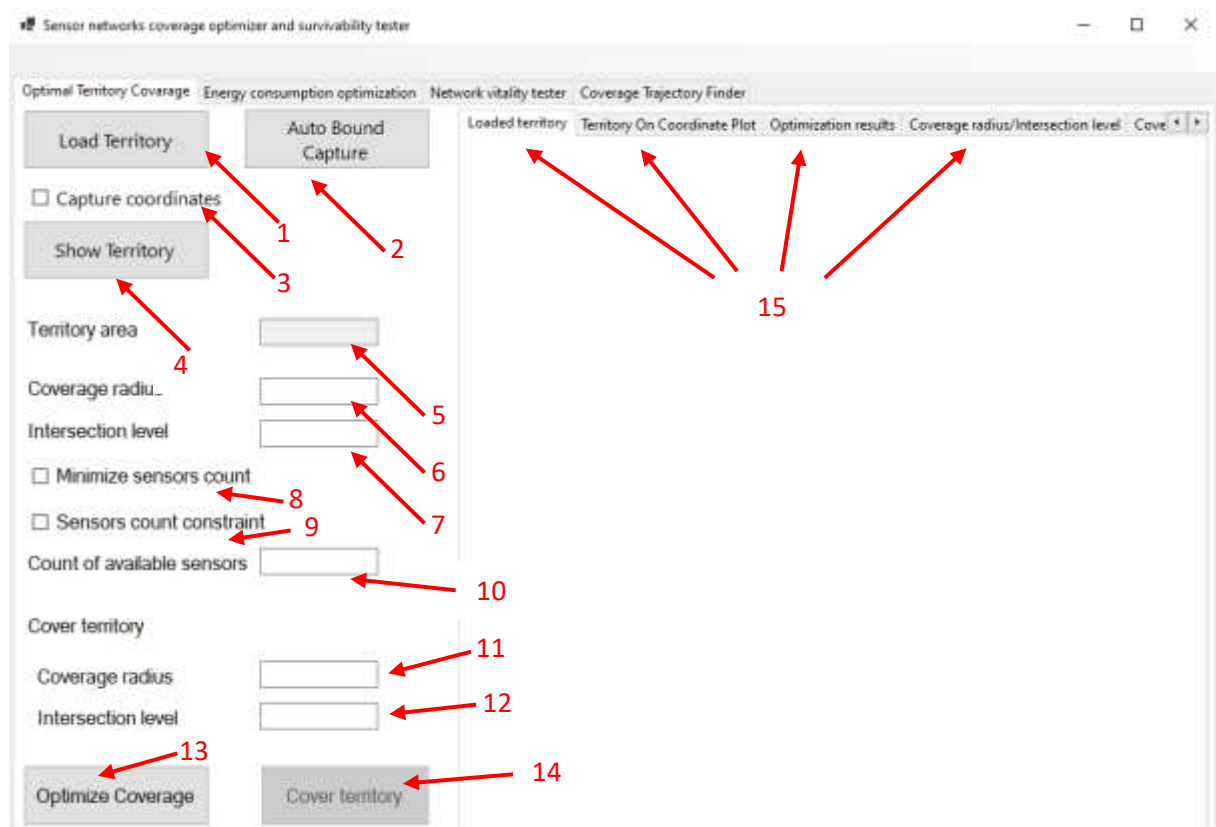


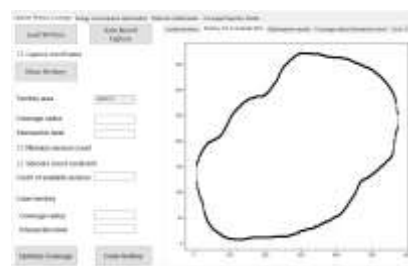
Рисунок 4.4 – Структура вкладки Optimal territory coverage: 1 – кнопка завантаження території з файлу; 2 – кнопка автоматичного захоплення межі території; 3 – ввімкнення ручного режиму захоплення межі території; 4 – кнопка відображення території; 5 – поле для відображення площі завантаженої території; 6 – поле введення максимального радіусу покриття; 7 – поле введення максимального значення радіуса перетину зон покриття; 8 – прапорець ввімкнення режиму мінімізації кількості датчиків; 9 – прапорець ввімкнення режиму обмеження кількості датчиків; 10 – поле введення кількості доступних датчиків; 11 – поле введення радіусу покриття при відображенні покриття території; 12 – поле введення діаметру перетину зон покриття датчиків при відображенні

покриття території; 13 – кнопка запуску оптимізаційного методу; 14 – кнопка покриття території; 15 – вкладки відображення результатів

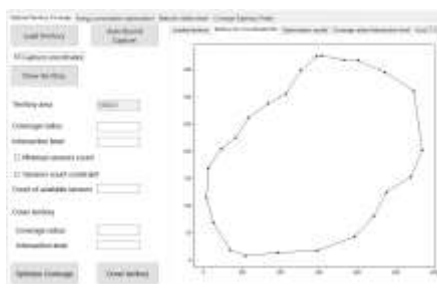
Користувач може завантажити територію для побудови покриття з файлу довільного графічного формату. Особливістю розробленого програмного забезпечення є можливість автоматичного захоплення меж території, або використання режиму ручного захоплення. Автоматичне захоплення меж відбувається з точністю 1 піксель. Обчислення площі відбувається автоматично після завершення захоплення межі території. Приклад використання різних режимів захоплення території представлено на рисунку 4.5.



а)



б)



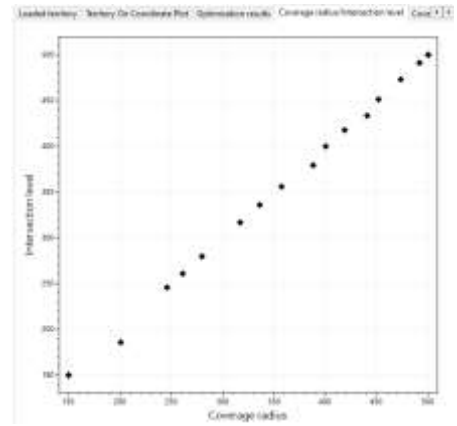
в)

Рисунок 4.5 – Результат захоплення території: а) завантажена територія б) автоматичний режим; в) ручний режим

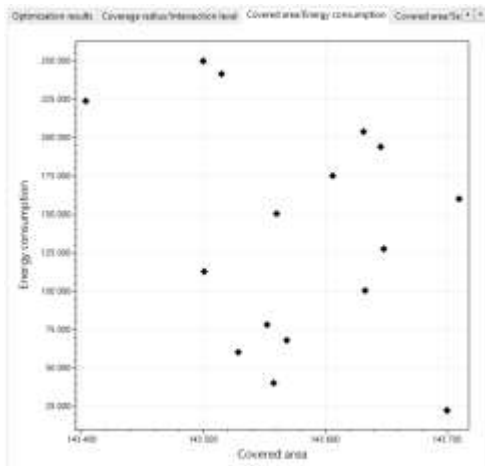
Результати оптимізації представлено на окремому дочірньому елементі TabControl, що складається з 5 вкладок (Рис. 4.6):

Coverage radius	Intersection level	Covered area	Energy consumption	Sensors count	Minimization area function value
150.00	1.00	141780	22500	958	-0.277
100	389.999	141498.70	88889.021	287	-1.983
117.27	376.941	141602.70	90933.410	453	-1.237
400.000	480.045	141793.888	100044.889	258	-1.307
431.617	491.635	141815.627	104806.830	318	-1.511
328.007	328.008	141588.555	112840.941	427	-1.881
157.222	328.008	141647.950	127887.028	402	-1.703
150.001	1.00	141780	22500	958	-0.277
500	489.999	141498.70	249999.021	287	-1.981
473.278	473.148	141493.278	233983.186	303	-2.750
380.000	380.014	141588.190	18138.160	358	-0.836
308.70	181.720	141557.607	40702.508	713	-0.933
388	278.137	141558.08	120541.007	370	-1.493
618.070	617.818	141626.020	175280.368	342	-2.148
100.789	249.788	141761.071	90871.041	784	-0.742
497.488	497.331	141574.730	241381.077	232	-2.873
480.00	480.005	141645.687	166153.031	326	-2.043
178.628	278.70	141545.130	16184.130	813	-0.944

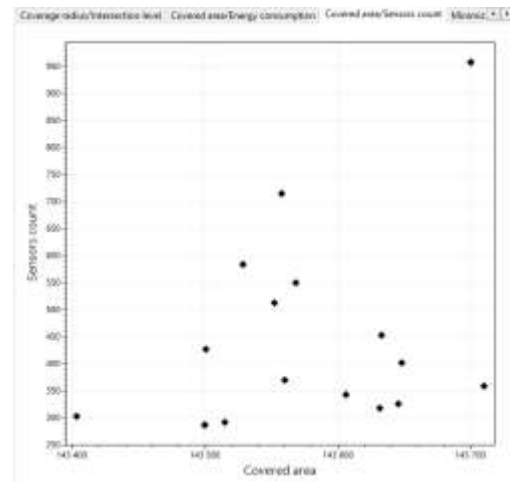
а) Таблиця результатів;



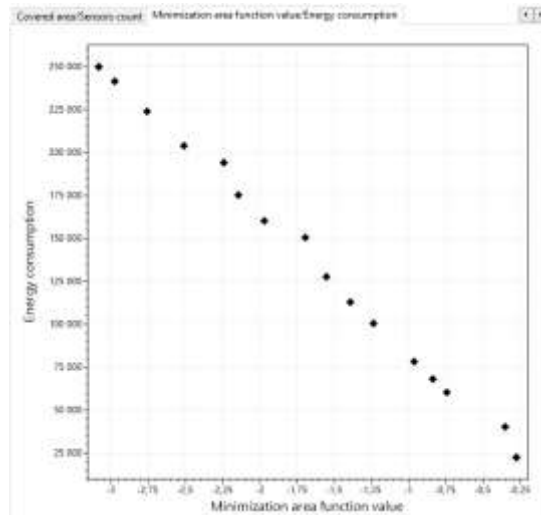
б) Радіус покриття/діаметр перетину;



в) Енерговитрати/площа покриття;



г) Кількість сенсорів/площа покриття;



г) Енерговитрати/значення цільової функції.

Рисунок 4.6 – Вкладки дочірнього елемента відображення результатів

На другій вкладці з назвою Energy consumption optimization представлено користувацький інтерфейс використання методів класу

EnergyConsumptionOptimizer, що забезпечують мінімізацію енерговитрат сенсорної мережі шляхом регулювання радіусів покриття датчиків із заданим рівнем перетину зон покриття.

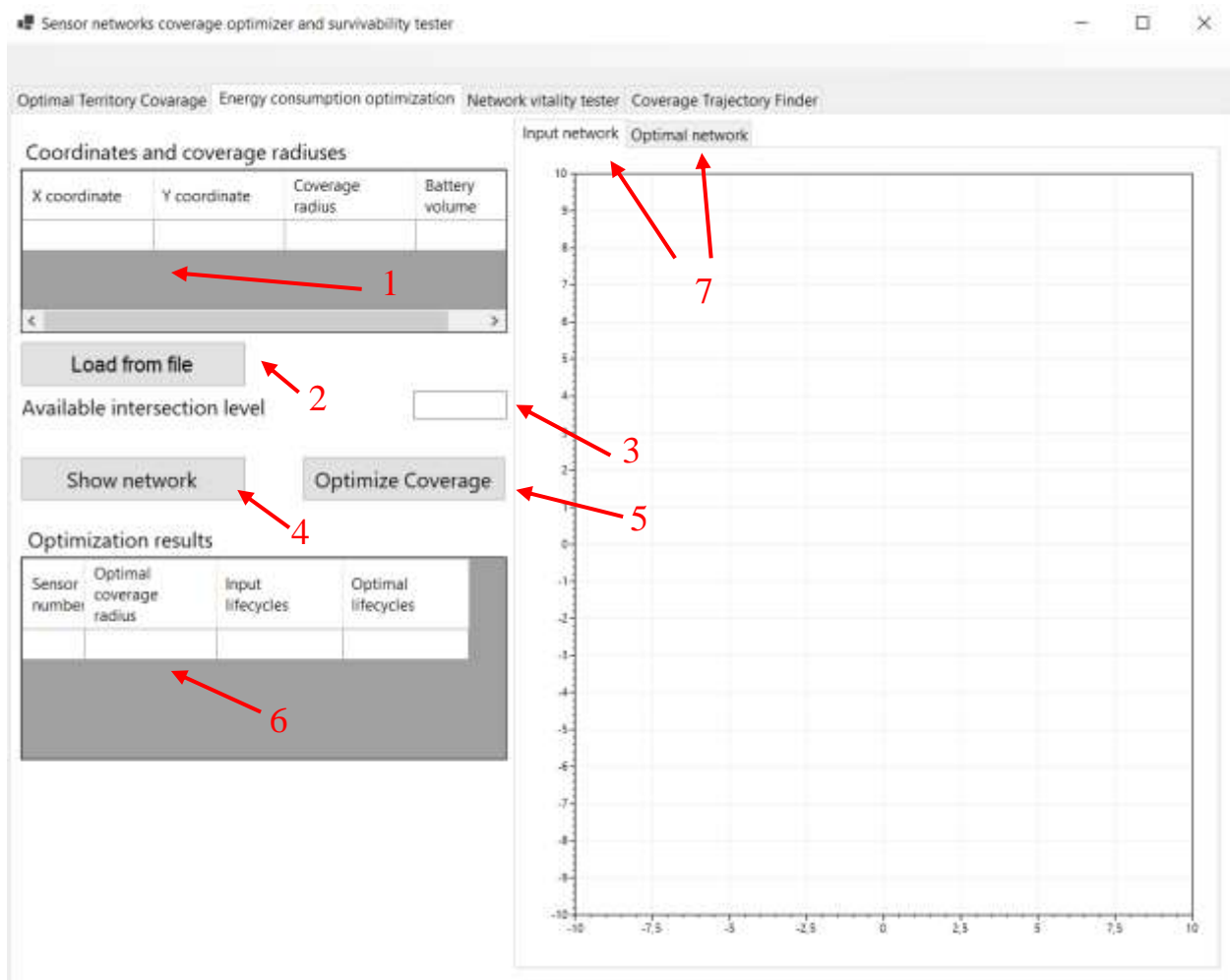


Рисунок 4.7 – Структура вкладки Energy consumption optimization: 1 – компонент вводу характеристик вхідної мережі; 2 – кнопка завантаження вхідних даних з файлу; 3 – діаметр перетину зон покриття; 4 – кнопка відображення мережі; 5 – кнопка побудови енергоефективного покриття; 6 – компонент виводу результату; 7 – вкладки відображення результату

Для відображення вхідної мережі та побудови енергоефективної мережі користувачу необхідно ввести координати, радіуси покриття та об'єм акумуляторів мережі. Для вводу даних використано компонент DataGridView. Особливістю розробленого програмного забезпечення є можливість завантаження користувачем вхідних характеристик мережі з відповідного файлу електронних таблиць з

розширенням .xls або .xlsx. Після завантаження або введення необхідних даних користувач може відобразити отриману мережу шляхом натиснення кнопки “Show network” (Рис. 4.8а). Знаходження енергоефективної структури мережі відбувається завдяки натисненню кнопки “Optimize coverage” з попередньою перевіркою коректності введених даних. Отриманий результат відображається у компоненті DataGridView з назвою “Optimization results”. Також після отримання результату результуюча мережа відображається у відповідній вкладці відображення результатів (Рис 4.8б).

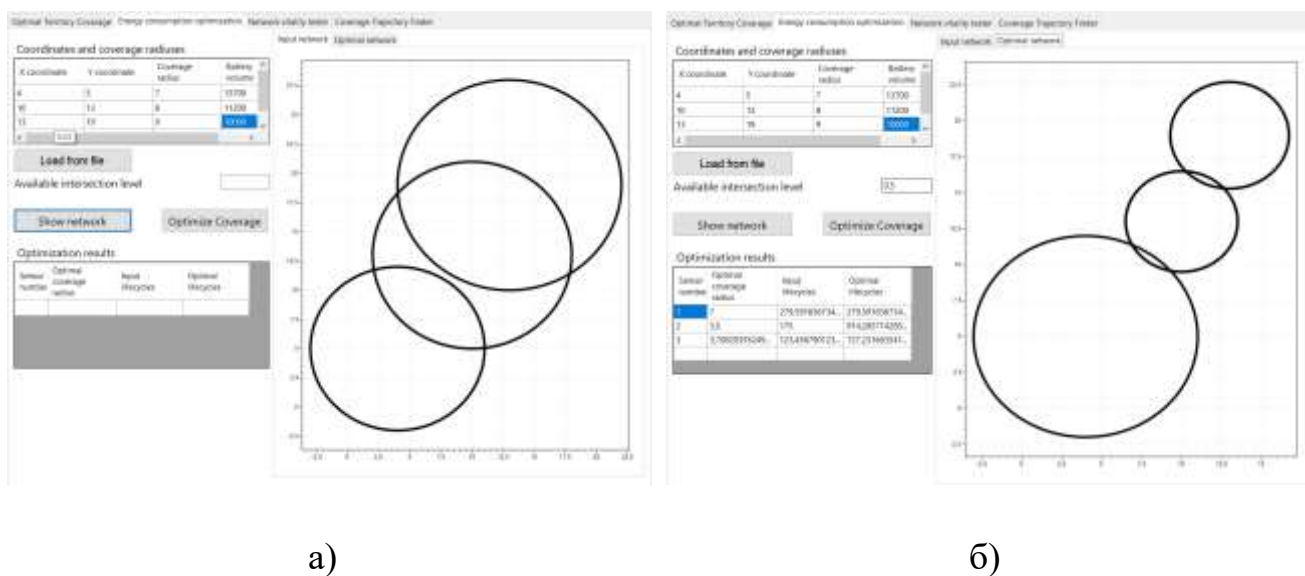


Рисунок 4.8 – Відображення вхідної а) та результуючої б) мереж

На рисунку 4.9 представлено користувацький інтерфейс вкладки Network vitality tester, що забезпечує доступ до класу SensorNetworkVitalityTester. Даний клас містить реалізацію методів оцінки живучості сенсорної мережі. Опис підходів та моделей оцінки живучості сенсорних мереж представлено у Розділі 3. Для оцінки живучості мережі користувачеві необхідно ввести координати, радіус покриття, оцінку важливості та пропускну спроможність датчику. Оцінка важливості кожного сенсору визначається експертами. Необхідною умовою є умова нормованості оцінок. У протилежному випадку оцінки нормуються у автоматичному режимі, що є особливістю розробленого програмного забезпечення. Для полегшення вводу вхідних даних користувачу доступна можливість

завантаження вхідних даних з відповідної електронної таблиці з розширенням .xls або .xlsx, що також є особливістю розробленого програмного забезпечення.

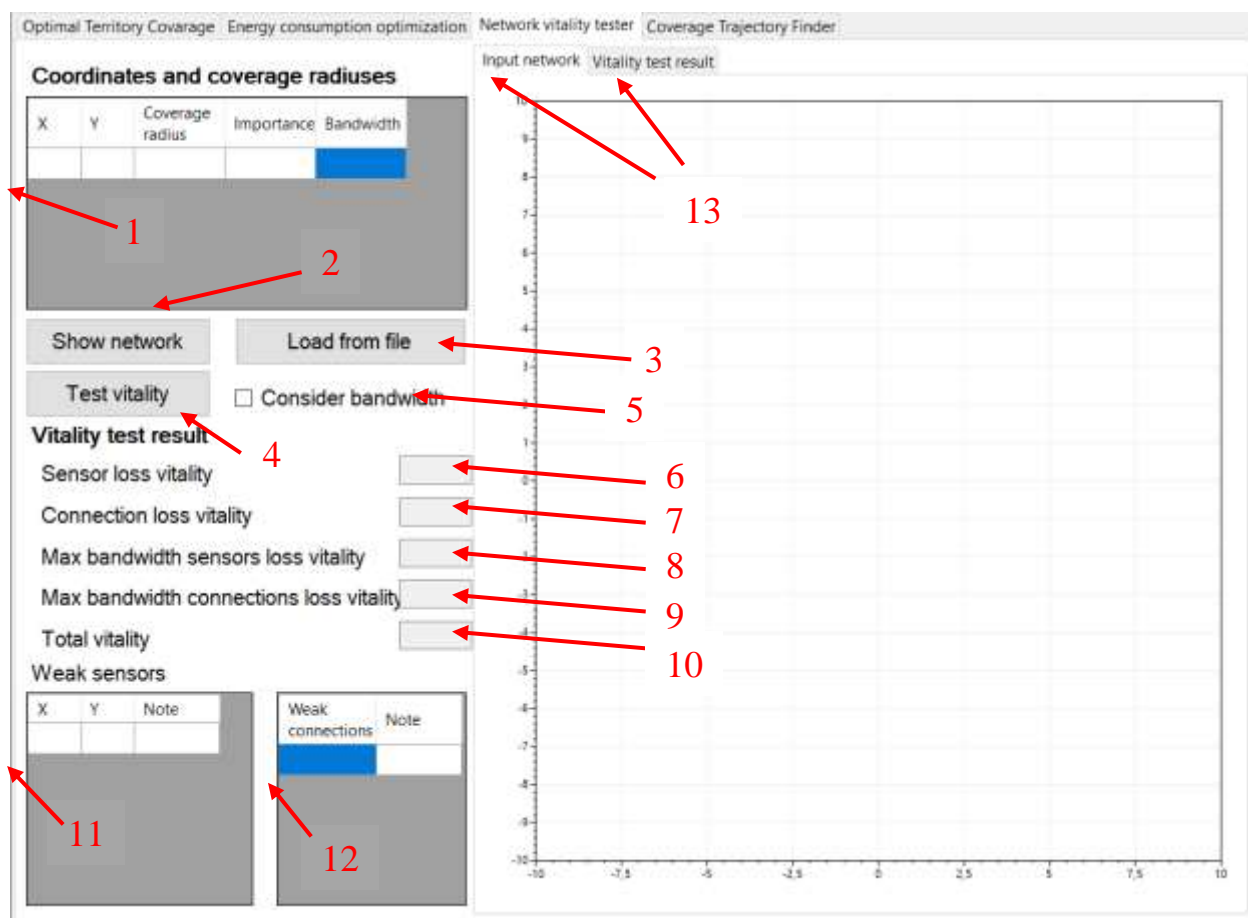


Рисунок 4.9 – Структура вкладки Network vitality tester: 1 – компонент вводу характеристик вхідної мережі; 2 – кнопка відображення структури мережі; 3 – кнопка завантаження вхідних даних з файлу; 4 – кнопка оцінки живучості мережі; 5 – перемикач врахування пропускнуої здатності мережі; 6 – оцінка живучості мережі у випадку втрати датчику; 7 – оцінка живучості мережі у випадку втрати зв'язку між датчиками; 8 – оцінка живучості мережі у випадку втрати датчику, що забезпечують максимальний потік даних; 9 – оцінка живучості мережі у випадку втрати зв'язків, що забезпечують максимальний потік даних; 10 – остаточна оцінка живучості; 11 – компонент виводу вразливих датчиків; 11 – компонент виводу вразливих зв'язків; 13 – вкладки відображення результату

Остаточне значення параметру живучості мережі формується як ймовірність одночасної появи незалежних подій. Даними подіями є неможливість передачі

даних у випадку втрати датчику, зв'язків між сенсорами, датчиків та зв'язків що забезпечуються максимальний потік даних в мережі. Результати оцінки відображаються як остаточне значення параметру живучості мережі та множини вразливих датчиків та зв'язків між датчиками. У відповідних множинах у примітці Note вказується вразливість елементів у оцінці живучості мережі з врахуванням пропускної спроможності елементів мережі. Вхідна мережі та результати оцінки живучості представлені на рисунку 4.10.

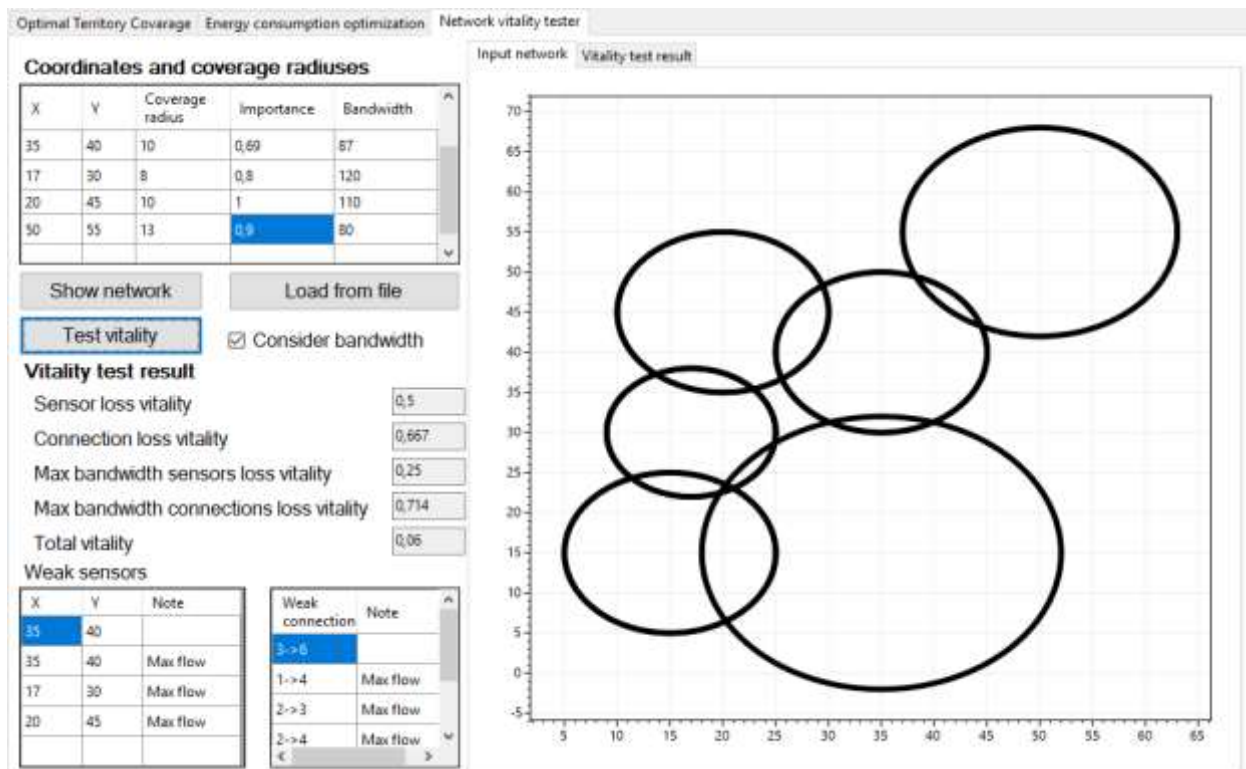


Рисунок 4.10 – Вхідна мережа та результати оцінки живучості

Користувацький інтерфейс, що забезпечує взаємодію користувача з методами класу TrajectoryBuilder, реалізовано у вкладці Coverage trajectory finder(Рис. 4.11). Для забезпечення зручності у вводі вхідних даних на даній вкладці також наявна можливість завантаження та автоматичного захоплення межі території. Режим захоплення межі території користувачем є також доступним. Підтримуються будь-які формати зображення. В свою чергу, автоматичне захоплення території можливе лише за наявності на рисунку території фону одного

кольору. Відображення завантаженого зображення та захоплення території реалізовано за допомогою компонента ImageBox.

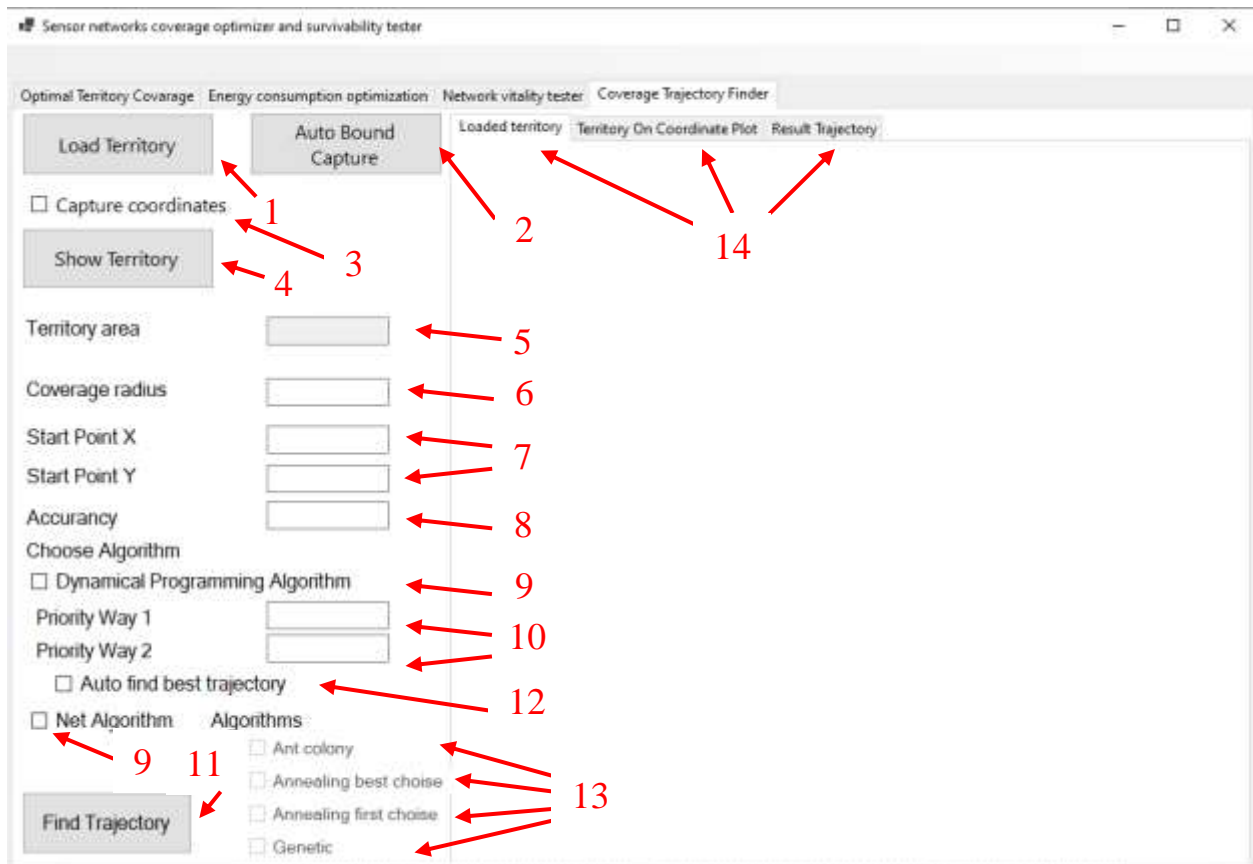


Рисунок 4.11 – Структура вкладки Coverage trajectory finder: 1 – кнопка завантаження території з файлу; 2 – кнопка автоматичного захоплення межі території; 3 – увімкнення ручного режиму захоплення межі території; 4 – кнопка відображення території; 5 – поле для відображення площі завантаженої території; 6 – поле введення радіусу покриття сенсору; 7 – поля вводу початкових координат датчику; 8 – поле вводу точності роботи алгоритмів (не обов'язкове); 9 – перемикач вибору алгоритму; 10 – поля вводу першого та другого пріоритетного напрямку; 11 – кнопка побудови траєкторії; 12 – увімкнення режиму автоматичного вибору оптимальної траєкторії; 13 – вибір алгоритму сіткового методу; 14 – вкладки відображення результату

Після захоплення меж території користувачу необхідно ввести початкові координати та радіус покриття датчику. Очевидно, що під час руху датчику можливе захоплення території за межами території, що розглядається. У такому

випадку введено поняття точності, що вимірюється як відношення площі території покритої за межами території до площі покриття датчику. Дана величина за замовчуванням рівна одиниці, що означає повне потрапляння радіусу покриття датчику у територію, що розглядається. Також користувач може самостійно ввести значення точності. Після вибору одного з алгоритмів, що описані у Розділі 2, та натисненні кнопки знаходження траєкторії отриманий результат буде представлено на окремій дочірній вкладці (Рис. 4.48). Вибір алгоритму є взаємовиключаючим, тобто обрати можна лише один алгоритм. Для використання алгоритму побудови траєкторія з використання принципу динамічного програмування користувачеві необхідно також ввести перший та другий пріоритетні напрямки. При увімкненні режиму автоматичного вибору оптимальної траєкторії траєкторія обирається при повному переборі всіх доступних комбінацій першого та другого пріоритетного напрямків. Критерієм вибору є загальна площа покритої сенсором території. При використанні сіткового методу користувачеві доступно чотири алгоритми для пошуку оптимальної траєкторії руху датчику при обльоті території: мурашиний алгоритм, алгоритм імітації відпалу з вибором найкращого варіанту, алгоритм імітації відпалу з вибором першого варіанту та генетичний алгоритм.

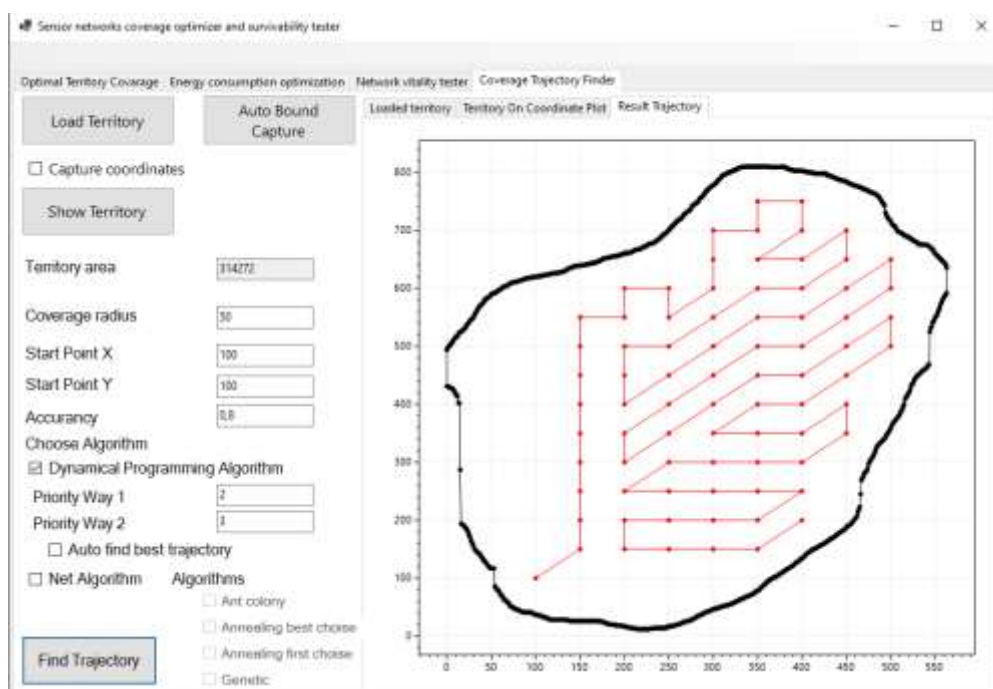
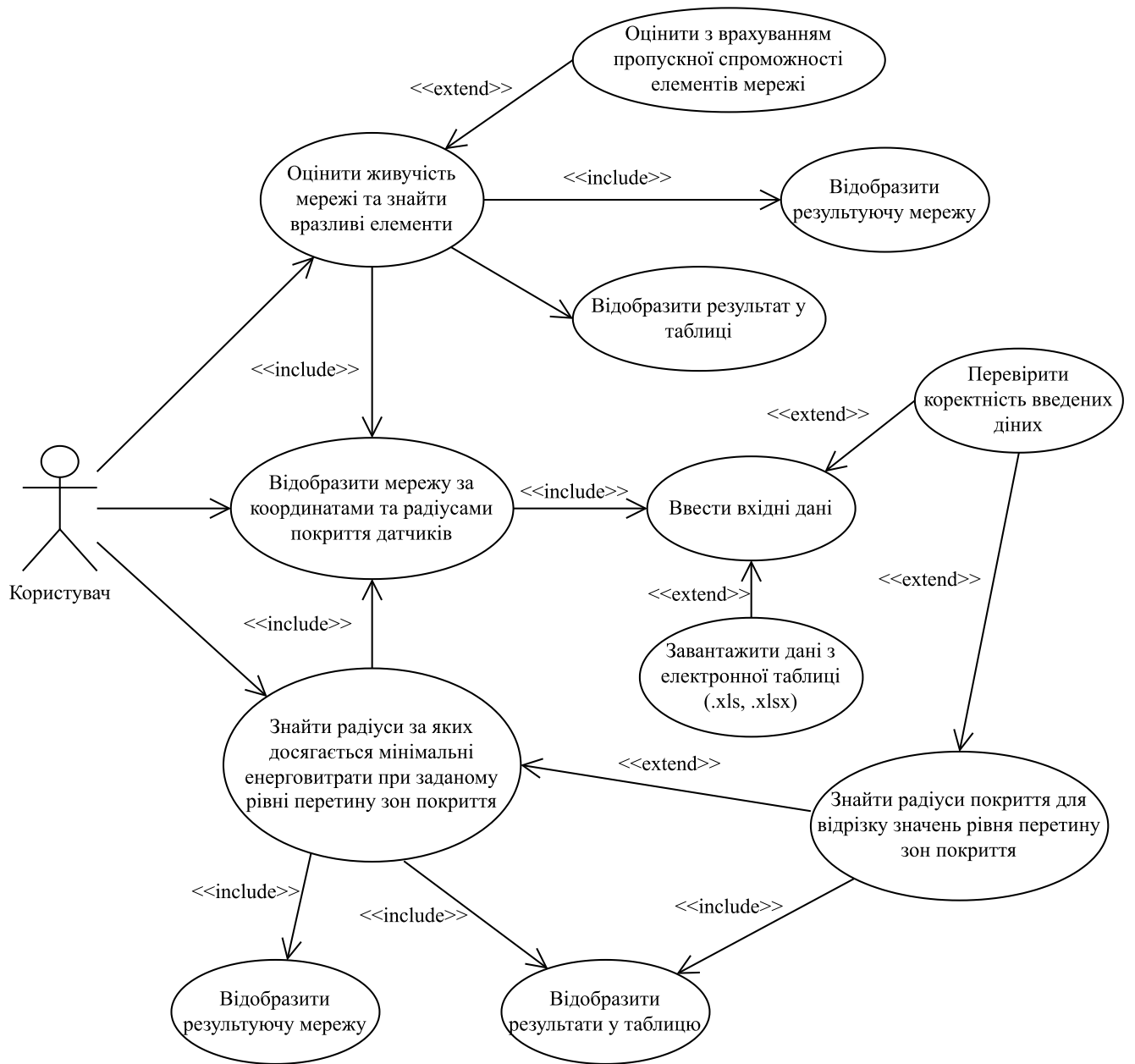
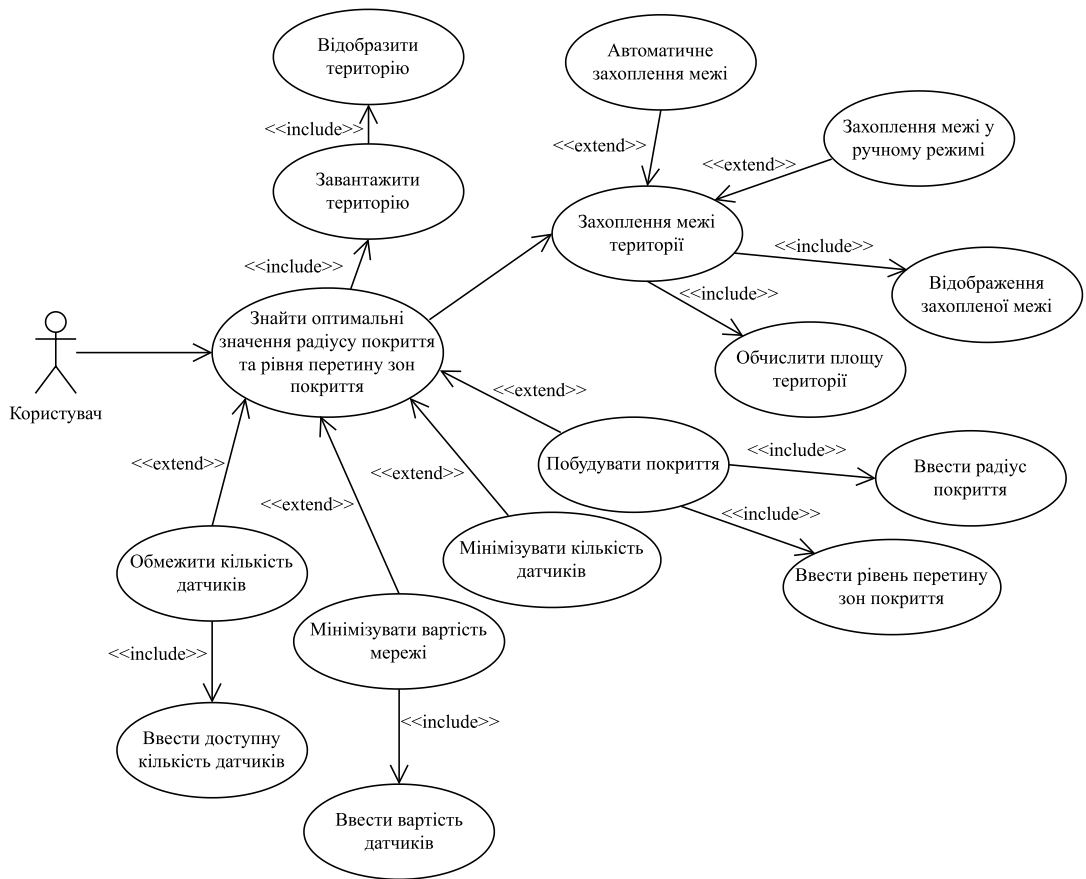


Рисунок 4.12 – Приклад побудови траєкторії

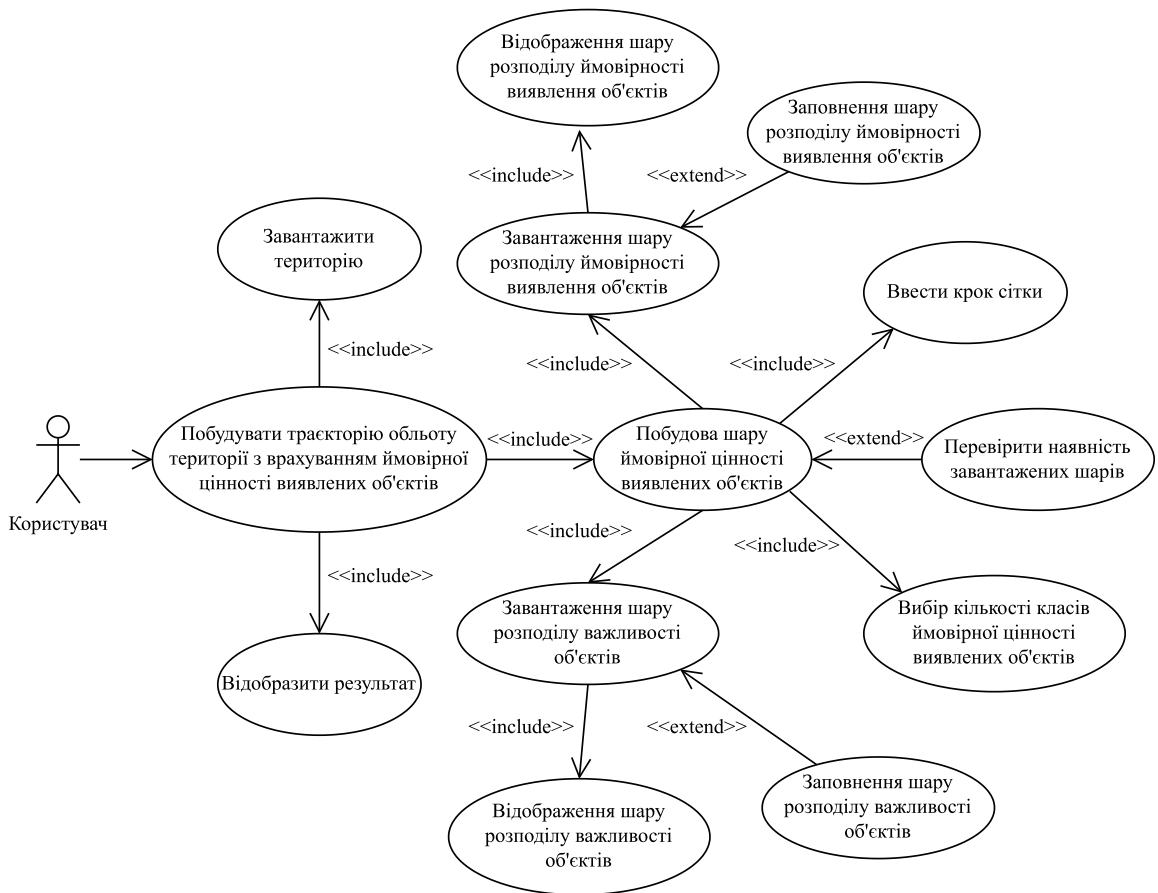
Варіанти використання розробленого програмного представимо у вигляді діаграм прецедентів (Рис. 4.13).



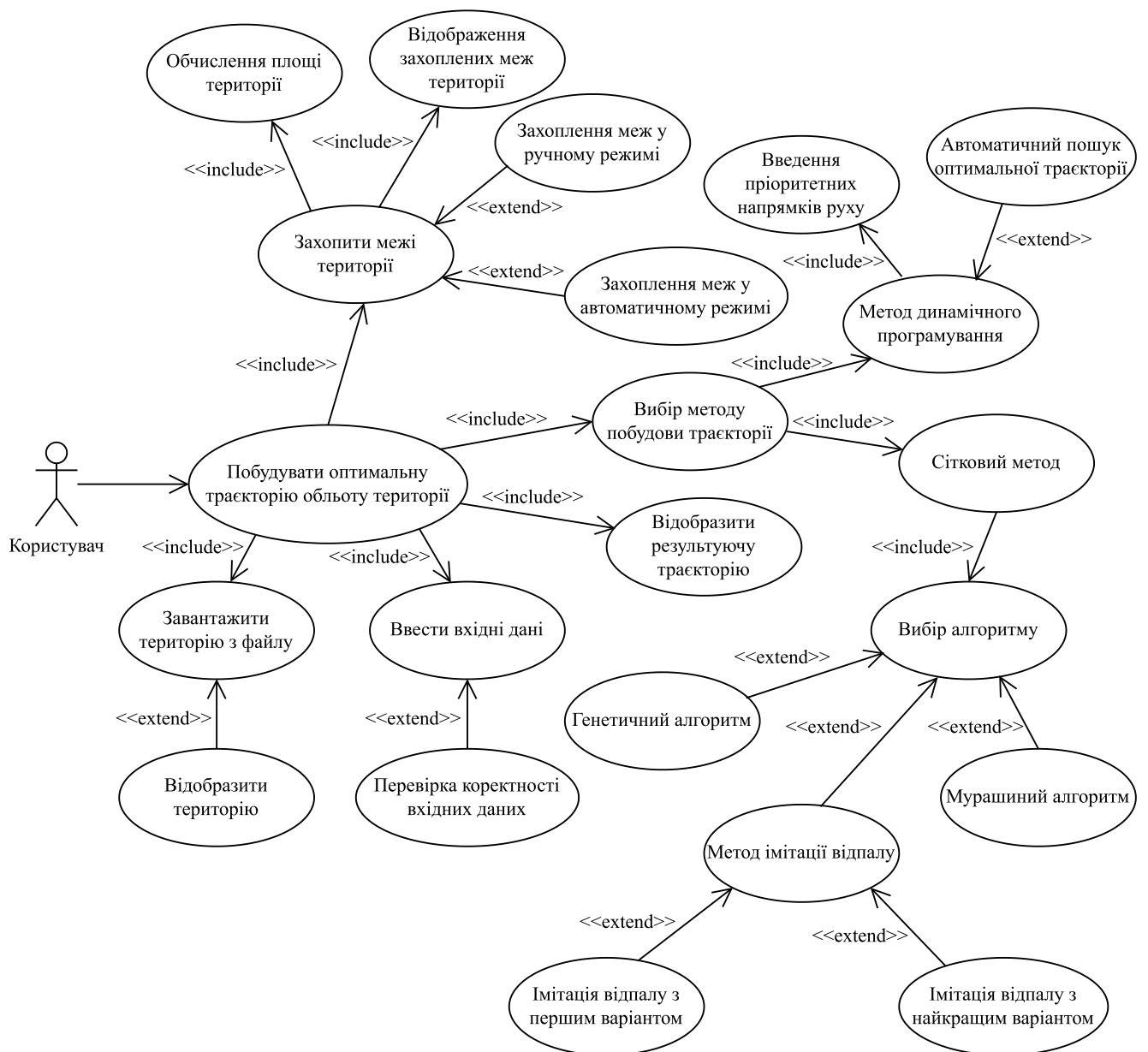
a)



б)



в)



г)

Рисунок 4.13 – Діаграми прецедентів а) Оцінки живучості мережі, відображення мережі, пошуку оптимальних радіусів покриття при заданому діаметрі перетину зон покриття; б) пошуку оптимальних пар радіусу покриття та діаметру перетину зон покриття при покритті території; в) побудови траєкторії руху датчику при обльоті території з врахуванням можливої цінності виявлених об’єктів; г) побудови оптимальної траєкторії при обльоті території

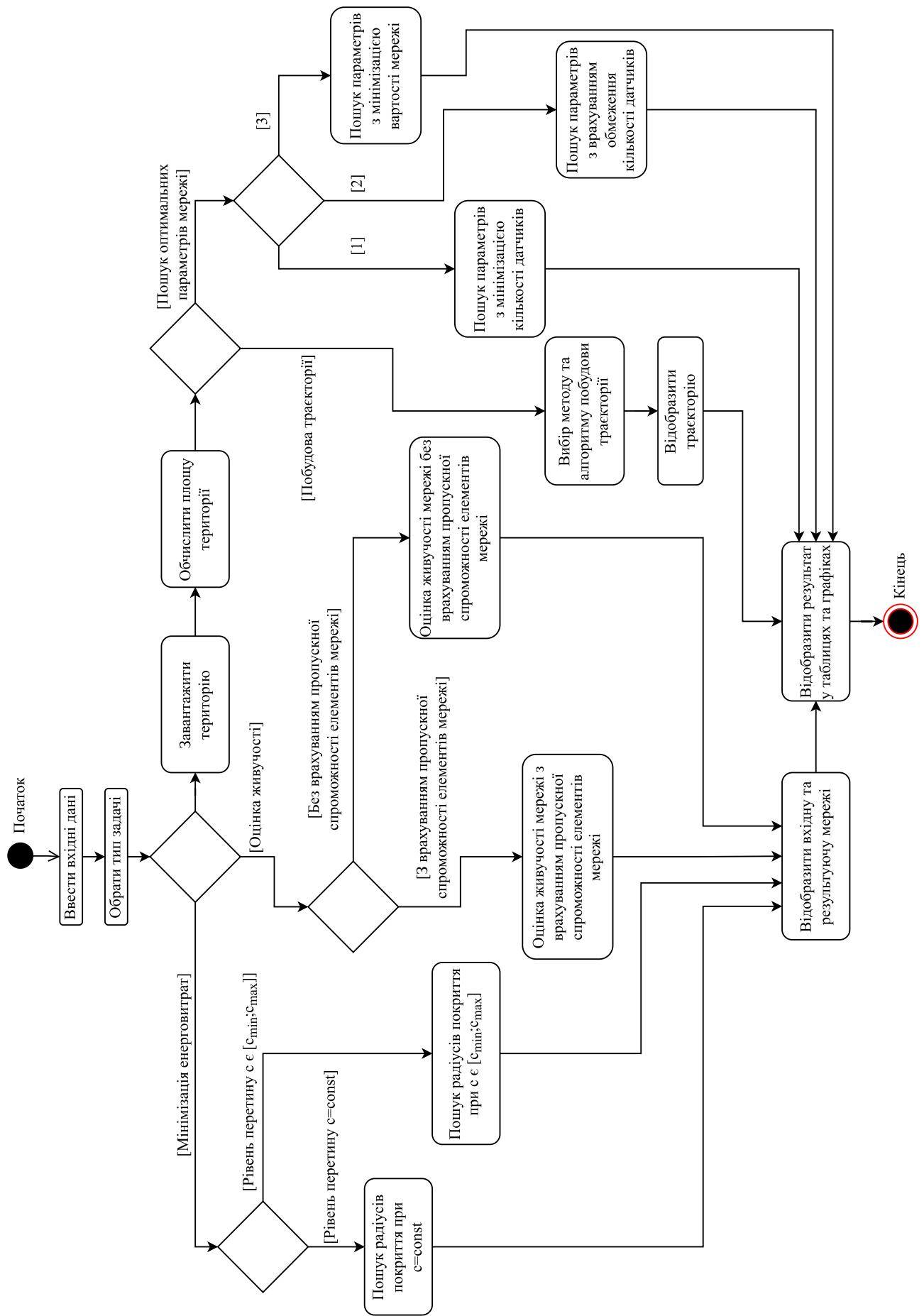


Рисунок 4.14 – Діаграма діяльності

На Рис. 4.14 представлено діаграму діяльності розробленого програмного комплексу. Умова 1 означає «Мінімізація кількості датчиків», умова 2 означає «Обмеження кількості датчиків», умова 3 означає «Мінімізація вартості мережі».

Взаємодію класів розробленого програмного комплексу представлено на Рис. 4.15.



Рисунок 4.15 – Діаграма послідовності

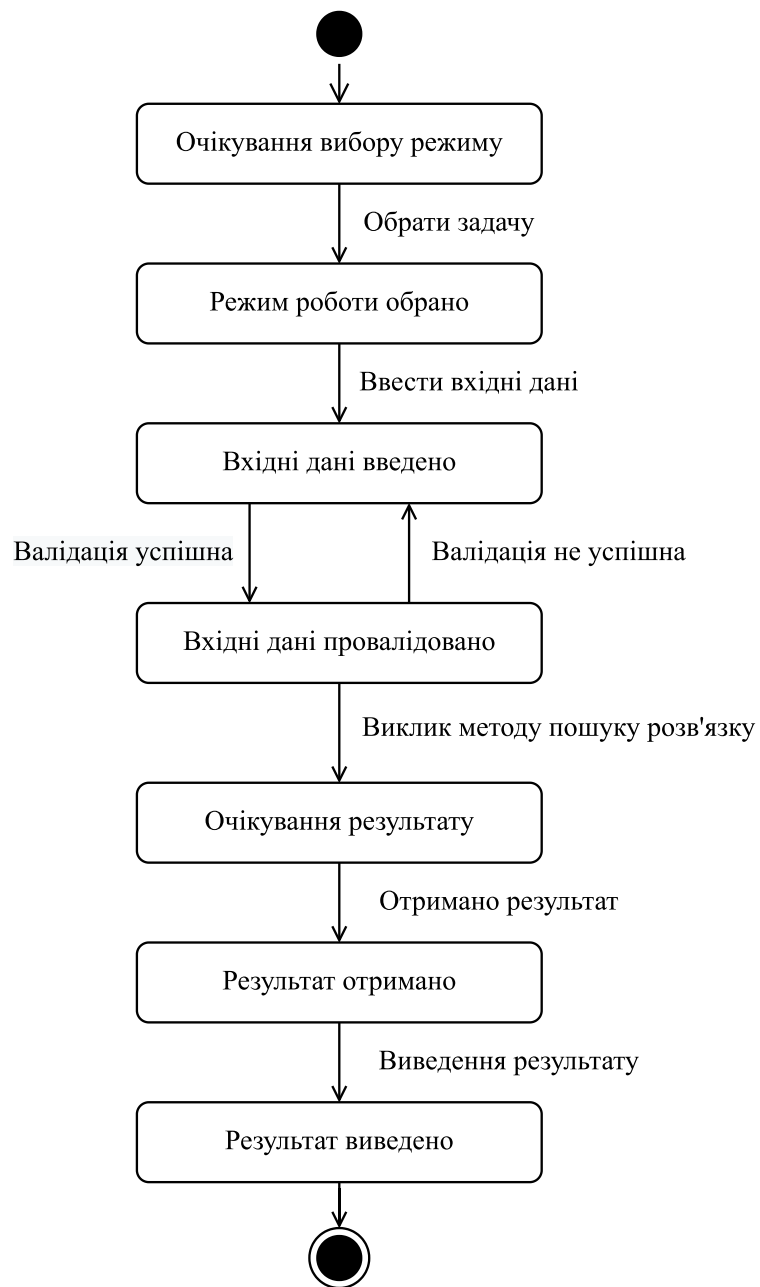


Рисунок 4.16 – Діаграма станів

На рис. 4.16 представлено зміну станів розробленого програмного забезпечення у часі.

4.3 Апробація методу програмованої оптимізації структури сенсорних мереж

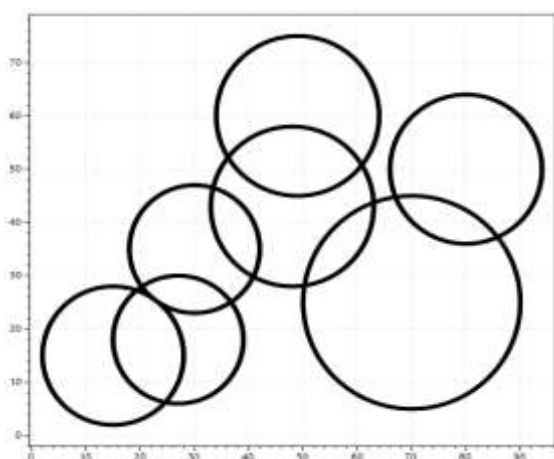
4.3.1 Оптимізація енерговитрат сенсорної мережі

Розглянемо застосування розробленого методу на прикладі сенсорної мережі, що складається з семи датчиків, характеристики яких представлено у таблиці 4.1.

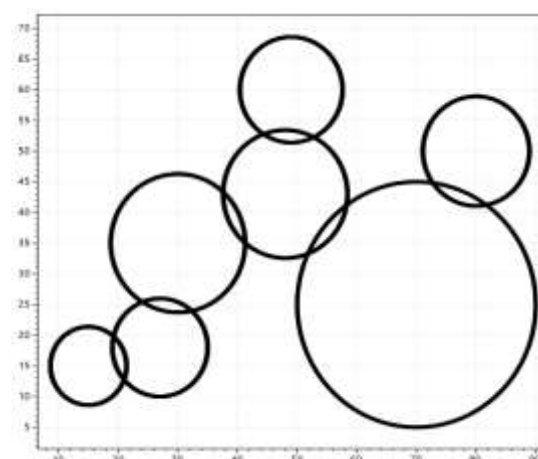
Таблиця 4.1 – Параметри вхідної мережі

x	y	Радіус покриття, м	Об'єм акумулятора, mAh
15	15	13	9800
27	18	12	10000
30	35	12	12500
48	43	15	15000
70	25	20	12000
49	60	15	15000
80	50	14	13000

З використанням запропонованого підходу знайдемо значення параметрів мережі, за яких досягається мінімальне значення енерговитрат при діаметрі перетину зон покриття $c = 2$ (Рис. 4.17).



а)



б)

Рисунок 4.17 – Вхідна а) та результуюча б) мережі

Відповідно до отриманих результатів, параметри результуючої таблиці можна представити у вигляді таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Параметри результуючої мережі

Координати датчиків	Радіус покриття, м	Енерговитрати, mAh	Початкове значення часу використання, год	Результуюча значення часу використання, год
(15;15)	6,37	40,69	57,98	240,83
(27;18)	7,99	63,84	69,44	156,62
(30;35)	11,27	127,06	86,80	98,37
(48;43)	10,42	108,68	66,66	138,01
(70;25)	20	400	30	30
(49;60)	8,60	74,03	66,66	202,62
(80;50)	8,92	79,67	66,32	163,17

Значення часу використання обчислювалося як відношення об'єму акумулятора до величини енерговитрат.

Для оцінки ефективності та аналізу запропонованого підходу обчислимо енергоспоживання кожного датчика залежно від діаметру перетину зон покриття (Рис. 4.18). Інтервал зміни діаметру перетину зон покриття від нуля до семи з кроком 0,5. Верхня межа досліджуваного інтервалу визначалася експериментально.

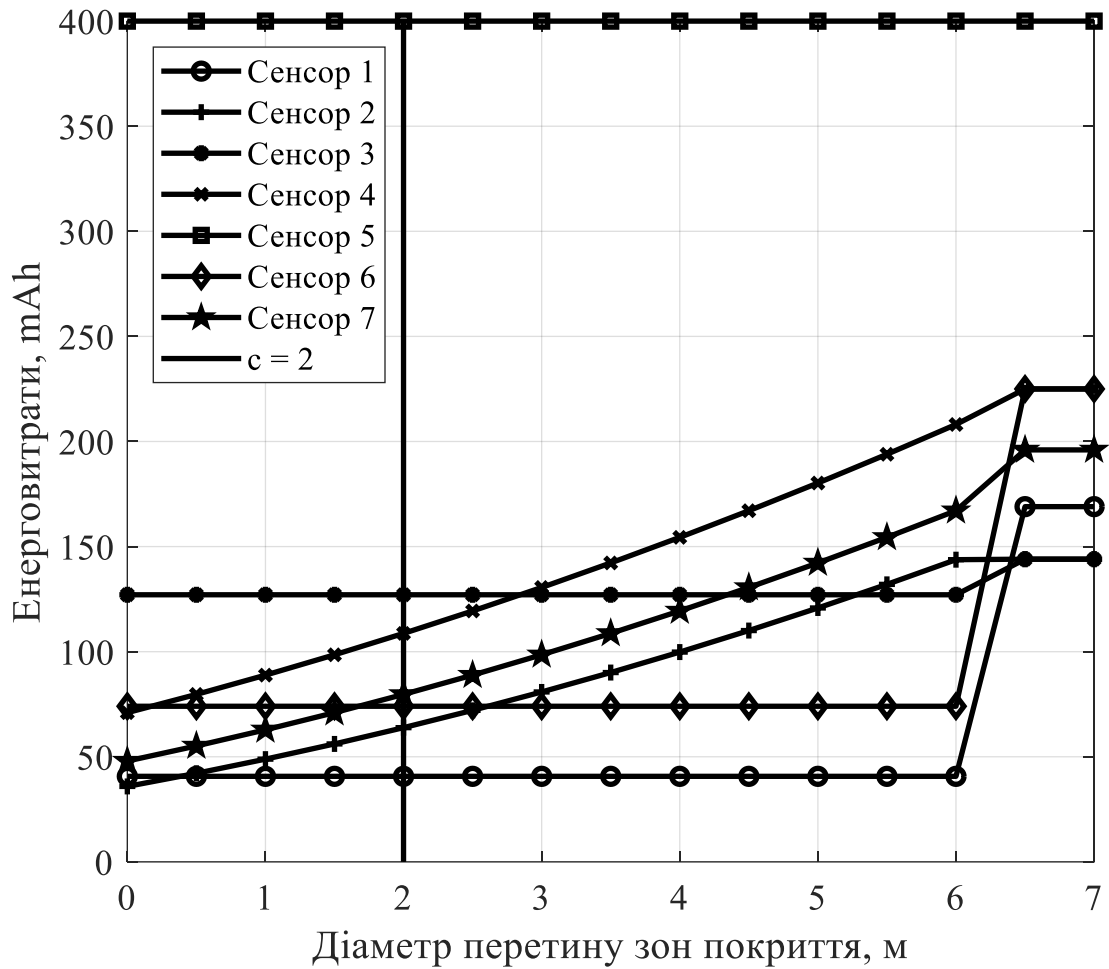


Рисунок 4.18 – Енерговитрати кожного датчика в залежності від діаметру перетину зон покриття

Також обчислимо час використання кожного датчика в залежності від значень діаметру перетину зон покриття (Рис. 4.19), аналогічних значень на рисунку 4.18.

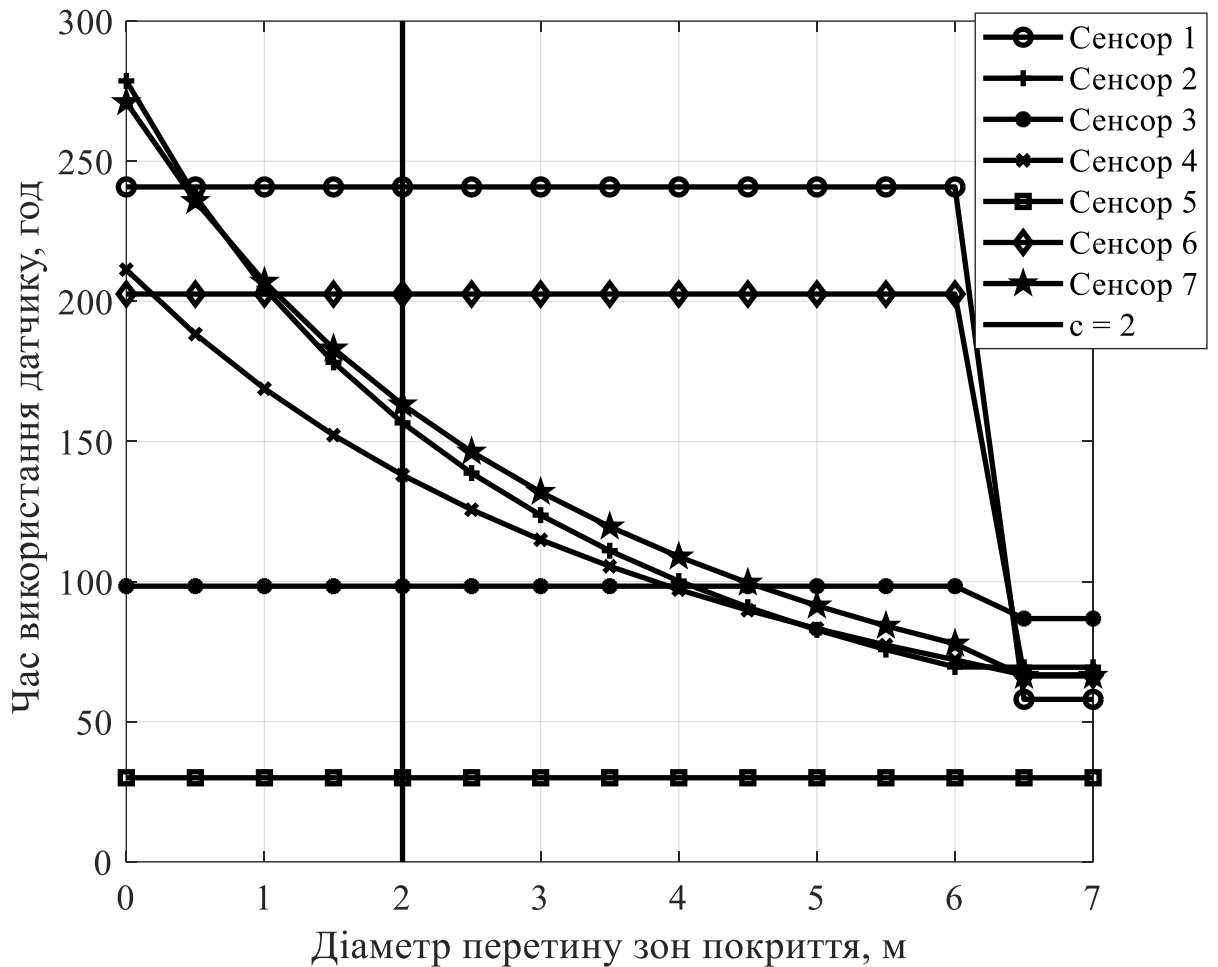


Рисунок 4.19 – Час використання датчиків в залежності від діаметру перетину зон покриття

Проаналізуємо отримані результати для конкретної мережі, тобто часткові результати. Оптимальні значення енерговитрат та часу використання сенсорів знаходяться на перетині кривих з прямою $c = 2$ (Рис. 4.18-4.19, Табл.4.3). В свою чергу, досягнення необхідного діаметру перетину зон покриття досягається шляхом регуляції радіусів покриття датчиків 2, 4 та 7 з координатами (27;18), (48;43) та (80;50) відповідно. Регулювання радіусів покриття інших датчиків не дозволяє досягнути необхідного діаметру перетину зон покриття всіма датчиками одночасно. Також варто відзначити, що зміна радіусів покриття та оптимізація енерговитрат для даної мережі досягається при значенні діаметру перетину зон покриття що є меншими за 6,5 метрів. При порівнянні зміни значень енерговитрат

для різних значень діаметру перетину зон покриття можна зробити висновок, що з використанням запропонованого підходу вдалося скоротити енерговитрати мережі мінімум на 2.08%. Також проаналізувавши отримані результати можна зробити висновок, що для будь-якої мережі при регулюванні діаметру перетину зон покриття існує зона насичення та зона оптимальності. У зоні насичення значення енерговитрат буде максимальним так як неможливо знайти комбінацію радіусів покриття для забезпечення умови перетину зон покриття відповідно до заданого діаметру перетину зон покриття. В свою чергу, у зоні оптимальності можливе знаходження такої комбінації радіусів покриття датчиків за яких енерговитрати будуть мінімальними для заданого діаметру перетину зон покриття. Для вхідної мережі із заданим діаметром перетину зон покриття знижено енерговитрати на 43.77%.

Ґрунтуючись на отриманих результатах можна зробити такі висновки:

1. Мінімальне значення енерговитрат досягається при відсутності перетину зон покриття;
2. Максимальне значення часу використання датчиків досягається при відсутності перетину зон покриття;
3. У випадку наявності верхньої та нижньої меж діаметру перетину зон покриття мінімальне значення енерговитрат та максимальне значення часу використання досягаються на нижній межі діаметру перетину зон покриття;
4. При фіксованому діаметрі перетину зон покриття оптимальні значення будуть лежати на перетині кривих енерговитрат та часу використання з прямою $c = c^*$;
5. Існує значення діаметру перетину зон покриття, починаючи з якого неможливо відшукати оптимальні значення радіусів покриття, тобто неможливо знайти розв'язок задачі при заданому діаметрі перетину зон покриття. Такі значення діаметру перетину зон покриття формують зону насичення. Також існує зона оптимальності, що представлена множиною значень діаметру перетину зон покриття за яких існує розв'язок даної задачі;

6. При знаходженні оптимальних радіусів покриття при заданому діаметрі перетину зон покриття радіуси покриття не всіх датчиків можуть змінюватися.

Розглянемо випадок двох датчиків з координатами (33;28), (50;28) та радіусами покриття 15 метрів. Мінімальні радіуси покриття рівні $r_1^{min} = 3$, $r_2^{min} = 2$. Відстань між датчиками складає $l = 17$ метрів. При діаметрі перетину зон покриття $c = 3$ згідно з формулою (2.11) оптимальні радіуси покриття повинні задовольняти умову:

$$r_1 + r_2 = l + c, \forall r_1 \in [r_1^{min}, r_1^{max}], \forall r_2 \in [r_2^{min}, r_2^{max}]. \quad (4.1)$$

У випадку двох датчиків функція енерговитрат буде функцією двох змінних $E(r_1, r_2)$, графіком якої є поверхня другого порядку. Зафіксувавши значення $r_1 = 5$ згідно формули (4.1) при значенні $l = 17$ та $c = 3$ отримаємо $r_2 = 15$. Використавши значення r_1 та r_2 обчислимо енерговитрати $E(r_1, r_2) = 250$. Побудуємо площину $E = 250$ та значення енерговитрат $E(r_1, r_2)$ для $r_1 \in [3, 15]$, $r_2 \in [2, 15]$ (Рис. 4.20).

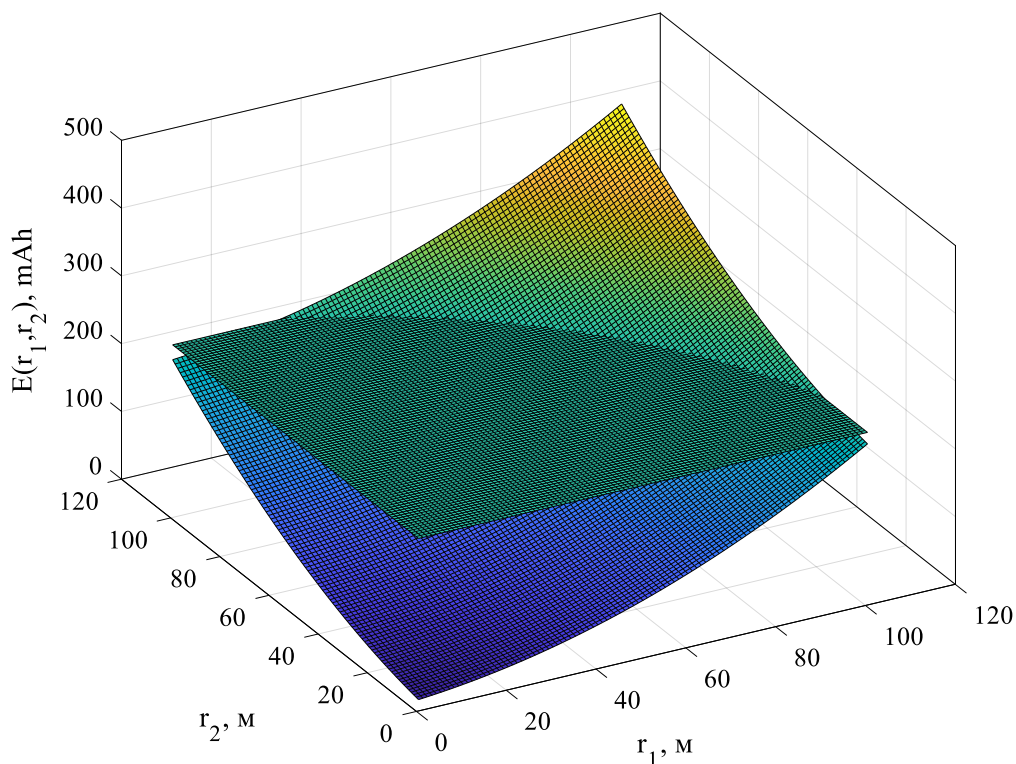


Рисунок 4.20 – Залежність енерговитрат сенсорної мережі від значення радіусів покриття $r_1 \in [3, 15]$, $r_2 \in [2, 15]$ та площина заданого рівня енерговитрат $E = 250$

Кожна точка кривої перетину даних поверхонь є пара точок (r_1, r_2) , значення яких є квадратами радіусів покриття (2.2) за яких досягається мінімальне значення енерговитрат мережі при діаметрі перетину зон покриття $c = 3$ (Рис. 4.21).

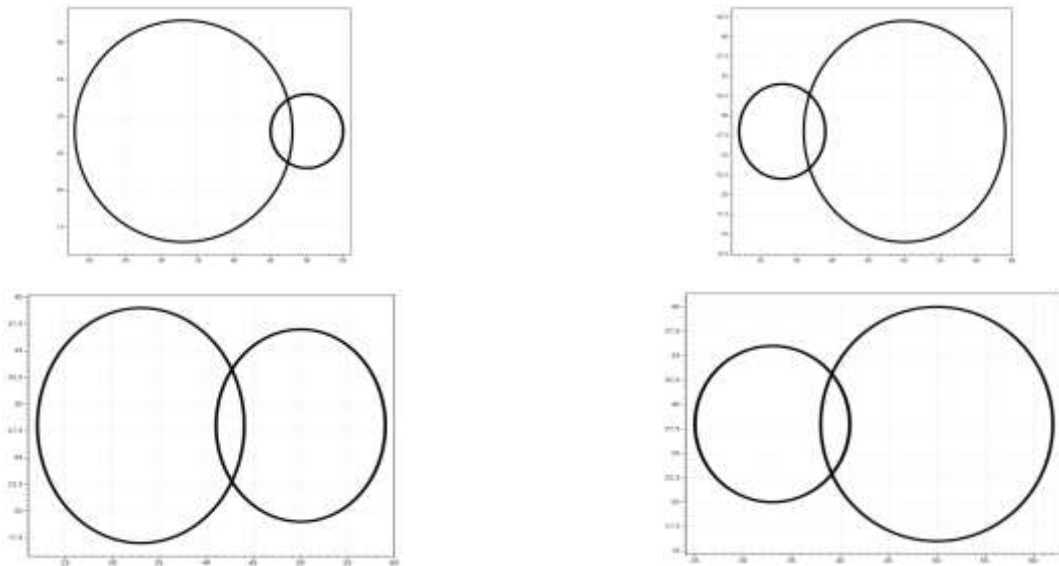


Рисунок 4.21 – Приклади радіусів покриття при діаметрі перетину зон покриття $c = 3$

У випадку n датчиків поверхня енерговитрат буде n -вимірною поверхнею у n -вимірному евклідовому просторі.

4.3.2 Максимізація покриття території з мінімізацією енерговитрат при заданому діаметрі перетину зон покриття та обмеженням кількості датчиків

Розглянемо територію площею 143731.5 м^2 (Рис. 4.22). Необхідно максимально покрити територію датчиками з мінімальними енерговитратами.

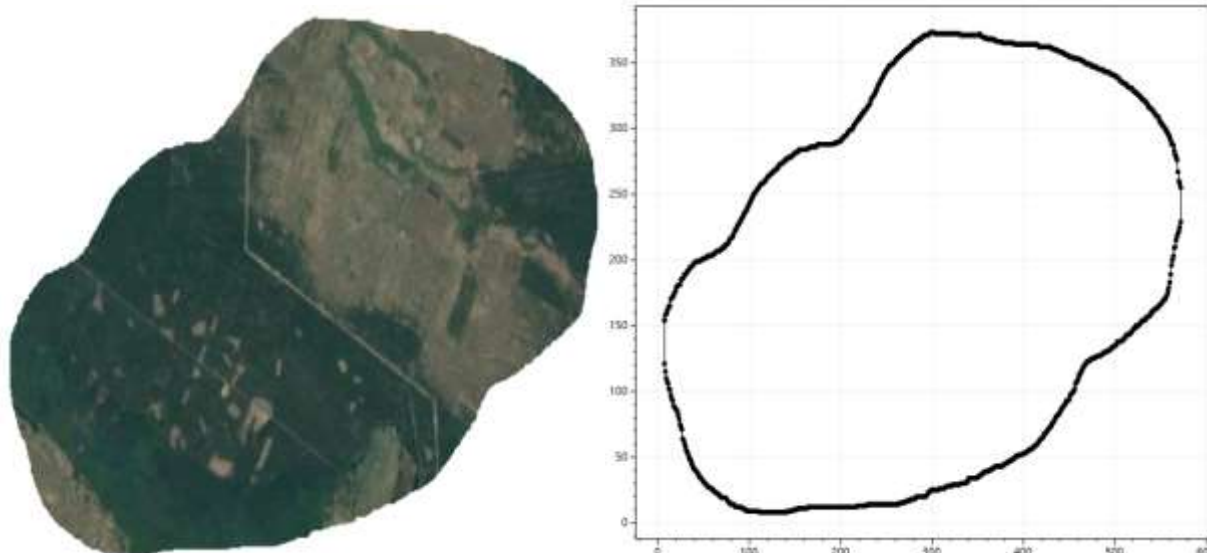


Рисунок 4.22 – Вхідна територія та її відображення на координатній площині

Вхідні параметри: максимальний радіус покриття рівний 50 м, мінімальний радіус покриття – 10 метрів, максимальний діаметр перетину зон покриття – 10 м, мінімальний діаметр перетину зон покриття рівний 5 м ($r_{max} = 50$, $r_{min} = 5$, $c_{max} = 10$, $c_{min} = 5$), вартість одного датчику – 70 умовних одиниць, доступна кількість датчиків – 30 штук, необхідно використати всі датчики. У вхідній мережі використовуються всі датчики з радіусом покриття $r = r_{max} = 50$.

Для знаходження комбінації радіусу покриття та діаметру перетину зон покриття, що забезпечують максимальне покриття при мінімальних енерговитратах використаємо TerritoryCoverageOptimizer. Отримані результати формують множини пар значень радіусів покриття, рівнів перетину зон покриття, кількості датчиків, витрат, що є оптимальними за Парето. З використанням отриманих значень досягається мінімум енерговитрат та вартості мережі при максимальному покритті мережі. Серед усіх значень необхідно обрати оптимальне. Представимо умову використання всіх доступних датчиків як пряму $y = 30$. Оптимальне значення радіусу покриття буде на перетині кривої оптимальних значень та прямої обмеження кількості датчиків $y = 30$ (Рис. 4.23).

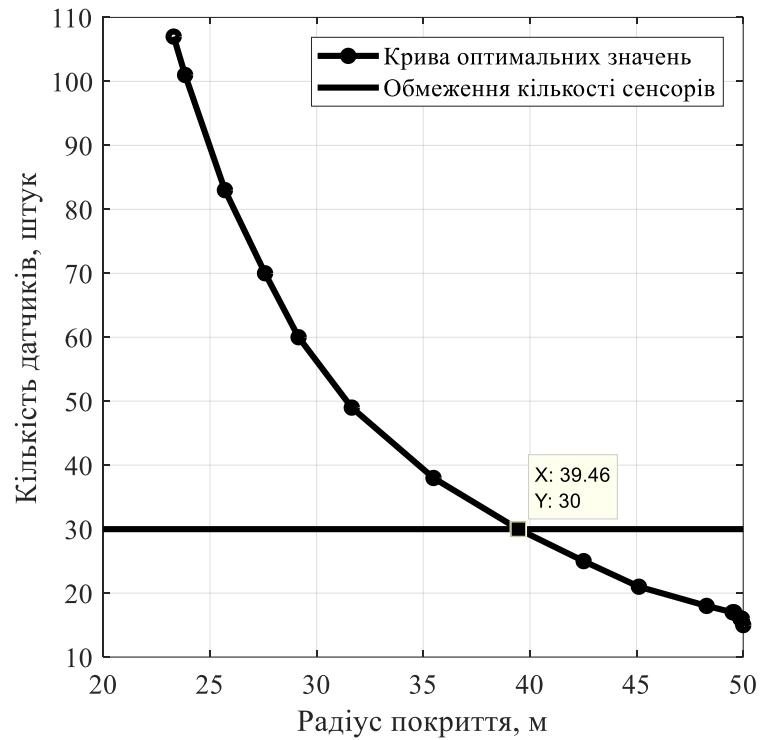


Рисунок 4.23 – Значення кількості необхідних датчиків в залежності від радіусу покриття

Згідно з отриманим результатом (Рис. 4.23) оптимальне значення радіусу покриття рівне 39.46 м. У випадку, якщо неможливо корегувати значення радіусу покриття з точністю у 10 см необхідно використовувати значення 40 м.

З множини пар радіусів покриття та рівнів перетину зон покриття знайдемо діаметр перетину зон покриття при значенні радіусу покриття 39.46 м (Рис. 4.24).

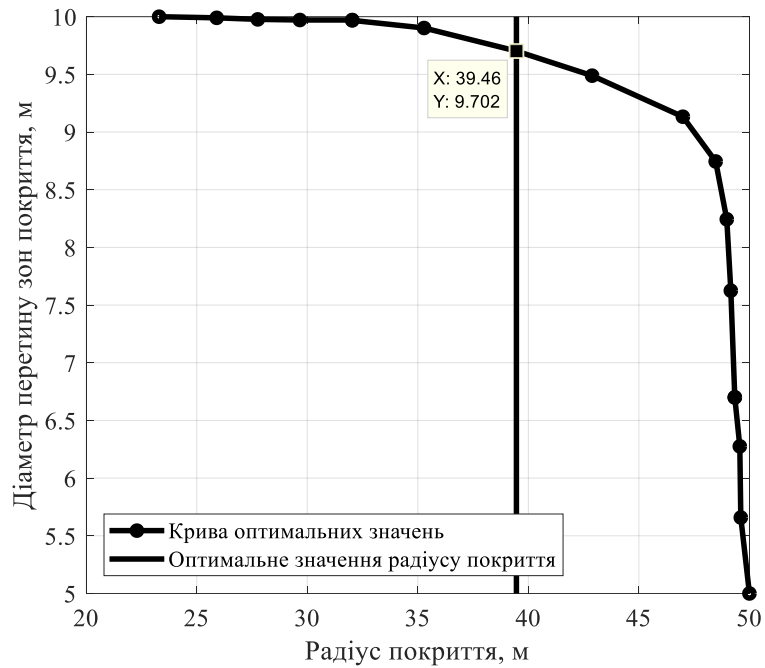


Рисунок 4.24 – Крива байдужості (за Парето) при якій досягається максимальне покриття території

Таким чином, оптимальне значення діаметру перетину зон покриття для радіусу покриття 39.46 м рівне 9.7 м (Рис. 4.24).

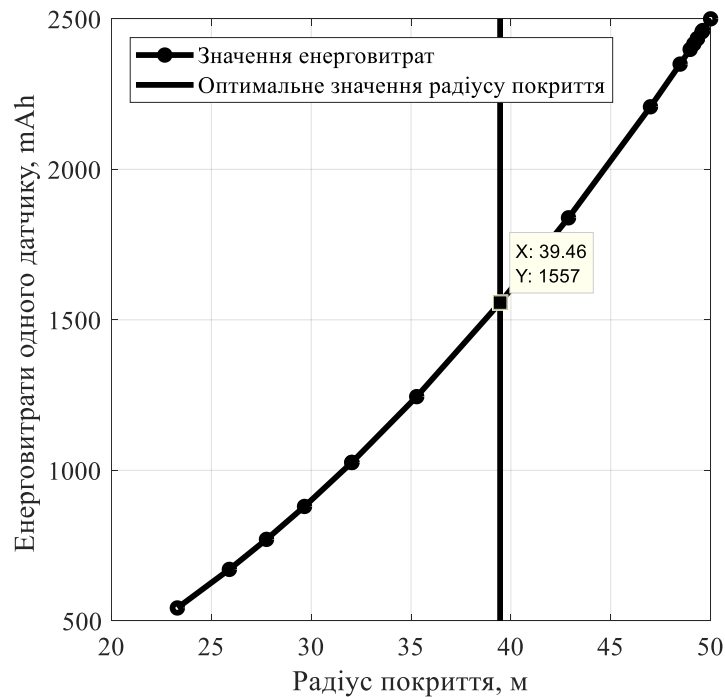


Рисунок 4.25 – Значення енерговитрат датчику в залежності від радіусу покриття

Згідно з графіком енерговитрат одного датчику (Рис. 2.25) оптимальне значення енерговитрат одного датчику для результуючої мережі становить 1557 mAh. Енерговитрати результуючої мережі згідно умови використання всіх датчиків рівне $1557 * 30 = 46710$ mAh. В свою чергу, значення енерговитрат для вхідної мережі рівні 2500 mAh та 75000 mAh.

Таким чином, оптимальні параметри мережі, що були знайдені з використанням розробленого методу підвищили енергоефективність вхідної мережі на 37.72%.

4.2.3 Побудова оптимальних траєкторій руху датчиків

Розглянемо задачу побудови оптимальної траєкторії руху датчику при забезпеченні максимального покриття. Нехай дано певну територію, що має площу 314272 м². Територія та її відображення на координатній площині представлено на рисунку 4.26.

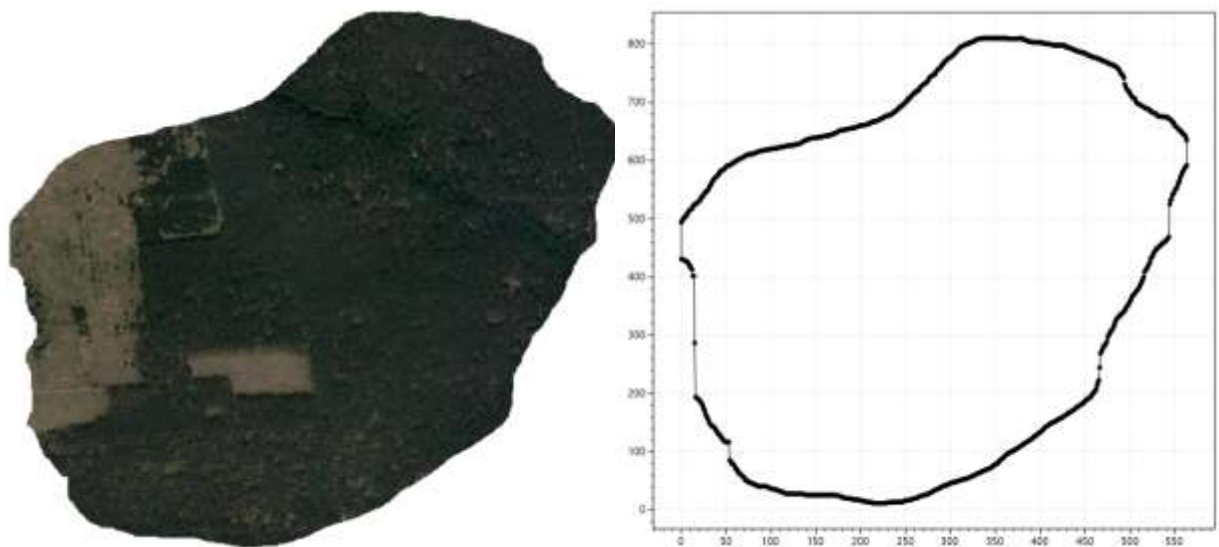


Рисунок 4.26 – Територія та її відображення на координатній площині

Використовуючи розроблене програмне забезпечення та TrajectoryBuilder побудуємо оптимальну траєкторію з використанням алгоритму динамічного програмування при різних значеннях параметрів першого та другого пріоритетного

напрямків та заданими вхідними параметрами стартової позиції датчику $(x_{start}, y_{start}) = (100, 100)$, радіусу покриття $r = 50$ м (Рис. 4.27).

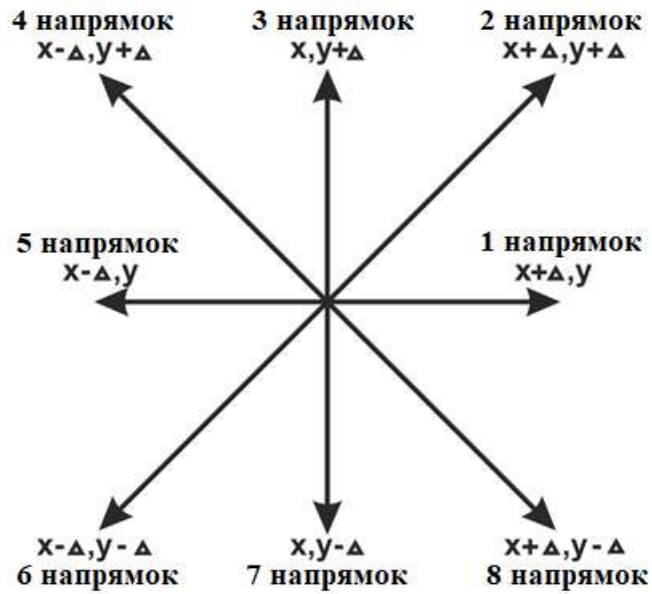
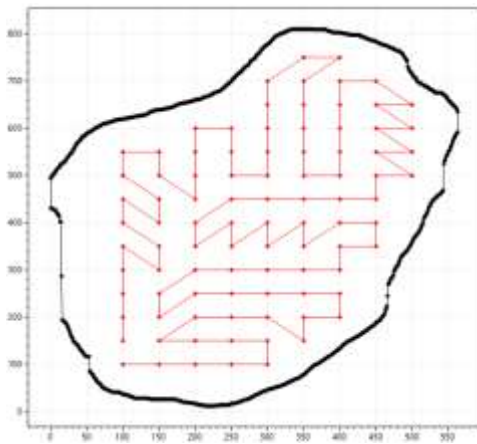
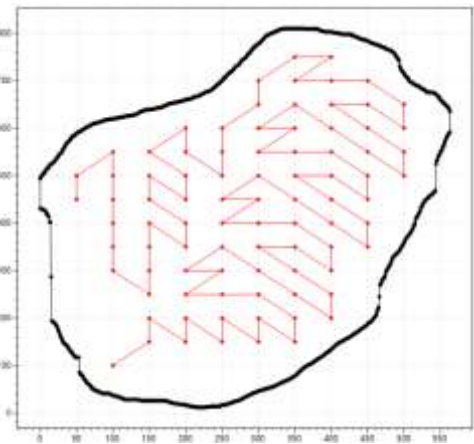


Рисунок 4.27 – Номери напрямків та значення зміни координат на величину одиничного кроку Δ

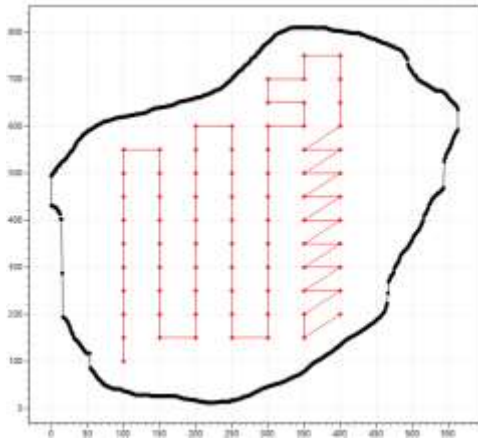
Деякі варіанти побудованих траєкторій представлено на рисунку 4.28.



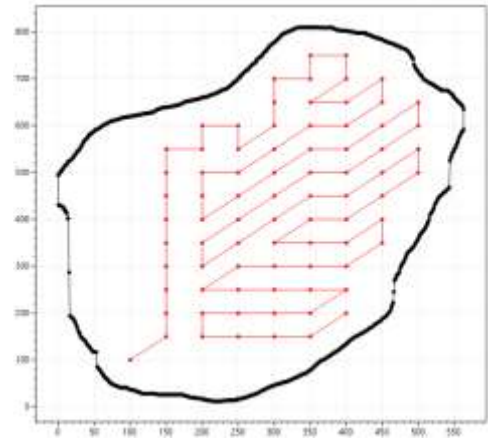
а) $pw_1 = 2, pw_2 = 8, S = 278241 \text{ м}^2$



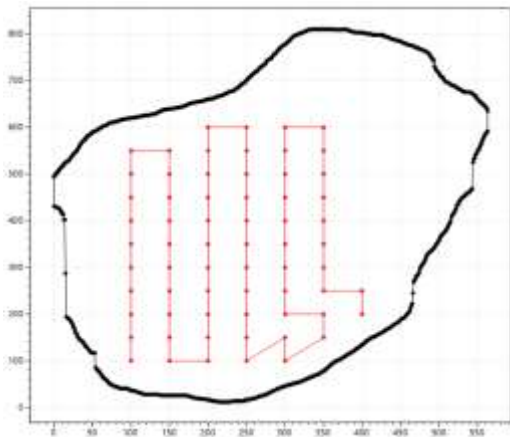
б) $pw_1 = 8, pw_2 = 2, S = 276237.9 \text{ м}^2$



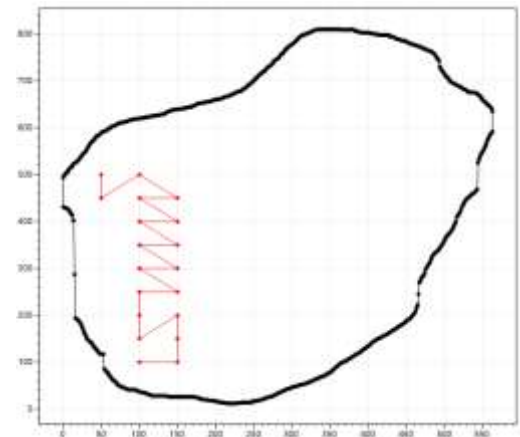
в) $pw_1 = 3, pw_2 = 4, S = 212631 \text{ м}^2$



г) $pw_1 = 2, pw_2 = 3, S = 241877.5 \text{ м}^2$



г) $pw_1 = 7, pw_2 = 3, S = 177882.5 \text{ м}^2$



д) $pw_1 = 2, pw_2 = 8, S = 72404.5 \text{ м}^2$

Рисунок 4.28 – Результуючі траєкторії та площі покритої території S з використанням підходу динамічного програмування при початкових значеннях стартової позиції $(x_{start}, y_{start}) = (100, 100)$, радіус покриття $r = 50$ та різних значеннях пріоритетних напрямків pw_1 та pw_2

Як видно з представлених траєкторій, що при деяких значеннях пріоритетних напрямків алгоритм зупиняється при досягненні датчиком точки, з якої неможливо здійснити наступний крок.

У випадку використання функціоналу автоматичного вибору найкращої траєкторії відбувається повний перебір всіх комбінацій першого pw_1 та другого pw_2 пріоритетного напрямків (Рис. 4.29). Загальна кількість траєкторій буде рівна $2 * C_8^2 = 2 * 28 = 56$ траєкторій.

Обчислимо площу покритої території при обльоті датчиком за траєкторією, що була побудована з використанням кожної пари комбінацій пріоритетних напрямків (Рис. 4.29, 4.30).

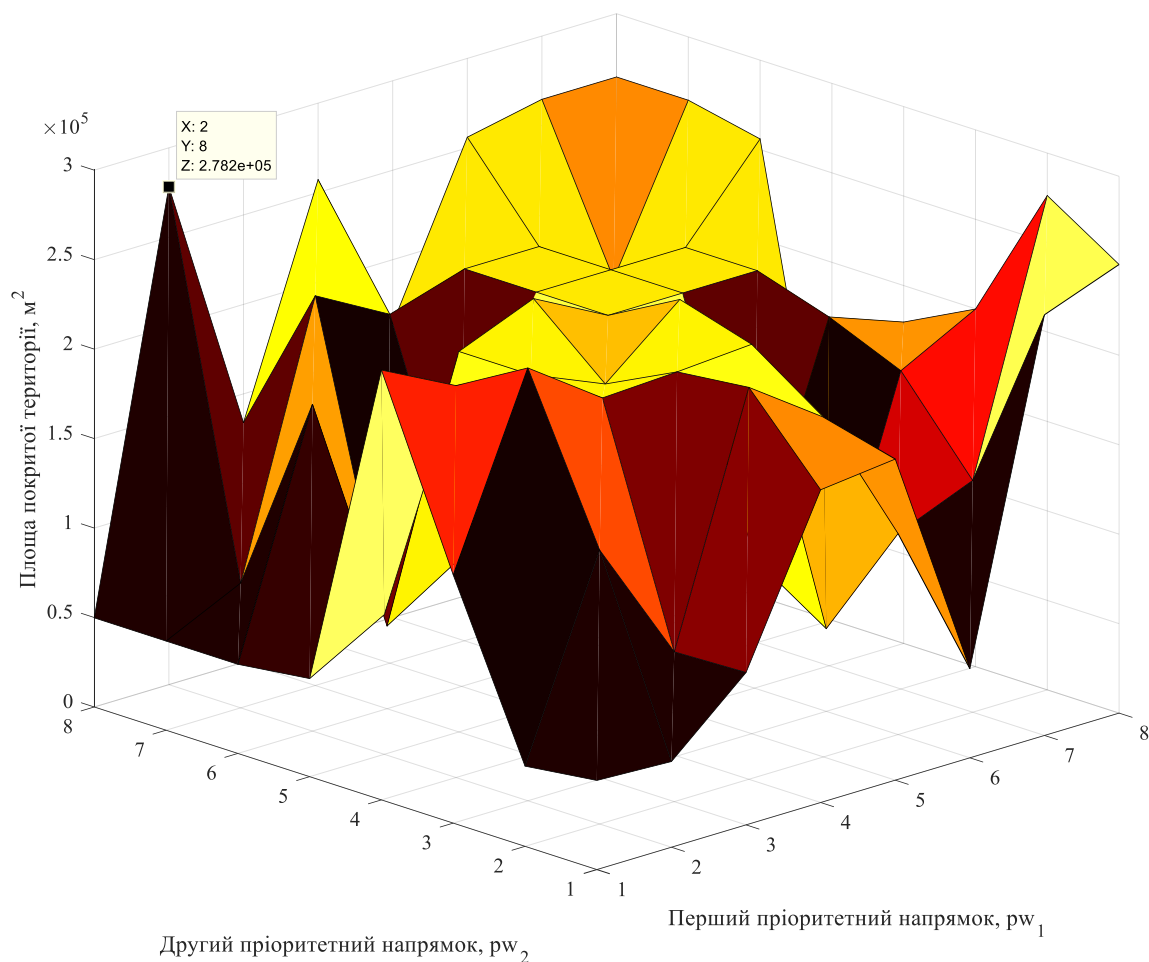


Рисунок 4.29 – Значення площі покритої території при обльоті території в залежності від заданих комбінацій пріоритетних напрямків руху датчику в тривимірному вигляді

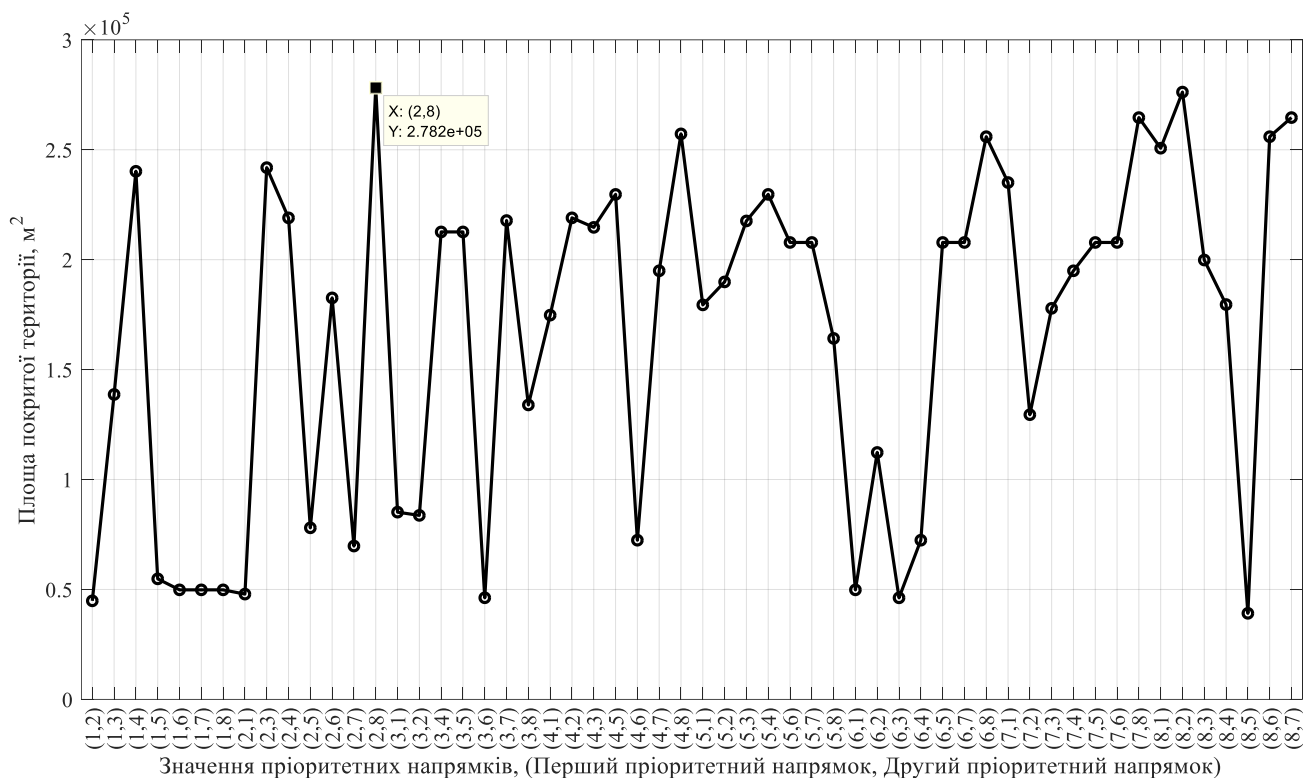
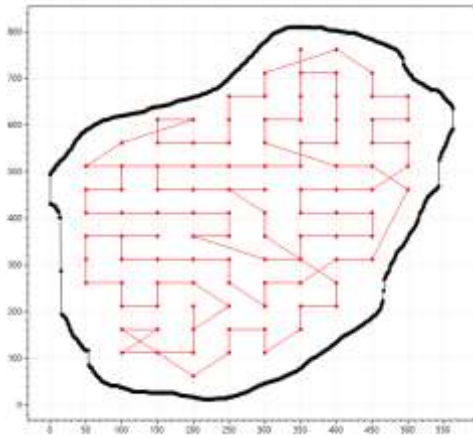


Рисунок 4.30 – Значення площі покритої території при обльоті території в залежності від заданих комбінацій пріоритетних напрямків руху датчику у вигляді лінійної розгортки

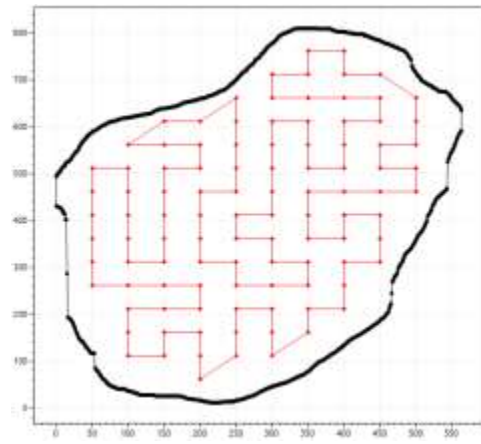
Згідно з отриманими результатами, площа максимального покриття рівна 278241 м², що досягається при значенні першого пріоритетного напрямку рівного $r_{w_1} = 2$ та другого пріоритетного напрямку рівного $r_{w_8} = 8$ (Рис. 4.28а).

Таким чином можна зробити висновок, що автоматичний вибір пріоритетних напрямків дозволив побудувати траєкторію, що максимально покриває задану територію.

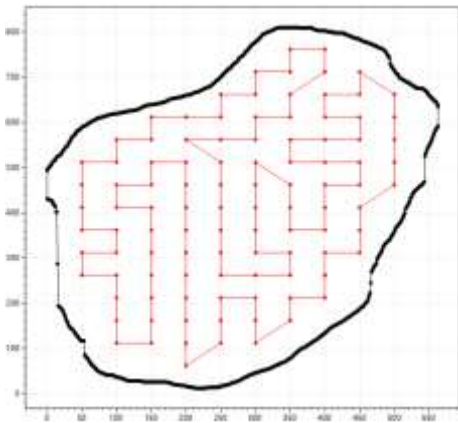
Побудуємо для заданої території траєкторії обльоту з використанням сіткового методу. Початкові параметри: стартова позиція датчику $(x_{start}, y_{start}) = (100, 100)$, радіус покриття $r = 50$ м. Отримаємо такі траєкторії (Рис. 4.31).



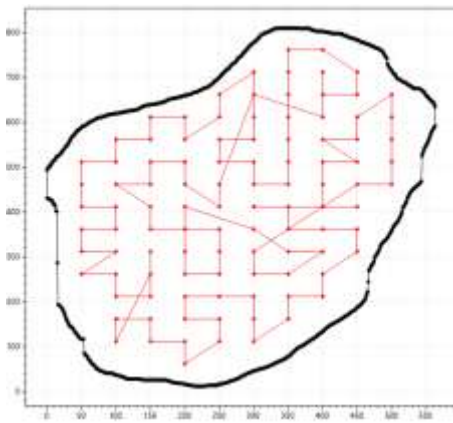
а) мурашиний алгоритм: довжина траєкторії – 6494.27 м.



б) алгоритм імітації відпалу з вибором найкращого варіанту: довжина траєкторії – 5255 м.



в) алгоритм імітації відпалу з вибором першого варіанту: довжина траєкторії – 5297 м.



г) генетичний алгоритм: довжина траєкторії – 6269.25 м.

Рисунок 2.31 – Результуючі траєкторії та довжини траєкторії з використанням різних алгоритмів сіткового методу

Проаналізувавши отримані результати можна зробити висновок, що мінімальні енерговитрати досягаються при обльоті території за траєкторією, що побудована з використанням алгоритму імітації відпалу з вибором найкращого варіанту сіткового методу (Рис. 4.32).

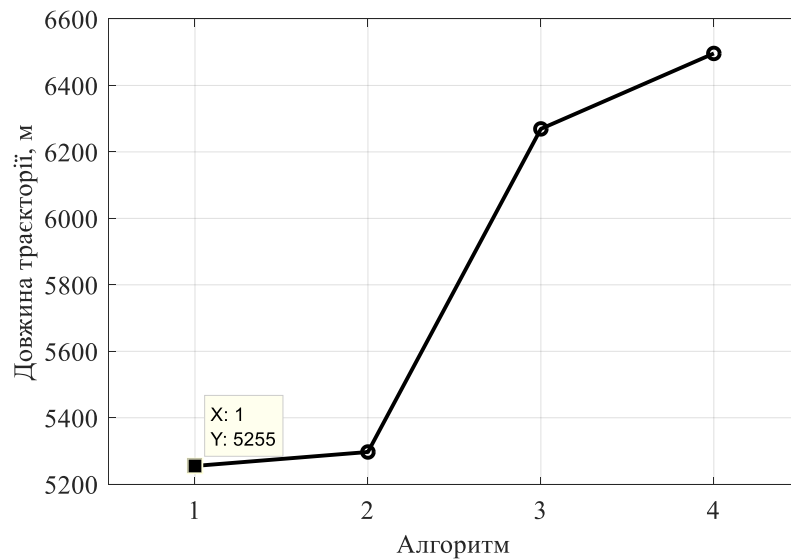
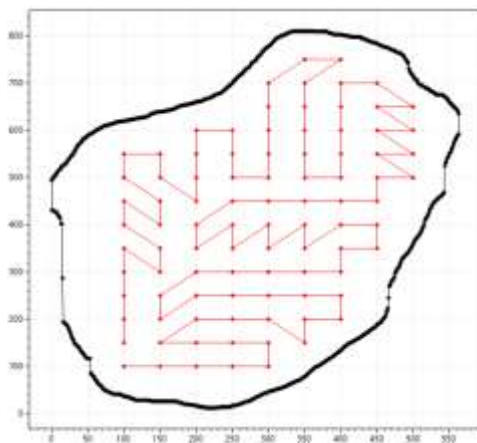
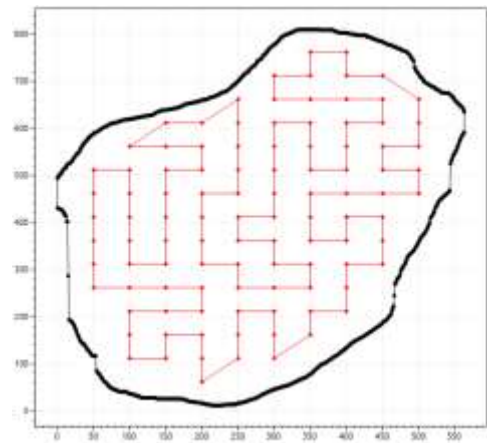


Рисунок 4.32 – Довжина траєкторії в залежності від алгоритму: 1 – Алгоритм імітації відпалу з вибором найкращого варіанту; 2 – Алгоритм імітації відпалу з вибором першого варіанту; 3 – Мурашиний алгоритм; 4 – Генетичний алгоритм

Довжина оптимальної траєкторії з використанням методу динамічного програмування при параметрах пріоритетних напрямків $pw_1 = 2$ та $pw_1 = 8$ рівна 5564.82 м (Рис. 2.33а), а з використанням сіткового методу – 5255 м (Рис. 2.33б).



а)



б)

Рисунок 4.33 – Оптимальна траєкторія з використанням а) методу динамічного програмування; б) сіткового алгоритму

Таким чином, можна зробити висновок що розроблені методи забезпечують побудову енергоефективних траєкторій. У випадку території, що розглядалася,

значення енергоефективності траєкторії, що побудована з використанням сіткового методу, краща на 4.94% ніж енергоефективність траєкторії, побудованої з використанням методу динамічного програмування.

4.3.4 Побудова оптимальної траєкторії руху датчиків з урахуванням важливості ділянок території та ймовірності виявлення об'єктів

Розглянемо дано територію, яку необхідно покрити, тобто побудувати траєкторію руху для датчику (Рис. 4.34).



Рисунок 4.34 – Вхідна територія

Також дано експертний розподіл території на області за важливістю та ймовірністю виявлення об'єктів (Рис. 4.35).

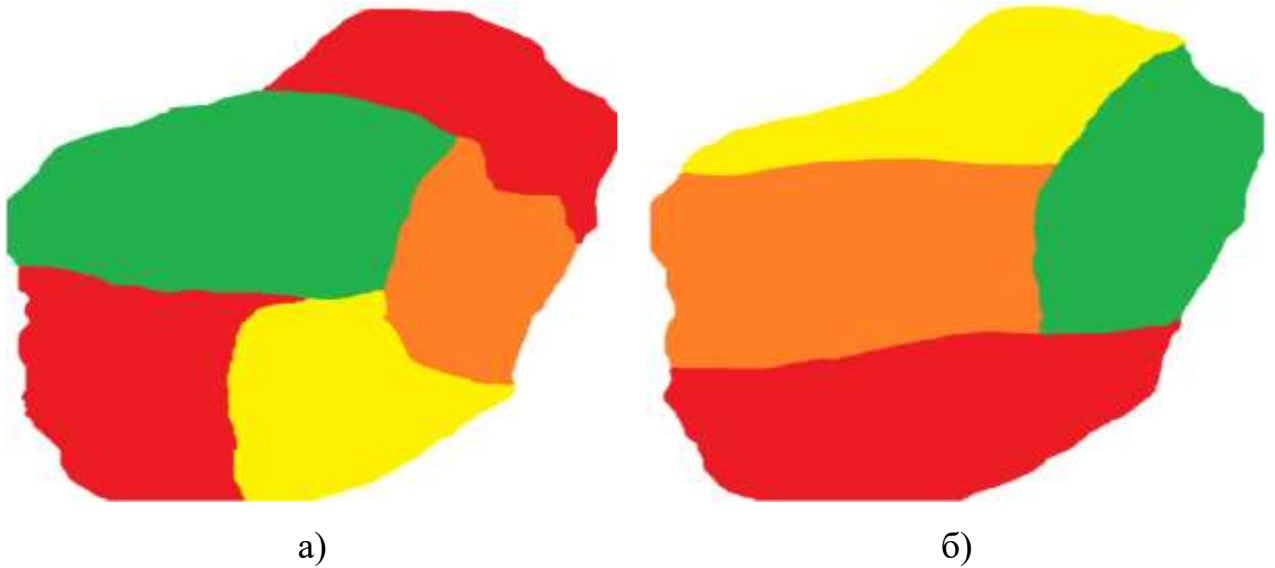


Рисунок 4.35 – Експертний розподіл території: а) За важливістю областей;
б) За ймовірністю виявлення об’єктів

Спочатку окремо побудуємо траєкторії з врахуванням лише важливості областей та лише з ймовірністю виявлення об’єктів (Рис. 4.36, 4.37). При побудові траєкторії використано крок у 50 пікселів.



Рисунок 4.36 – Побудова траєкторії з врахуванням лише важливості областей:
а) Вузли траєкторії після процедури заміни вузлів; б) Результуюча траєкторія

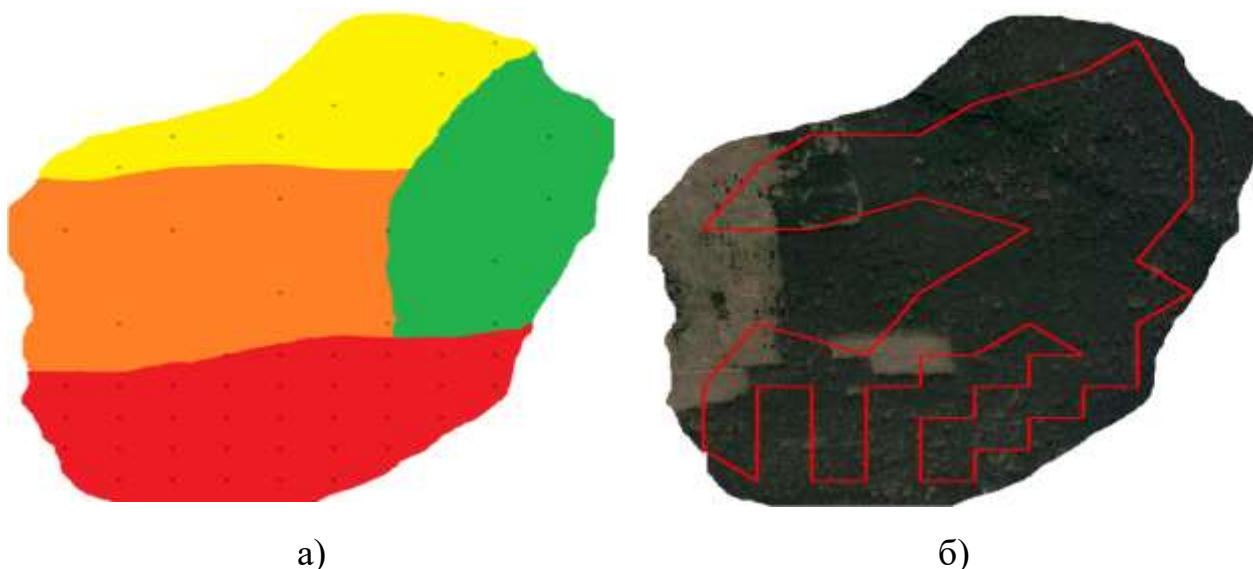


Рисунок 4.37 – Побудова траєкторії з врахуванням лише ймовірності виявлення об’єктів у областях: а) Вузли траєкторії після процедури заміни вузлів; б) Результуюча траєкторія

Після побудови шару можливої цінності виявлених об’єктів та заміни вузлів результуюча траєкторія руху сенсору з врахуванням можливої цінності виявлених об’єктів(важливості областей та ймовірності виявлення об’єктів) матиме вигляд (Рис. 4.386):

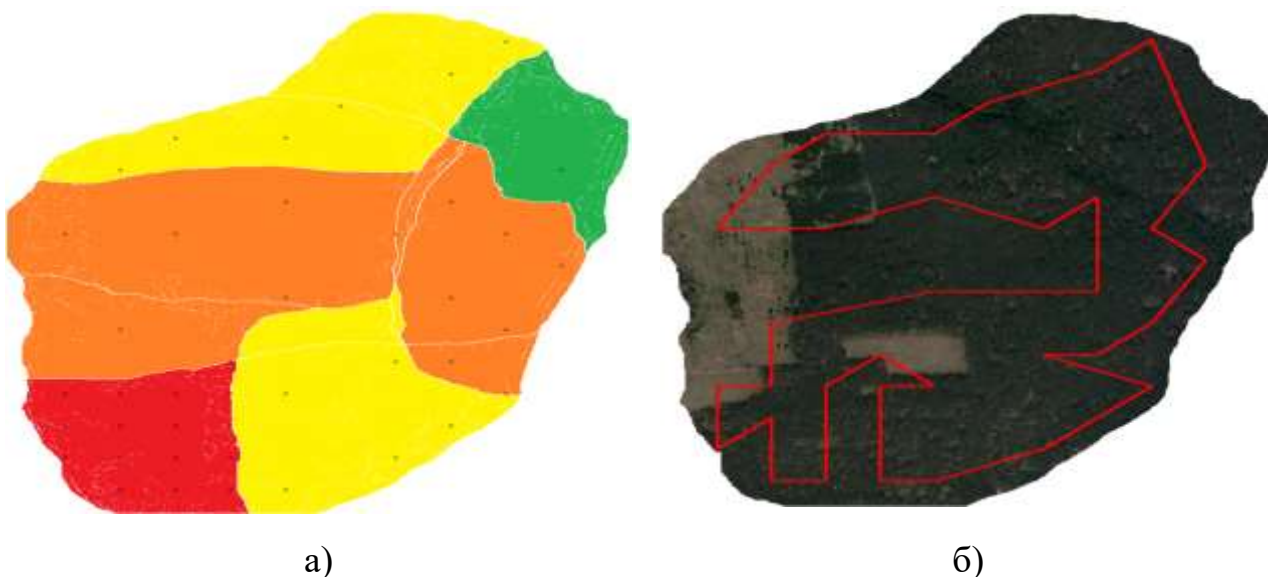


Рисунок 4.38 – Побудова траєкторії з врахуванням можливої цінності виявлених об’єктів: а) Шар можливої цінності виявлених об’єктів та вузли траєкторії після процедури заміни вузлів; б) Результуюча траєкторія

Таким чином отримано траєкторію, що максимізує інтегральний функціонал якості, в якому досягається максимальне значення суми ймовірної цінності виявлених об'єктів, максимум покриття та енергоефективності.

На шарі можливої цінності об'єктів (Рис. 4.38а) білими кривими позначено межі шарів важливості областей та ймовірності виявлення об'єктів. Білі пікселі є наслідком неспівпадіння кольорів при накладанні шарів. Дана ситуація можлива при позначенні експертами областей з використанням пензля з несучільною заливкою.

Для оцінки ефективності запропонованого методу побудуємо траєкторію для покриття такої самої території, але з однорідними характеристиками, тобто можлива цінність виявлених об'єктів рівна 1 для всіх областей території: $IP(Z_i) = 1, i = \overline{1, c}, c$ – кількість зон. Значення кроку сітки $h = 50$ пікселів, об'єм акумулятора $V = 100000$ умовних одиниць, енерговитрати одного кроку руху датчику $\Delta e = 1$ умовна одиниця. Довжина траєкторії при покритті території з однорідними характеристиками складає 6186,06 пікселів (Рис. 4.39).

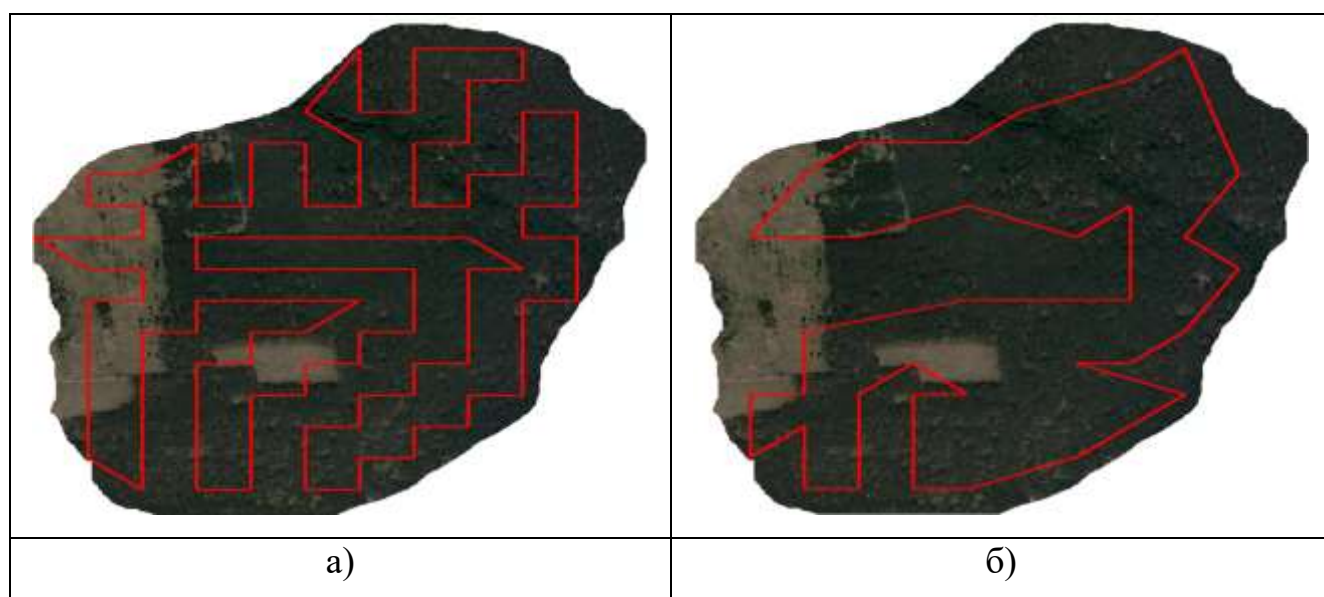


Рисунок 4.39 – Траєкторії а) без урахуванням можливої цінності виявлених об'єктів (однорідні характеристики території); б) з урахуванням можливої цінності виявлених об'єктів

Максимальна кількість об'єктів сенсором даної траєкторії без урахуванням можливої цінності виявлених об'єктів рівна $RC(6186.06, 100000) = \frac{100000}{6186.06} = 16.165$. Довжина траєкторії з урахуванням можливої цінності виявлених об'єктів 3386.51 пікселів. Максимальна кількість об'єктів датчиком даної території з урахуванням можливої цінності виявлених об'єктів рівна $RC(3386.51, 100000) = \frac{100000}{3386.51} = 29.528$.

Отже, згідно з отриманими результатами, використання розробленого методу дозволило підвищити енергоефективність та збільшити кількість об'єктів території на 54.73%.

4.3.5 Аналіз кількості об'єктів території та виграшу ефективності в залежності від гетерогенності при різних значеннях кроку під час побудови траєкторій руху датчиків з урахуванням можливої цінності виявлених об'єктів

Обчислимо значення виграшу ефективності з використанням формул (2.117) та (2.119) для різних значень можливої цінності виявлених об'єктів. Клас можливої цінності виявлених об'єктів IP_0 не розглядаємо, так як точки даного класу не розглядаються при побудові траєкторії.

Гетерогенність (відмінність однорідності) визначаємо як різницю між одиницею та числовим еквівалентом класу можливої цінності виявлених об'єктів (Табл. 2.7) за формулою (4.2).

$$H_i = (1 - [IP_i]) * 100\%, \quad (4.2)$$

де $[IP_i]$ – числовий еквівалент класу можливої цінності виявлених об'єктів, $i = \overline{1,6}$.

Тобто, у нашому випадку гетерогенність – це відмінність можливої цінності виявлених об'єктів у зоні від максимального значення можливої цінності виявлених об'єктів. В якості прикладу розглянемо клас можливої цінності виявлених об'єктів $IP_{0.7}$. Для даного класу діапазон значень можливої цінності виявлених об'єктів дорівнює $(0.5;0.7]$, а числовий еквівалент дорівнює 0.7. Таким

чином, згідно з формулою (4.2) гетерогенність для даного класу можливої цінності виявлених об'єктів дорівнює $H_{0,7} = (1 - 0.7) * 100\% = 30\%$.

Використовуючи різні вхідні параметри побудуємо сімейство кривих, що описують залежність кількості об'єктів території від гетерогенності при різних значеннях кроку h (Рис. 4.40).

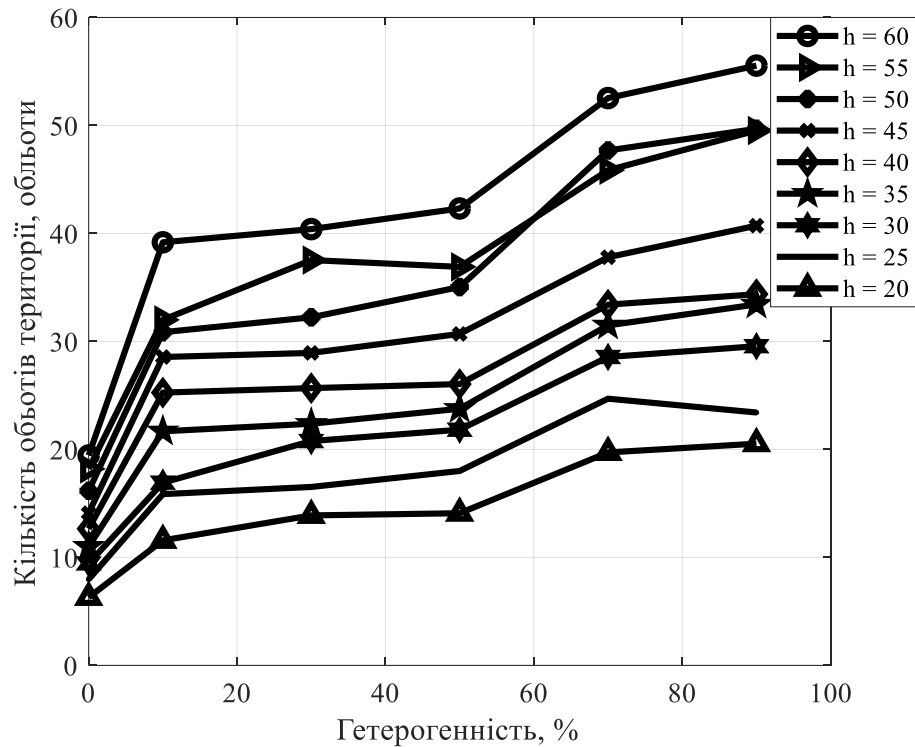


Рисунок 4.40 – Кількість об'єктів території в залежності від гетерогенності при різних значеннях кроку h

Аналізуючи отримані результати (Рис. 4.40) зробимо припущення, що функцію залежності кількості об'єктів території від відмінності однорідності можна представити у як суперпозицію показникової та логістичної функцій:

$$f(x) = \begin{cases} a\sqrt{x} + b, & x \in [0; 0.3) \\ \frac{L}{1+e^{-k(x-x_0)}} + b, & x \in [0.3; 0.9] \end{cases} \quad (4.3)$$

де a та b – сталі коефіцієнти, L – максимальне значення кількості об'єктів (верхня асимптота), x_0 – значення середньої точки кривої.

У рівнянні (4.3) x_0 буде рівним 0.6 як середина інтервалу $[0.3; 0.9]$.

Використовуючи різні вхідні параметри побудуємо сімейство кривих, що описують залежність виграшу ефективності від відмінності однорідності при різних значеннях кроку h (Рис. 4.41).

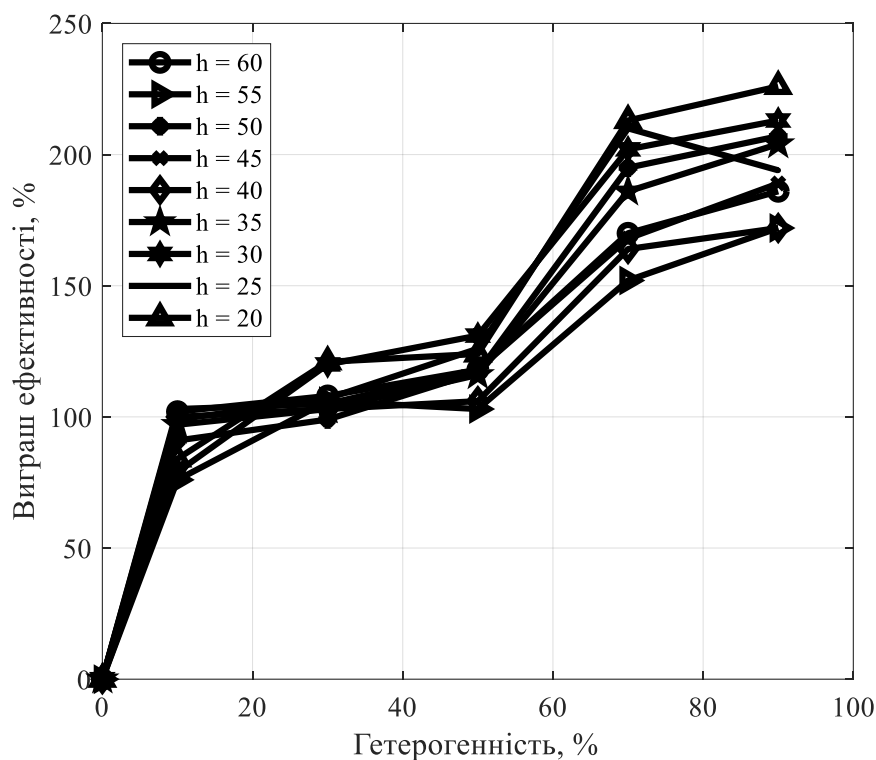


Рисунок 4.41 – Значення виграшу енергоефективності в залежності від гетерогенності при різних значеннях кроку h

У Додатку Б представлено траєкторії руху датчику при різних значеннях вхідних параметрів (крок h , значення можливої цінності виявлених об'єктів). Значення довжин траєкторій $L(S)$, кількості обльотів території $RC(E,V)$, ефективності Eff та виграшу ефективності \overline{Eff} для різних значень кроку h на основі яких побудовано графіки (Рис. 4.26, 4.27) представлено у Додатку В. Наприклад, для кроку $h = 50$ ефективність рівна $\overline{Eff}_{h=50} = \min\{90, 116, 207\} = 90$.

На основі отриманих результатів (Рис. 4.41) можна зробити висновок: при значеннях відмінності однорідності до 0,1 (10%) величина кроку не впливає на виграш ефективності; при значеннях відмінності однорідності від 0,1 (10%) до 0,5 (50%) величина кроку не сильно впливає; при значеннях відмінності однорідності

більше 0,5 (50%) величина кроку сильно впливає на виграш ефективності. Таким чином траєкторії побудовані з малим кроком не є енергоефективними.

Відповідно до отриманих результатів, мінімальне значення кількості обльотів території для різних значень кроку рівне 11 повних обльотів, точне значення 31,99. Відповідно до цього значення виграшу ефективності рівне 76%.

Таким чином, можна зробити висновок, що розроблений метод дозволяє збільшити енергоефективність при покритті території динамічними датчиками з врахуванням можливої цінності об'єктів на 76%.

4.3.6 Забезпечення псевдохаотичності траєкторій

Розглянемо певну територію на якій необхідно побудувати траєкторію руху датчику. Використавши метод, запропонований у Розділі 2, представимо отриману траєкторію для датчику з радіусом покриття $r = 10$ у вигляді (Рис. 4.42):



Рисунок 4.42 – Територія та траєкторія руху датчику

З використанням запропонованого підходу побудови квазіхаотичних траєкторій при значеннях параметрів $\sigma = 10, b = \frac{8}{3}$ та $\lambda = 28$ для атрактору Лоренца та $a = 0.2, b = 0.2$ та $c = 3$ для атрактору Рьюсслера, $a = 0$ для атрактору

Ван дер Пола отримані квазіхаотичні траєкторії будуть мати вигляд (Рис. 4.43– 4.45):



Рисунок 4.43 – Квазіхаотичні траєкторії з використанням аттрактору Лоренца

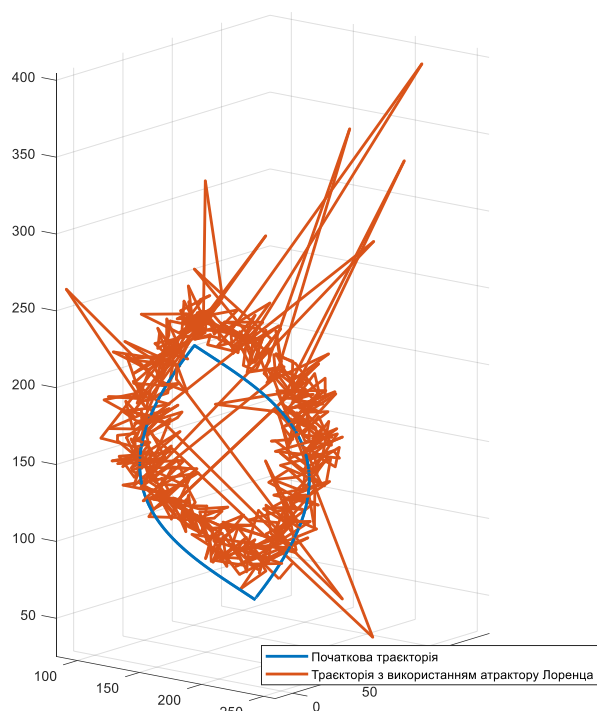


Рисунок 4.44 – Квазіхаотичні траєкторії з використанням аттрактору Рьосслера

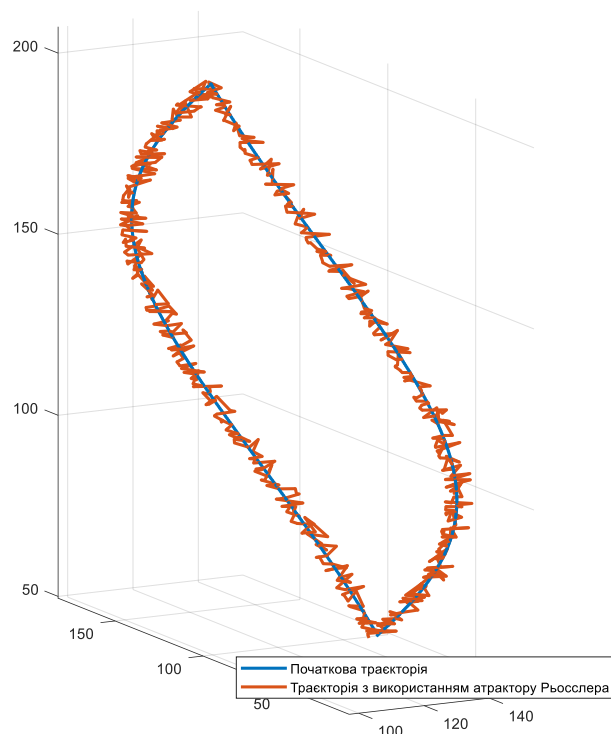


Рисунок 4.45 – Квазіхаотичні траєкторії з використанням атрактору Ван дер Поля

Очевидно, що при моделюванні квазіхаотичних траєкторій у 3-вимірному просторі не всі атрактори забезпечать задовільний результат. На рисунку 4.46 представлені побудовані квазіхаотичні траєкторії у 3-вимірному просторі з використанням атракторів Лоренца та Рьослера.



а)



б)

Рисунок 4.46 – Квазіхаотична траєкторія з використанням а) атрактору Лоренца, б) атрактору Рьослера

Для кожної з побудованих траєкторій обчислимо середнє відхилення від початкової траєкторії за формулою (4.4):

$$D(T_s, T_p) = \frac{\sum_{i=1}^n l(t_i^s, t_i^p)}{n}, \quad (4.4)$$

де T_s – початкова траєкторія, T_p – псевдохаотична траєкторія, $t_i^s \in T_s$ та $t_i^p \in T_p$ – точки траєкторій T_s та T_p , $l(t_i^s, t_i^p)$ – евклідова відстань між точками, $i = \overline{1, n}$, n – кількість точок у траєкторії.

Виграш зміни траєкторії обчислимо за формулою (4.5):

$$G(T_s, T_p) = \frac{D(T_s, T_p)}{\Delta}, \quad (4.5)$$

де Δ – крок при побудові траєкторії.

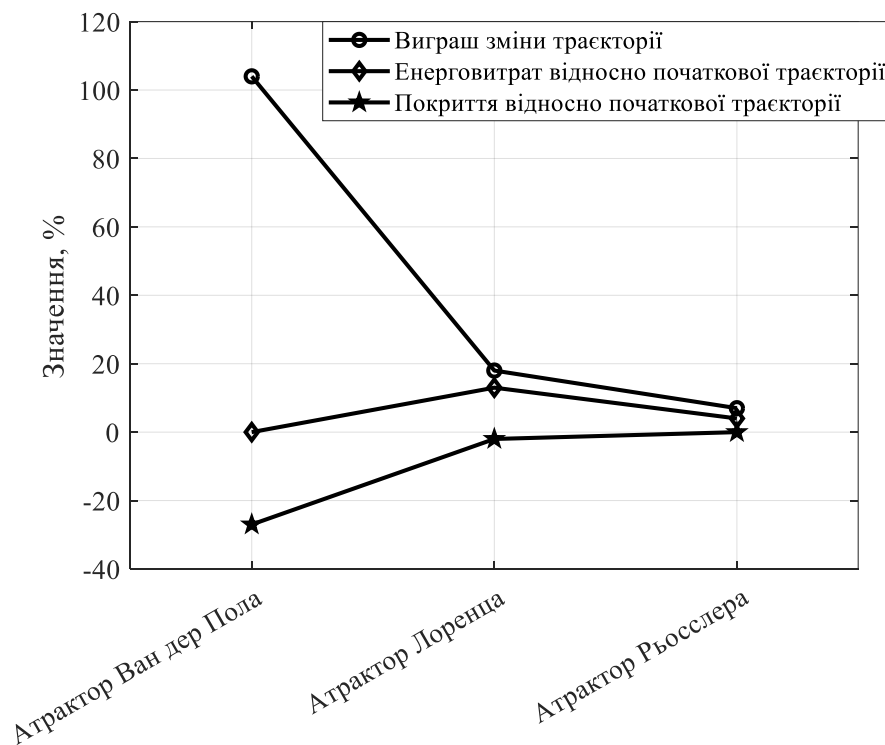


Рисунок 4.47 – Порівняльний аналіз значення параметрів траєкторій для різних видів атракторів у двовимірному випадку

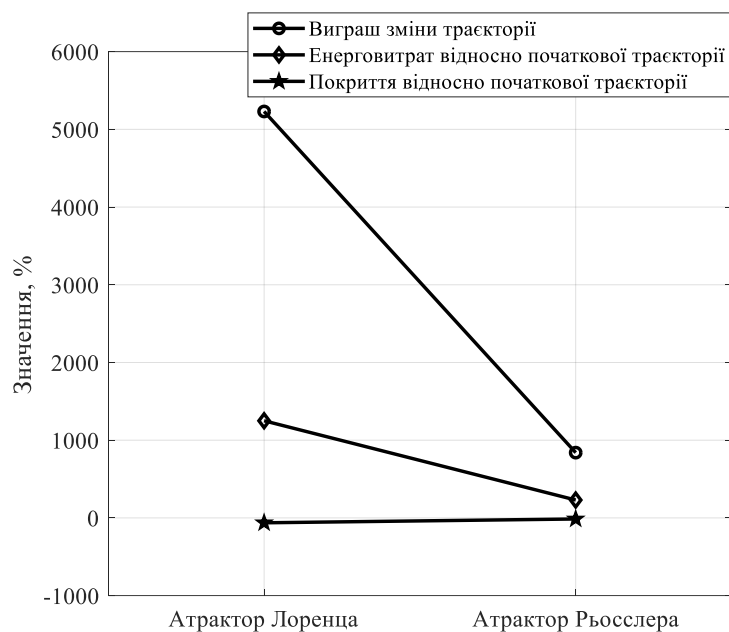


Рисунок 4.48 – Порівняльний аналіз значення параметрів траєкторій для різних видів атракторів у тривимірному випадку

Під поняттям «Виграш зміни траєкторії» розуміємо зменшення ймовірності виявлення датчика, що рухається за даною траєкторією. Згідно з отриманими результатами найкращий виграш у двовимірному випадку досягається з використанням атрактора ван дер Пола, проте зменшується покриття території. У тривимірному випадку найкращий виграш досягається з використанням атрактору Лоренца. Слід також зауважити, що крім зменшення корисної площі покриття, збільшуються енерговитрати датчику. Тому вибір необхідної траєкторії повинен здійснюватися експертом.

4.2.7 Оцінка живучості сенсорних мереж

Метод оцінки живучості розглянемо на прикладі сенсорної мережі, що складається з 8 датчиків. Характеристики датчиків представлено у таблиці (Табл. 4.3):

Таблиця 4.3 – Характеристики датчиків

Сенсор	Позиція	Радіус покриття, м	Важливість	Пропускна здатність, Mb/s
s_1	(15;15)	10	0,8	85
s_2	(35;15)	17	0,9	90
s_3	(35;40)	10	0,7	87
s_4	(17;30)	8	0,8	120
s_5	(20;45)	10	1	110
s_6	(50;55)	13	0,9	80
s_7	(15;65)	12	0,7	100
s_8	(15;85)	15	0,8	90

Схематично дану мережу можна зобразити у вигляді (Рис. 4.49):

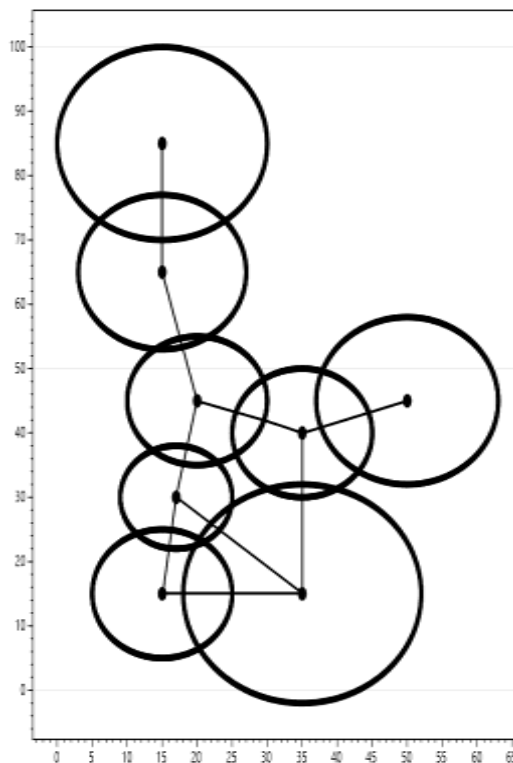


Рисунок 4.49 – Схематичне зображення вхідної мережі та зв'язків між датчиками

З використанням SensorNetworkVitalityTester оцінимо живучість представленої мережі з врахуванням пропускної спроможності елементів мережі. Результат оцінки мережі представлено у таблиці 4.4 та на рисунку 4.36.

Таблиця 4.4 – Результати оцінки живучості сенсорної мережі

Параметр живучості	Значення
Втрата датчиків	0.33
Втрата каналів зв'язку між датчиками	0
Втрата датчиків, що забезпечують максимальний потік даних	0.72
Втрата каналів зв'язку, що забезпечують максимальний потік даних	0
Загальна живучість мережі	0
Вразливі датчики	S_3, S_5, S_7 ;
Вразливі датчики, що забезпечують максимальний потік даних	S_2, S_3, S_4, S_5
Вразливі канали зв'язку між датчиками	$S_3 \rightarrow S_6, S_5 \rightarrow S_7, S_7 \rightarrow S_8$
Вразливі канали зв'язку, що забезпечують максимальний потік даних	$S_1 \rightarrow S_2, S_1 \rightarrow S_4, S_2 \rightarrow S_3,$ $S_2 \rightarrow S_4,$

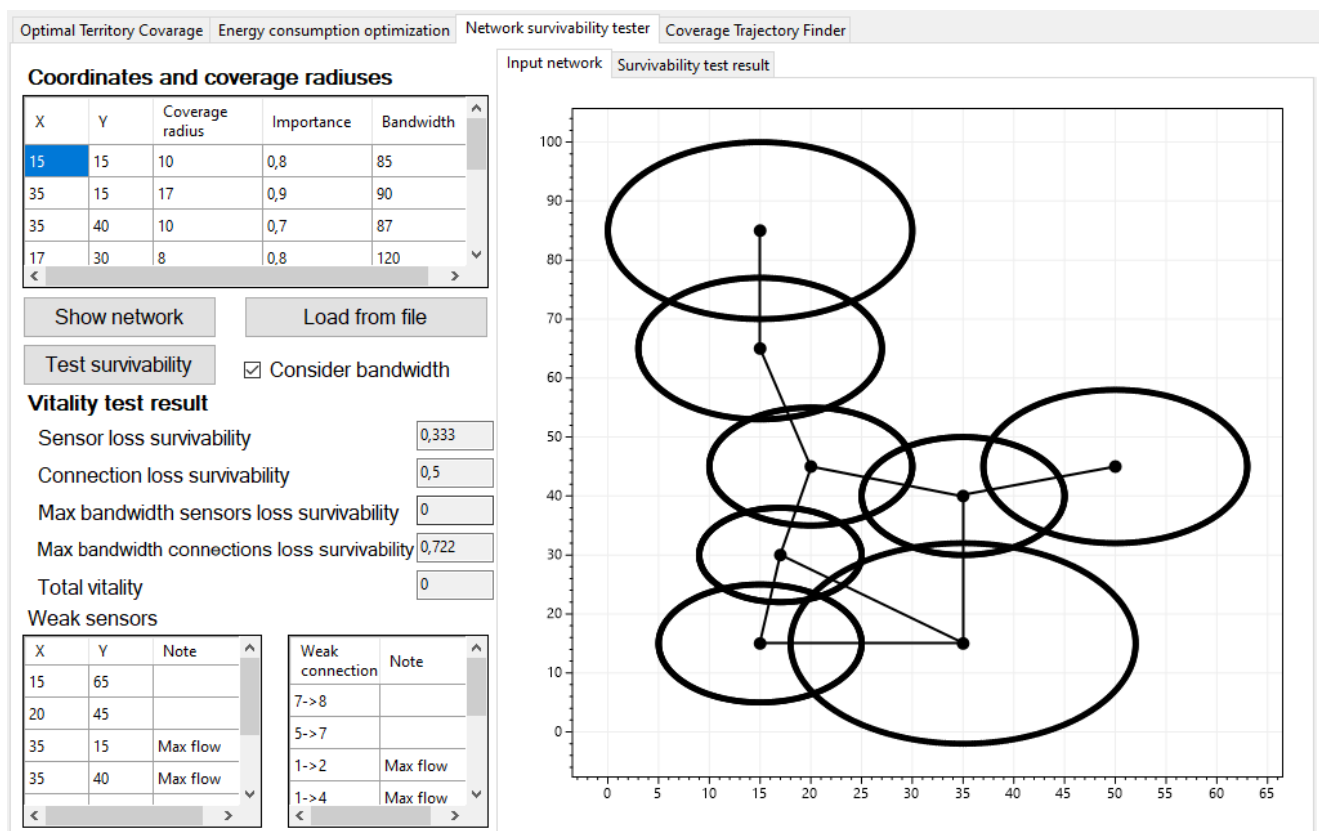


Рисунок 4.50 – Результат оцінки живучості сенсорної мережі

Забезпечення живучості мережі відбувалося у чотири етапи. На першому етапі встановимо значення пропускної спроможності кожного сенсору на значення, що рівне мінімальному значенню пропускної спроможності. У випадку мережі, що розглядається, така пропускна здатність рівна 80 Mb/s. На другому етапі включимо до мережі датчик з координатами (21;46) та радіусом покриття 10 м. На третьому етапі включимо до мережі датчик з координатами (16;66) та радіусом покриття 12 м. На четвертому етапі включимо до мережі датчик з координатами (34;39) та радіусом покриття 10 м. Результатом кожного етапу є покращення значення параметру живучості мережі та компонентів даного параметру (Рис. 4.51).

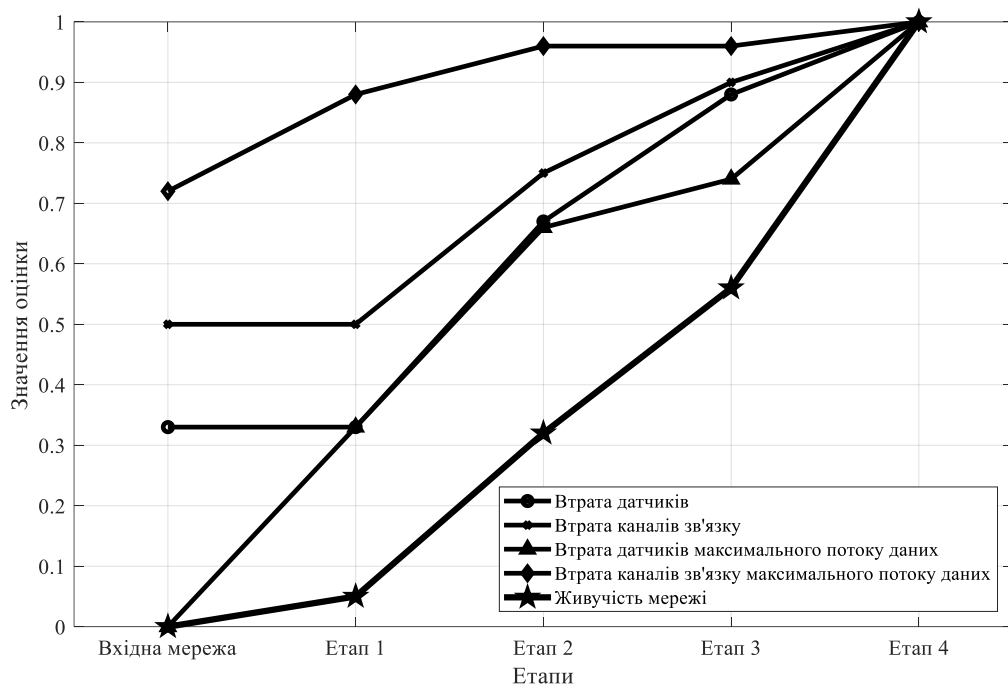


Рисунок 4.51 – Динаміка збільшення значення параметрів живучості мережі в процесі проектування сенсорної мережі

Остаточно результуюча мережа з додатковими канали зв'язку (штрихова лінія) буде мати такий вигляд (Рис. 4.52):

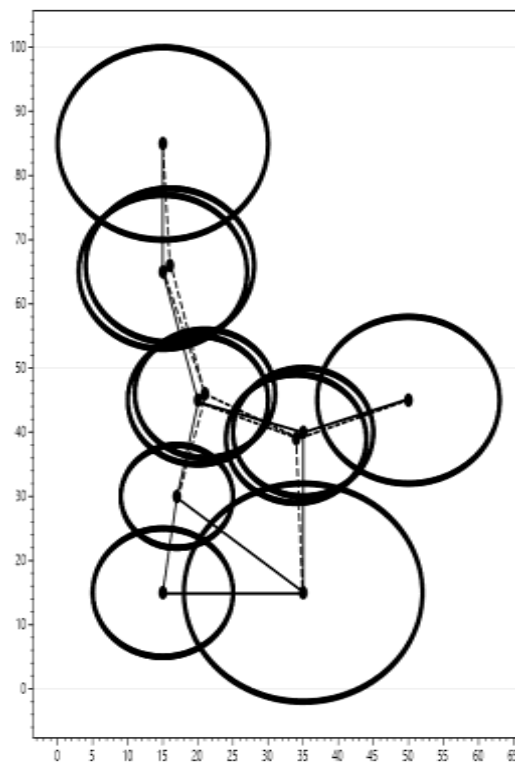


Рисунок 4.52 – Схематичне зображення результуючої мережі

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 4

У розділі представлено метод максимізації покриття території з мінімізацією енерговитрат та оцінкою живучості сенсорних мереж. Наведено схему використання розробленого методу. Також описано архітектуру програмного забезпечення у якому реалізовано розроблений метод та технології, що були використані під час розробки. Перевагою розробленого програмного забезпечення є форма динамічно приєднуваної кросплатформної бібліотеки, що забезпечує можливість використання розробленого функціоналу незалежно від платформи користувача. На основі даної бібліотеки розроблено додаток, що забезпечує інтерфейс взаємодії та використання користувачем функціоналу бібліотеки. Особливістю розробленого додатку є використання фреймворку .NET 6.0, що є кросплатформним та має довгострокову підтримку. Користувацький інтерфейс додатку реалізовано з використанням технології WinForms. Наведено детальний опис та принципи роботи розробленого додатку.

Також у розділі представлені результати обчислювальних експериментів. Комп'ютерна симуляція проводилася з використанням реальних території та вхідних даних. Наведено приклади використання всього функціоналу розробленої бібліотеки та розробленого додатку. Результати обчислювальних експериментів та комп'ютерної симуляції підтверджують ефективність представлених у розділах 2 та 3 моделей, методів та алгоритмів. Отримано такі результати:

1. При заданому діаметрі перетину зон покриття зменшено енерговитрати конкретної сенсорної мережі на 43.77%. При цьому мінімальне зменшення енерговитрат конкретного датчику складає 2.08%. Проаналізовано функцію енерговитрат та випадки досягнення оптимальних значень;

2. Знайдено оптимальні параметри мережі (радіус покриття, діаметр перетину зон покриття), що підвищили енергоефективність вхідної мережі при заданих умовах на 37.72%;

3. З використанням методу динамічного програмування та сіткового методу побудовано траєкторії обльоту заданої території, що максимально охоплюють

територію при мінімізації енерговитрат. Траєкторія, побудована з використанням сіткового методу виявилася більш енергоефективною, виграш склав 4.94%;

4. Побудовано траєкторію об'єкту території з урахуванням можливої цінності виявлених об'єктів. Використання розробленого методу дозволило підвищити енергоефективність та збільшити кількість об'єктів території на 54.73% у порівнянні з початковою траєкторією. Також проведено аналіз кількості об'єктів території та виграшу ефективності в залежності від відмінності однорідності при різних значеннях кроку під час побудови траєкторій руху датчиків з урахуванням можливої цінності виявлених об'єктів;

5. Побудовано сімейство псевдохаотичних траєкторій, що зменшують ймовірність виявлення датчику на 7% мінімум в залежності від обраної траєкторії;

6. Оцінено живучість сенсорної мережі та виявлено вразливі датчики та канали зв'язку. Забезпечено живучість мережі шляхом регулювання швидкості передачі даних та включення до мережі додаткових сенсорів, що відбувалося у чотири етапи. За чотири етапи проектування мережі значення параметру живучості досягло 100%.

ВИСНОВКИ

У результаті дисертаційного дослідження вирішено актуальне наукове завдання розробки методів та алгоритмів знаходження параметрів датчиків (радіус покриття, величина перетину зон покриття) за яких досягається максимальне покриття території при мінімальних енерговитратах та вартості мережі, будувати оптимальні траєкторії обльоту території за критеріями мінімальних енерговитрат, максимального покриття та виграшу траєкторії, а також оцінювати живучість мережі з знаходженням вразливих елементів мережі.

Отримані результати мають важливе значення для забезпечення енергоефективності сенсорних мереж. Відсутність аналогічних рішень в нашій країні і за кордоном робить результати досліджень пріоритетними.

Основні результати роботи полягають у наступному:

1. Проведено аналіз сучасних досліджень забезпечення енергоефективності та рентабельності сенсорних мереж, максимізації покриття сенсорами та побудові оптимальних траєкторій обльоту території, оцінці та забезпечення живучості сенсорних мереж. У розглянутих роботах одночасно не враховуються критерії максимізації покриття, мінімізації енерговитрат та вартості мережі, при побудові траєкторії не враховується покриття датчику, при оцінці живучості не враховується обмін даними між датчиками що підтверджує актуальність та новизну результатів дисертаційного дослідження.

2. Вперше запропоновано методи пошуку оптимальних параметрів сенсорної мережі з одночасним урахуванням критеріїв максимізації покриття, мінімізації енерговитрат та вартості мережі. Метод ґрунтується на пошуку розв'язків задач багатокритеріальної нелінійної оптимізації. Враховано необхідність перетину зон покриття датчиків для передачі даних. Сформульовано та доведено теореми та леми про існування розв'язку поставлених задач.

3. Вперше запропоновано алгоритми побудови траєкторії обльоту території критеріями яких є максимізація покриття території при мінімізації енерговитрат. Дана траєкторія досягається шляхом побудови шляху мінімальної довжини, що включає в себе всі необхідні точки території. Запропоновано алгоритм, що

базується на принципах динамічного програмування та введеного поняття одиничного руху датчику. Також запропоновано сітковий алгоритм. У представлених алгоритмах критерієм відбору точок траєкторії є максимальне значення покритої території датчиком у даній точці з заданим радіусом та певною точністю. Радіус покриття та точність задаються експертом.

4. Вперше запропоновано метод побудови траєкторії з врахуванням можливої цінності виявлених об'єктів. Під можливою цінністю виявлених об'єктів у точці вважаємо оцінку виграшу покриття у даній точці. Дана оцінка складається з оцінок ймовірності виявлення об'єкту у точці та важливості території у даній точці. Розглянуто існування різних сценаріїв розподілу оцінок. Для зручності запропоновано еквіваленти оцінок у вигляді кольорових та умовних позначень, а розподіли оцінок як шари з відповідними кольорами або умовними позначеннями. Запропоновано сім класів важливості зон території та ймовірності виявлення об'єктів, що формують сім класів можливої цінності виявлених об'єктів. Для кожного класу можливої цінності виявлених об'єктів запропоновано різні класи заміни вузлів та їх суперпозиції. Запропоновано п'яти-, три- та двоточкові заміни вузлів.

5. Вперше запропоновано метод оцінки живучості сенсорних мереж з врахуванням пропускної спроможності елементів мережі. Без врахування пропускної спроможності елементів мережі метод базується на алгоритмі Дейкстри. У випадку врахування пропускної спроможності елементів мережі метод використовує алгоритм Форда-Фалкерсона. Можливе сумісне використання даних підходів. Значення параметру живучості формується з оцінок втрати датчиків, втрати каналів зв'язку між датчиками, втрати датчиків, що забезпечують максимальний потік даних та втрати каналів зв'язку, що забезпечують максимальний потік даних. Також розроблено алгоритм забезпечення живучості мережі з використанням статичних та динамічних датчиків. Забезпечення живучості відбувається шляхом включення до мережі додаткових сенсорів у відповідну позицію та регуляцією пропускної спроможності елементів мережі.

6. Розроблено метод програмованої оптимізації структури сенсорних мереж, у якому поєднано всі розроблені методи та алгоритми. Ключовою особливістю розробленого методу є можливість послідовної оптимізації енерговитрат сенсорної мережі, пошуку оптимальних параметрів мережі, побудові траєкторій обльоту території, оцінкою живучості та виявленням вразливих елементів сенсорних мереж. Результат певного етапу може бути використаний як вхідні дані наступного етапу. Послідовність використання функціоналу методу є довільною. Також функціональні елементи розробленого методу можуть бути використані незалежно один від одного. Особливістю розробленого методу є можливість послідовного використання модулів. Реалізовано метод у вигляді кросплатформної динамічно приєднуваної бібліотеки. Також розроблено програмне забезпечення, що надає доступ до методів розробленої бібліотеки. Програмне забезпечення володіє приємним користувацьким інтерфейсом та надає користувачу можливість завантаження зображень територій з подальшою їх обробкою, зчитування даних про параметри датчиків з файлів у форматі електронної таблиці та експорту результатів. Також розроблене програмне забезпечення забезпечує широкий спектр візуалізації як вхідних, так і результуючих даних.

7. Для конкретної мережі знайдено параметри мережі, що дозволяють скоротити енерговитрати кожного мінімум на 2.08%. Під параметрами мережі розуміємо радіус покриття та діаметр перетину зон покриття. Проведено аналіз функції енерговитрат у випадку двох датчиків та зроблено узагальнення на випадок n датчиків. Із заданим діаметром перетину зон покриття зменшено енерговитрати конкретної сенсорної мережі на 43.77%.

8. З використанням розробленого методу знайдено параметри сенсорної мережі, за яких досягається максимальне покриття території при мінімальних енерговитратах. При додатковій умові перетину зон покриття $c = 3$ м оптимальне значенням радіусу покриття рівне $r = 39.46$ м. З використанням отриманих значень вдалося зменшити енерговитрати сенсорної мережі на 37.72%.

9. Проведено оцінку живучості та знайдено вразливі елементи конкретної сенсорної мережі. Початкове значення оцінок живучості мережі були рівні: втрата

датчиків = 33%, втрата каналів зв'язку між датчиками = 0%, втрата датчиків, що забезпечують максимальний потік даних = 72%, втрата каналів зв'язку, що забезпечують максимальний потік даних = 0%, загальна живучість мережі = 0%. Забезпечення живучості мережі відбувалося у чотири етапи. Для забезпечення мережі використовувалася регуляція пропускнуої спроможності елементів мережі та включення до мережі додаткових датчиків. За чотири етапи вдалося досягнути 100% живучості вхідної мережі.

10. Для території з конкретними розподілами ймовірності виявлення об'єктів та цінності виявлених об'єктів побудовано траєкторію обльоту, що зменшує енерговитрати датчику на 54.73%, наслідком чого є збільшення часу автономної роботи датчику. Таке значне зменшення енерговитрат досягається завдяки суттєвому скороченню довжини траєкторії обльоту території.

11. Побудовано траєкторії руху датчиків для різних значень кроку сітки та відмінності однорідності (гетерогенності). Визначено залежність кількості обльотів території від відмінності однорідності при різних значеннях кроку h . Дана залежність представлена як суперпозицію показникової та логістичної функцій.

12. На основі побудованих траєкторій проведено аналіз значення виграшу ефективності в залежності від відмінності однорідності при різних значеннях кроку h . Встановлено, що при значеннях відмінності однорідності до 0,1 (10%) величина кроку не впливає на виграш ефективності; при значеннях відмінності однорідності від 0,1 (10%) до 0,5 (50%) величина кроку не сильно впливає; при значеннях відмінності однорідності більше 0,5 (50%) величина кроку сильно впливає на виграш ефективності. Таким чином траєкторії побудовані з малим кроком не є енергоефективними.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Адамов А., Адамова И., Семенцов С. Энергоэффективные технические решения для беспроводных сенсорных сетей. *Надежность и качество сложных систем*. 2019. Т. 4, № 28. С. 142–147.
2. Алгоритмы оптимизации маршрута полета летательного аппарата / В. Марустин та ін. *Вестник Концерна ВКО Алмаз-Антей*. 2019. С. 98–104.
3. Аношкін О. Математичні моделі та методи розв'язання оптимізаційних задач сенсорного покриття об'єктів контролю : дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук. Харків, 2019. 204 с.
4. Астраков С. Н., Ерзин А. И., Залюбовский В. В. Сенсорные сети и покрытие плоскости кругами. *Дискретный анализ и исследование операций*. 2009. Т. 16, № 3.
5. Астраков С. Н., Квашин А., Короленко Л. Построение эффективных сенсорных сетей с учётом стоимостных затрат. *Математические структуры и моделирование*. 2017. Т. 3, № 43. С. 50–62.
6. Беллман Р. Динамическое программирование. Москва : Издательство иностранной литературы, 1960. 402 с.
7. Белоглазов Д., Гузик В., Медведев М. Интеллектуальные технологии планирования перемещений подвижных объектов в трехмерных недетерминированных средах / ред. В. Пшихопов. Москва : Наука, 2017. 231 с.
8. Бережний А. О., Калачова В. В., Рожков М. І. Моделювання руху динамічних об'єктів в системі підтримки прийняття рішень планування маршрутів безпілотних літальних апаратів. *Системи обробки інформації*. 2019. № 4(159). С. 44–49. DOI: <https://doi.org/10.30748/soi.2019.159.05>.
9. Бичков О., Иванов Є. Основи програмування мовою С#. Посібник. Київ : Київ. націон. університет імені Тараса Шевченка, 2015. 197 с.
10. Бобер А., Петрова В. Развитие способов підвищення пропускної здатності в мобільних сенсорних мережах. *Перспективи телекомунікацій*. 2019.
11. Бондаренко М., Білоус Н., Руткас А. Комп'ютерна дискретна математика. Харків : Компанія Сміт, 2004. 480 с.

12. Брайсон А., Ю-ши Х. Прикладная теория оптимального управления. Москва : Мир, 1972. 544 с.
13. Воронов А. Теория автоматического управления. Москва : Высшая шк., 1977. 519 с.
14. Горбатий І. Теоретичні дослідження впливу параметрів каналу зв'язку на його пропускну здатність. 2007. С. 10–15.
15. Данилюк С. Концептуальні підходи до вирішення задачі оптимального розміщення сенсорів в області екологічного моніторингу. *Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони*. 2016. С. 45–48.
16. Демидов Д., Будылдина Н. Повышение времени жизни беспроводных сенсорных сетей с использованием нечеткой логики. *Надежность и качество сложных систем*. 2018. Т. 3, № 23. С. 50–58.
17. Додонов А. Г., Флейтман Д. К вопросу живучести корпоративных информационных систем. *Реєстрація, зберігання і обробка даних*. 2004. Т. 6, № 22. С. 33–41.
18. Додонов А., Ландэ Д. Живучесть информационных объектов в сети интернет. *Open semantic technologies for intellignt systems*. 2013.
19. Додонов А., Ландэ Д. Живучесть информационных систем. Київ : Наук. думка, 2011. 256 с.
20. Додонов О., Ланде Д. Методи підвищення живучості інформаційної складової корпоративних інформаційно-аналітичних систем підтримки прийняття рішень. *Реєстрація, зберігання і обробка даних*. 2012. Т. 14, № 2. С. 48–58.
21. Ерохин С., Махров С. Протоколы маршрутизации в беспроводных сенсорных сетях: основанные на местоположении узлов и направленные на агрегацию данных. *T-Сотт - Телекоммуникации и Транспорт*. 2013. № 3. С. 44–47.
22. Жураковський Б., Зенів І. Комп'ютерні мережі частина 2 навчальний посібник. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. 372 с.
23. Зеленин А. Н., Власова В. А. Беспроводные сенсорные сети как часть инфокоммуникационной структуры.
URL: <https://openarchive.nure.ua/bitstream/document/3521/1/Статья%20Власова.pdf>.

24. Интеллектуальное управление движением автономных подвижных объектов на основе поведенческого подхода / Д. Белоглазов та ін. *Инженерный вестник Дона*. 2015. № 3.
25. Исследование эвристических алгоритмов в задачах прокладки и оптимизация маршрутов в среде с препятствиями / Р. Нейдорф та ін. *Известия ЮФУ. Технические науки*. 2016.
26. Інформаційна технологія покриття території датчиками із заданим рівнем перетину та мінімізацією витрат / В. Петрівський та ін. *Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка*. 2020. № 68. С. 65–72. URL: <https://doi.org/10.17721/2519-481X/2020/68-07>.
27. Квази- ϕ -функции для математического моделирования отношений геометрических объектов / Ю. Г. Стоян та ін. *Доповіді Національної академії наук України*. 2014. № 9. С. 49–54.
28. Кеке Г., Чулин Н. Алгоритм наведения движения для квадрокоптера с возможностью облета препятствий и отслеживания запланированного маршрута на основе управления нормальным ускорением. *Проблемы современной науки и образования*. 2016. С. 6–28.
29. Коваленко І., Романюк В., Діянчук І. Аналіз методів енергозбереження всенсорних радіомережах. *Телекомунікаційні та інформаційні технології*. 2014.
30. Копнин Н., Муравьев К., Серова Е. Методы увеличения времени жизни беспроводных сенсорных сетей. *Труды Международного симпозиума «Надежность и качество»*. 2020. С. 167–169.
31. Косолап А. Оптимальное размещение сетей датчиков. *Вопросы химии и химической технологии*. 2013. С. 206–208.
32. Кочкаров А., Яцкин Д. Алгоритм поиска оптимального расположения сенсоров для решения задачи мониторинга пространства. *Программные продукты и системы*. 2016. Т. 115, № 3.

33. Кочкаров А., Яцкин Д., Рахманов О. Особенности решения задачи геометрического мониторинга. *Известия ЮФУ. Технические науки*. 2016. С. 158–168.
34. Краснобаев В., Горбенко Р. Аналіз енергоефективності бездротової сенсорної мережі. *Системи обробки інформації*. 2014.
35. Красовский Н. Теория управления движением. Линейные системы. Москва : Наука, 1968. 476 с.
36. Кривошея Д. Подход к оценке функциональной живучести иерархической системы видеоконференцсвязи. *Вестник евразийской науки*. 2014.
37. Кротов В., Гурман В. Методы и задачи оптимального управления. Москва : Наука, 1973. 448 с.
38. Ланде Д. Життєвий цикл інформаційних об'єктів. *Інформація і право*. 2013. Т. 9, № 3. С. 119–127.
39. Лебедев Б. К., Лебедев О. Б., Лебедева Е. М. Hybrid algorithm of situational trajectory planning under partial uncertainty. *Herald of the Bauman moscow state technical university. Series instrument engineering*. 2018. No. 118. P. 76–93. URL: <https://doi.org/10.18698/0236-3933-2018-1-76-93> (date of access: 25.07.2022).
40. Математическая теория оптимальных процессов / Л. Понтрягин та ін. Москва : Наука, 1983. 393 с.
41. Оптимізація траєкторії руху датчиків з урахуванням важливості ділянок території моніторингу та ймовірності виявлення об'єктів / В. Петрівський та ін. *Проблеми керування та інформатики*. 2022. № 2. С. 6–22. URL: <http://doi.org/10.34229/2786-6505-2022-2-1>.
42. Петрівський В., Шевченко В., Бражиненко М. Збільшення часу роботи датчиків шляхом регулювання енерговитрат. *Системи обробки інформації*. 2019. № 3(158). С. 36–41.
43. Петрівський В. Збільшення часу роботи датчиків небезпечних ситуацій шляхом регулювання енерговитрат. *Прикладні програмні технології ІоЕ, як фундамент BigData* : монографія / ред. В. Шевченко. Київ, 2021. С. 172–176.

44. Построение беспроводных сенсорных систем с требуемой зоной покрытия / А. Черепанов та ін. *Инновации и инвестиции*. 2016. С. 161–165.

45. Пустохайлова Е., Семейкин В. Энергоэффективный многопутевой протокол маршрутизации в беспроводной сенсорной сети, основанный на решетке с использованием нечеткого подхода. *Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: управление, вычислительная техника и информатика*. 2016. С. 65–74.

46. Пшихопов В. Интеллектуальное планирование траекторий подвижных объектов в средах с препятствиями. Физматлит. 300 с.

47. Романюк М. І., Власюк Г. Г. Основи теорії інформації та кодування. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. 81 с.

48. Смит М. Глобальный руководитель по развитию стратегии Cisco в области Интернета вещей. Всеобъемлющий Интернет: нужно быть готовым к изменениям.

URL: https://glavportal.com/materials/vseobemlyushchiy_internet_nuzhno_byt_gotovy_m_k_izm/.

49. Тань Лиго, Фомичев А.В., Лю Ян. Решение задачи планирования полёта малогабаритного беспилотного летательного аппарата в условиях городской среды // *Автоматизация. Современные технологии*. 2015. № 7. С. 19-24.

50. Тань Л., Фомичев А. Планирование маршрута полёта малогабаритных летательных аппаратов в условиях неопределённости в режиме реального времени. *Международная научно-техническая конференция «Информационные системы и технологии» (ИСТ-2015)*. 2015. С. 273–276.

51. Тань Л., Фомичев А. Планирование пространственного маршрута полета беспилотного летательного аппарата с использованием методов частично целочисленного линейного программирования. *Вестник Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. Серия «Приборостроение»*. 2016. Т. 2. С. 53–66.

52. Тань Л., Фомичев А., Ген К. Решение задачи планирования полета в реальном режиме времени малогабаритного беспилотного летательного аппарата

по пространственной траектории. *Машиностроение и компьютерные технологии*. 2015.

53. Тарнавський Ю., Кузьменко І. Організація комп'ютерних мереж. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. 259 с.

54. Татарникова Т., Дзюбенко И. Методы увеличения жизненного цикла сети Интернета вещей. *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2018. Т. 15, № 5.

55. Татарникова Т., Дзюбенко И. Методы увеличения жизненного цикла сети Интернета вещей. *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2018. Т. 18, № 5. С. 843–849.

56. Учасники проєктів Вікімедіа. Багатофункціональність – Вікіпедія. Вікіпедія. URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki/Багатофункціональність>.

57. Шамунова В. Оптимальный алгоритм поиска пути в динамической среде для задач позиционирования подвижного объекта. *Образование и право*. 2020. Т. 10. С. 236–240.

58. Шевченко В. Оптимізаційне моделювання в стратегічному плануванні. Київ : ЦВСД НУОУ, 2011. 282 с.

59. Шкіль О. С., Костюк С. О., Філіппенко І. В. Методи енергозбереження в сенсорних мережах. *Радиоэлектроника и информатика*. 2019. № 3(86). URL: [https://doi.org/10.30837/1563-0064.3\(86\).2019.214976](https://doi.org/10.30837/1563-0064.3(86).2019.214976).

60. Штефан Н., Гнатейко Н., Федоров В. Теоретична механіка. кінематика точки і твердого тіла. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. 120 с.

61. Яцків В. Теоретичні основи створення і структурна організація компонентів безпроводних сенсорних мереж підвищеної ефективності : дис. ... д-ра техн. наук : 05.13.05. Тернопіль, 2016. 327 с.

62. A method for maximum coverage of the territory by sensors with minimization of cost and assessment of survivability / V. Petrivskyi et al. *Applied sciences*. 2022. Vol. 12, no. 6. P. 3059. URL: <https://doi.org/10.3390/app12063059>.

63. A multi-objective optimization approach to optimal sensor placement of irregular LSF structures / M. R. Hamed et al. *Numerical Methods in Civil Engineering*. 2021. Vol. 5, no. 3. P. 13–22. URL: <https://doi.org/10.52547/nmce.5.3.13>.
64. A survivability model in wireless sensor networks / S. Parvin et al. *Computers & mathematics with applications*. 2012. Vol. 64, no. 12. P. 3666–3682. URL: <https://doi.org/10.1016/j.camwa.2012.02.027>.
65. Adaptive pursuit learning for energy-efficient target coverage in wireless sensor networks / R. Upreti et al. *Concurrency and Computation: Practice and Experience*. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1002/cpe.5975>.
66. Aral M. M., Guan J., Maslia M. L. A Multi-Objective Optimization Algorithm for Sensor Placement in Water Distribution Systems. *World Environmental and Water Resources Congress 2008*, Honolulu, Hawaii, United States. Reston, VA, 2008. URL: [https://doi.org/10.1061/40976\(316\)510](https://doi.org/10.1061/40976(316)510).
67. Arbesser-Rastburg G., Fuchs-Hanusch D. Serious sensor placement—optimal sensor placement as a serious game. *Water*. 2019. Vol. 12, no. 1. P. 68. URL: <https://doi.org/10.3390/w12010068>.
68. Bianco S., Tisato F. Sensor placement optimization in buildings. *IS&T/SPIE electronic imaging*, Burlingame, California, USA / ed. by P. R. Bingham, E. Y. Lam. 2012. URL: <https://doi.org/10.1117/12.911021>.
69. Breaking changes in .NET 6 - .NET Developer tools, technical documentation and coding examples | Microsoft Docs. URL: <https://docs.microsoft.com/en-us/dotnet/core/compatibility/6.0>.
70. CAD technology for optimal territory covering / V. Petrivskyi et al. *2021 IEEE 16th International Conference on the Experience of Designing and Application of CAD Systems (CADSM)*, Lviv, Ukraine, 22–26 February 2021. 2021. URL: <https://doi.org/10.1109/cadsm52681.2021.9385223>.
71. Cardei M., Wu J., Lu M. Improving network lifetime using sensors with adjustable sensing ranges. *International Journal of Sensor Networks*. 2006. Vol. 1, no. 1/2. P. 41. URL: <https://doi.org/10.1504/ijnsnet.2006.010833>.

72. Ceko M., Svalbe I., Petersen T. A discrete projection analogue to Pick's theorem. *Graphical Models*. 2020. Vol. 109. P. 101066. URL: <https://doi.org/10.1016/j.gmod.2020.101066>.
73. Chen D.-S., Batson R., Dang Y. Applied integer programming: modeling and solution. John Wiley and Sons, 2010. 488 p.
74. Development of a modification of the method for constructing energy-efficient sensor networks using static and dynamic sensors / V. Petrivskyi et al. *Eastern-European journal of enterprise technologies*. 2022. Vol. 1, no. 9(115). P. 15–23. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.252988>
75. DLS: Dynamic Level Session Key Revocation Protocol for Wireless Sensor Networks / C.-H. Park et al. *2010 International Conference on Information Science and Applications*, Seoul, Korea (South), 21–23 April 2010. 2010. URL: <https://doi.org/10.1109/icisa.2010.5480578>.
76. Efficient sensor placement optimization using gradient descent and probabilistic coverage / V. Akbarzadeh et al. *Sensors*. 2014. Vol. 14, no. 8. P. 15525–15552. URL: <https://doi.org/10.3390/s140815525>.
77. Ejim S. Implementation of Greedy Algorithm in Travel Salesman Problem. 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.23921.48485>
78. Evans D. How the Internet of Everything Will Change the World for the Better #IoE. URL: <https://blogs.cisco.com/digital/how-the-internet-of-everything-will-change-the-worldfor-the-better-infographic>.
79. Evans D. Internet of Everything in Action: Today and Tomorrow #IoE. URL: <https://blogs.cisco.com/digital/internet-of-everything-in-action>.
80. Evans D. Internet of Everything изменит мир к лучшему. URL: <https://www.g-news.com.ua/news/10-it/-/13936-internet-of-everything-izmenit-mir-k-luchshemu.html>.
81. Experimental Assessment of the Interface Electronic System for PVDF-Based Piezoelectric Tactile Sensors / M. Saleh et al. *Sensors*. 2019. Vol. 19, no. 20. P. 4437. URL: <https://doi.org/10.3390/s19204437>.

82. Generic Framework of Sensor Placement Optimization for Structural Health Modeling / K. Zhou et al. *Journal of Computing in Civil Engineering*. 2017. Vol. 31, no. 4. P. 04017018. URL: [https://doi.org/10.1061/\(asce\)cp.1943-5487.0000662](https://doi.org/10.1061/(asce)cp.1943-5487.0000662).
83. Gorlatova M., Wallwater A., Zussman G. Networking low-power energy harvesting devices: Measurements and algorithms. *IEEE INFOCOM 2011 - IEEE Conference on Computer Communications*, Shanghai, China, 10–15 April 2011. 2011. URL: <https://doi.org/10.1109/infcom.2011.5934952>.
84. IEEE SA - IEEE 802.15.4-2020. IEEE Standards Association. URL: <https://standards.ieee.org/ieee/802.15.4/7029/>.
85. Information Technology for Big Data Sensor Networks Stability Estimation / V. Petrivskyi et al. *Information & Security: An International Journal*. 2020. Vol. 47, no. 1. P. 141–154. URL: <https://doi.org/10.11610/isij.4710>.
86. Information Technology of the Increasing Sensors Term of Use Considering Their Movement / V. Petrivskyi et al. *2020 IEEE XVIth International Conference on the Perspective Technologies and Methods in MEMS Design (MEMSTECH)*, Lviv, Ukraine, 22–26 April 2020. 2020. URL: <https://doi.org/10.1109/memstech49584.2020.9109431>.
87. Information technology to ensure the survivability of sensor networks / V. Y. Petrivskyi et al. *Problems in programming*. 2021. No. 4. P. 062–069. URL: <https://doi.org/10.15407/pp2021.04.062>
88. Jiang Z., Yan S., Wang L. Survivability evaluation of cluster-based wireless sensor network under dos attacks. *2009 5th International conference on wireless communications, networking and mobile computing (WICOM)*, Beijing, 24–26 September 2009. 2009. URL: <https://doi.org/10.1109/wicom.2009.5302618>.
89. Khan J., Qureshi H., Iqbal A. Energy management in wireless sensor networks: a survey. *Computers and electrical engineering*. 2015. Vol. 41. P. 159–176.
90. Klenke A. *Probability theory: a comprehensive course*. Springer Science & Business Media, 2014. 638 p.
91. Know about different types of sensors with their applications. URL: <https://www.watelectronics.com/different-types-of-sensors-with-applications>.

92. Krishnamurthy P., Khorrami F. Optimal sensor placement for monitoring of spatial networks. *IEEE Transactions on automation science and engineering*. 2018. Vol. 15, no. 1. P. 33–44. URL: <https://doi.org/10.1109/tase.2016.2573818>.
93. Last M., Liebowitz B., Pister K. Smart dust: communicating with a cubic-millimeter. *Computer*. 2001. Vol. 34. P. 44–51.
94. Let's get Physiqua! – An intuitive and generic method to combine sensor technology with ecological momentary assessments / F. J. Blaauw et al. *Journal of Biomedical Informatics*. 2016. Vol. 63. P. 141–149.
95. Li C. H., Yang Q. W. Optimal sensor placement algorithm for structural damage identification. *Recent patents on engineering*. 2020. Vol. 14, no. 1. P. 69–81. URL: <https://doi.org/10.2174/1872212113666190110124551>.
96. Lobaty A. A., Bumai A. Y., Jun D. Formation of optimal parameters of the trajectory of the overflight of unmanned aerial vehicle through the specified points of space. *Doklady BGUIR*. 2019. No. 7-8. P. 50–57. URL: <https://doi.org/10.35596/1729-7648-2019-126-8-50-57>.
97. Lysenko O., Valuiskyi S. Capacity increasing of sensor telecommunication networks. *Telecommunication sciences*. 2012. Vol. 3, no. 1. P. 5–14.
98. Maalel N. Reliability in wireless sensor networks. HAL archives-ouvertes. 2014.
99. Maksimovic M., Milosevic V. Evaluating the optimal sensor placement for smoke detection. *Yugoslav Journal of Operations Research*. 2016. Vol. 26, no. 1. P. 33–50. URL: <https://doi.org/10.2298/yjor140312002m>.
100. Mao Y., Li X., Xu F. Energy-Efficient Area Coverage in Heterogeneous Energy Wireless Sensor Networks. *Wireless Sensor Network*. 2010. Vol. 02, no. 10. P. 768–776. URL: <https://doi.org/10.4236/wsn.2010.210092>.
101. Mashkov O., Barabash O. Estimation of functional stability of distributed information-control systems. *Physical-mathematical modeling and information technologies*. 2005. Vol. 1, no. 1. P. 157–163.
102. Mavaji V., Abbasi B. Survivability evaluation in wireless sensor network. *3rd International conference on advanced management science*. 2019. Vol. 19.

103. Models and information technologies of coverage of the territory by sensors with energy consumption optimization / V. Petrivskiy et al. *Mathematical modeling and simulation of systems. MODS 2021. Lecture notes in networks and systems*. 2022. Vol. 344. P. 17–30.
104. Munoz P., Barrero D. F., R-Moreno M. D. A Statistically Rigorous Analysis of 2D Path-Planning Algorithms. *The Computer Journal*. 2014. Vol. 58, no. 11. P. 2876–2891. DOI: <https://doi.org/10.1093/comjnl/bxu137>.
105. Myklukha V., Khimchyk N. Optimization of the Flight Path of an Unmanned Aerial Vehicle. *Path of Science*. 2017. Vol. 3, no. 9. P. 1009–1015. URL: <https://doi.org/10.22178/pos.26-5>.
106. Nedjatia A., Vizvarib B. Robot Path Planning by Traveling Salesman Problem with Circle Neighborhood: modeling, algorithm, and applications. *ArXiv*. 2020. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2003.06712>
107. Neto E. P., Callou G. An approach based on ford-fulkerson algorithm to optimize network bandwidth usage. *Brazilian symposium on computing systems engineering (SBESC)*. 2015.
108. Optimal sensor placement strategy for environmental monitoring using Wireless Sensor Networks / C. C. Castello et al. 2010 *42nd Southeastern Symposium on System Theory (SSST 2010)*, Tyler, TX, USA, 7–9 March 2010. 2010. URL: <https://doi.org/10.1109/ssst.2010.5442825>.
109. Park J., Park K. A lightweight blockchain scheme for a secure smart dust iot environment. *Applied sciences*. 2020. Vol. 10, no. 24. P. 8925. URL: <https://doi.org/10.3390/app10248925>.
110. Parzen E. Modern probability theory and its applications. New York : Wiley, 1960. 464 p.
111. Pedraza A., Deniz O., Bueno G. Approaching adversarial example classification with chaos theory. *Entropy*. 2020. Vol. 22, no. 11. P. 1201. DOI: <https://doi.org/10.3390/e22111201>.
112. Peng S., Xiong Y. An Area Coverage and Energy Consumption Optimization Approach Based on Improved Adaptive Particle Swarm Optimization for

Directional Sensor Networks. *Sensors*. 2019. Vol. 19, no. 5. P. 1192. DOI: <https://doi.org/10.3390/s19051192>.

113. Petridou S., Basagiannis S., Roumeliotis M. Survivability Analysis Using Probabilistic Model Checking: A Study on Wireless Sensor Networks. *IEEE Systems Journal*. 2013. Vol. 7, no. 1. P. 4–12. URL: <https://doi.org/10.1109/jsyst.2012.2224612>.

114. Petrivskiy V., Bychkov O., Martsenyuk V. Proving the existence of solutions to the problems of minimizing the energy consumption of sensor networks. *Applied sciences*. 2022. Vol. 12, no. 15. P. 7687. URL: <https://doi.org/10.3390/app12157687>.

115. Polanczyk M., Strzelecki M., Slot K. Lee-algorithm based path replanner for dynamic environments. *International conference on signals and electronic systems (ICSES 2012)*. 2012.

116. Poudel S., Moh S. Hybrid Path Planning for Efficient Data Collection in UAV-Aided WSNs for Emergency Applications. *Sensors*. 2021. Vol. 21, no. 8. P. 2839. DOI: <https://doi.org/10.3390/s21082839>.

117. Razzaq M., Shin S. Fuzzy-Logic Dijkstra-Based Energy-Efficient Algorithm for Data Transmission in WSNs. *Sensors*. 2019. Vol. 19, no. 5. P. 1040. URL: <https://doi.org/10.3390/s19051040>.

118. Research on aircraft route planning optimization problem with multi-constraints and dual-targets / Q. Zhang et al. *Journal of Mathematics in Industry*. 2020. Vol. 10, no. 1. DOI: <https://doi.org/10.1186/s13362-020-00094-0>.

119. Robustness analysis of distributed kalman filter for estimation in sensor networks / B. Lian et al. *IEEE transactions on cybernetics*. 2021. P. 1–12. URL: <https://doi.org/10.1109/tcyb.2021.3082157>.

120. Sensor placement optimization for critical-grid coverage problem of indoor positioning / H. Wu et al. *International journal of distributed sensor networks*. 2020. Vol. 16, no. 12. P. 155014772097992. URL: <https://doi.org/10.1177/1550147720979922>.

121. Solving 0-1 knapsack problem by greedy degree and expectation efficiency / J. Lv et al. *Applied Soft Computing*. 2016. Vol. 41. P. 94–103. URL: <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2015.11.045>.
122. Sparks D. MEMS pressure and flow sensors for automotive engine management and aerospace applications. *MEMS for Automotive and Aerospace Applications*. 2013. P. 78–105. URL: <https://doi.org/10.1533/9780857096487.1.78>.
123. Storr W. Temperature sensor types for temperature measurement. URL: https://www.electronics-tutorials.ws/io/io_3.html.
124. Survivability evaluation model for wireless sensor network under multiple attacks / Z.-f. Liu et al. *Computer science*. 2018. Vol. 44, no. 8.
125. Thein M. C. M., Thein T. A framework for secure and survivable wireless sensor networks. *Economics and applied informatic*. 2009.
126. Wang H., Mao W., Eriksson L. A Three-Dimensional Dijkstra's algorithm for multi-objective ship voyage optimization. *Ocean engineering*. 2019. Vol. 186. P. 106131. URL: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.106131>.
127. Williams H. Logic and integer programming. Springer, 2009. 144 p.
128. Xiong Y., Li J., Lu M. Critical Location Spatial-Temporal Coverage Optimization in Visual Sensor Network. *Sensors*. 2019. Vol. 19, no. 19. P. 4106. URL: <https://doi.org/10.3390/s19194106>.
129. Yuldashev M. N., Vlasov A. I., Novikov A. N. Energy-efficient algorithm for classification of states of wireless sensor network using machine learning methods. *Journal of Physics: Conference Series*. 2018. Vol. 1015. P. 032153. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1015/3/032153>.
130. Zhang Y., Xin J. Survivable deployments of optical sensor networks against multiple failures and disasters: a survey. *Sensors*. 2019. Vol. 19, no. 21. P. 4790. URL: <https://doi.org/10.3390/s19214790>.
131. Zhong C., Worboys M. Energy-efficient continuous boundary monitoring in sensor networks. 2021.

ДОДАТОК А

Список опублікованих праць за темою дисертації

Статті у наукових фахових виданнях України:

(які входять до переліку МОН України)

1. Development of a modification of the method for constructing energy-efficient sensor networks using static and dynamic sensors / V. Petrivskyi et al. *Eastern-European journal of enterprise technologies*. 2022. Vol. 1, no. 9(115). P. 15–23. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.252988> (Scopus).
2. Information technology to ensure the survivability of sensor networks / V. Y. Petrivskyi et al. *Problems in programming*. 2021. No. 4. P. 062–069. ISSN 1727-4907. URL: <https://doi.org/10.15407/pp2021.04.062>.
3. Петрівський В., Шевченко В., Бражиненко М. Збільшення часу роботи датчиків шляхом регулювання енерговитрат. *Системи обробки інформації*. 2019. № 3(158). С. 36–41. ISSN 1681-7710. URL: <https://doi.org/10.30748/soi.2019.158.04>.

Статті в іноземних виданнях:

(статті у періодичних наукових виданнях, проіндексованих у базах даних Web of Science Core Collection та/або Scopus (крім видань держави, визнаної Верховною Радою України державою-агресором))

4. Petrivskyi V., Bychkov O., Martsenyuk V. Proving the existence of solutions to the problems of minimizing the energy consumption of sensor networks. *Applied sciences*. 2022. Vol. 12, no. 15. P. 7687. URL: <https://doi.org/10.3390/app12157687> (Scopus, Q2).
5. A method for maximum coverage of the territory by sensors with minimization of cost and assessment of survivability / V. Petrivskyi et al. *Applied sciences*. 2022. Vol. 12, no. 6. P. 3059. URL: <https://doi.org/10.3390/app12063059> (Scopus, Q2).
6. Models and information technologies of coverage of the territory by sensors with energy consumption optimization / V. Petrivskyi et al. *Mathematical modeling and*

simulation of systems. MODS 2021. Lecture notes in networks and systems. 2022. Vol. 344. P. 17–30 (Scopus).

7. Information Technology for Big Data Sensor Networks Stability Estimation / V. Petrivskyi et al. *Information & Security: An International Journal*. 2020. Vol. 47, no. 1. P. 141–154. URL: <https://doi.org/10.11610/isij.4710>.

Одноосібний розділ у монографії:

8. Петрівський В. Збільшення часу роботи датчиків небезпечних ситуацій шляхом регулювання енерговитрат. *Прикладні програмні технології ІоЕ, як фундамент BigData: монографія* / ред. В. Шевченко. Київ, 2021. С. 172–176.

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

9. Оптимізація траєкторії руху датчиків з урахуванням важливості ділянок території моніторингу та ймовірності виявлення об'єктів / В. Петрівський та ін. *Проблеми керування та інформатики*. 2022. № 2. С. 6–22. URL: <http://doi.org/10.34229/2786-6505-2022-2-1> (Категорія «А»).

10. Інформаційна технологія покриття території датчиками із заданим рівнем перетину та мінімізацією витрат / В. Петрівський та ін. *Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка*. 2020. № 68. С. 65–72. ISSN 2524-0056. URL: <https://doi.org/10.17721/2519-481X/2020/68-07>.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

11. The concept of systems survivability in the Internet of Everything case / V. Petrivskyi et al. *MSTIoE 2021-8. 8-ма Східно-Європейська конференція “Математичні та програмні технології Internet of Everything”*, Київ, 2021. P. 16–18.

12. Petrivskyi V., Shevchenko V., Vyckov O. Mathematical modeling of random motion of IoE sensors based on rectilinear motion. *MSTIoE 2020-1 6-th East*

European Conference on Mathematical Foundations and Software Technology of Internet of Everything, Київ, 2020. P. 93.

13. Information technology for determining the optimal sensor trajectory in already covered area case / V. Petrivskyi et al. *MITAV 2020. The international conference of mathematics, information technologies and applied sciences*, Brno, 17–18 June 2020. Brno, 2020, ISBN 978-80-7582-307-6.

14. Models and information technologies of coverage of the territory by sensors with energy consumption optimization / V. Petrivskyi et al. *Математичне та імітаційне моделювання систем: МОДС 2021: тези доповідей Шістнадцятої міжнародної науково-практичної конференції*, Чернігів, 28 June – 1 July 2021. Чернігів, 2021. P. 30–33.

15. CAD technology for optimal territory covering / V. Petrivskyi et al. *2021 IEEE 16th International Conference on the Experience of Designing and Application of CAD Systems (CADSM)*, Lviv, Ukraine, 22–26 February 2021. 2021. URL: <https://doi.org/10.1109/cadsm52681.2021.9385223>. (Scopus)

16. Огляд поняття живучості систему контексті концепції Інтернету всього / В. Петрівський та ін. *Інформаційні технології –2021 : зб. тез VIII Всеукр. науково-практ. конф. молодих науковців*, м. Київ, 20 трав. 2021 р. Київ, 2021. С. 133–134.

17. Petrivskyi V., Pyzh O. A smart dust technology structure and applications overview. *Information Technology and Interactions (Satellite) : Conference Proceedings*, Kyiv, 2 December 2021 / ed. by V. Snytyuk. Kyiv, 2021. P. 120–122.

18. Information Technology for Big Data Sensor Networks Stability Estimation / V. Petrivskyi et al. *Information & Security: An International Journal* 47, Varna, 30 September – 2 October 2020. Varna, 2020. P. 141–154.

19. Information Technology of the Increasing Sensors Term of Use Considering Their Movement / V. Petrivskyi et al. *2020 IEEE XVIth International Conference on the Perspective Technologies and Methods in MEMS Design (MEMSTECH)*, Lviv, Ukraine, 22–26 April 2020. 2020. URL: <https://doi.org/10.1109/memstech49584.2020.9109431>. (Scopus)

20. Петрівський В., Шевченко В. Переваги використання мобільних мереж п'ятого покоління у концепції інтернету речей. *Всеукраїнська науково-технічна конференція «Застосування програмного забезпечення в інфокомунікаційних технологіях»*. Збірник тез, м. Київ, 9 лют. 2020 р. Київ, 2020. С. 38.

21. Estimation of Noise Hazards in Environmental Monitoring Tools Design in the Subway / V. Petrivskyi et al. *2019 IEEE 15th International Conference on the Experience of Designing and Application of CAD Systems (CADSM)*, Polyana, Ukraine, 26 February – 2 March 2019. 2019. URL: <https://doi.org/10.1109/cadsm.2019.8779315>. (Scopus).

Відомості про апробацію результатів дисертації

1. «Математичне та імітаційне моделювання систем. MODS 2021», Національний університет «Чернігівська політехніка», 28 червня – 1 липня 2021 р., Чернігів, Україна.

2. 16th International Conference on the Experience of Designing and Application of CAD Systems (CADSM 2021), Національний університет «Львівська Політехніка», 22–26 лютого 2021 р., Львів, Україна.

3. VIII Всеукраїнська науково-практична конференція молодих науковців, Київський університет імені Бориса Грінченка, 20 травня 2021р., Київ, Україна.

4. 8-ма Східно-Європейська конференція «Математичні та програмні технології Internet of Everything», 2021, Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна.

5. Information Technology and Interactions (Satellite), Київський національний університет імені Тараса Шевченка, 2 грудня, 2021 р., Київ, Україна.

6. Second International Scientific Conference «Digital Transformation, Cyber Security and Resilience» (DIGILIENCE 2020), Nikola Vaptsarov Naval Academy (Військово-морська академія ім. Ніколи Вапцарова), 30 вересня – 2 жовтня 2020 р., Варна, Болгарія.

7. XVI-th International Conference Perspective technologies and methods in MEMS design (MEMSTECH 2020), Національний університет «Львівська Політехніка», 22 – 26 квітня 2020 р., Львів, Україна.

8. Всеукраїнська науково-технічна конференція «Застосування програмного забезпечення в інфокомунікаційних технологіях», Державний університет телекомунікацій, 5 лютого 2020 р., Київ, Україна.

9. 6-та Східно-Європейська конференція “Математичні та програмні технології Internet of Everything”, 2020, Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна.

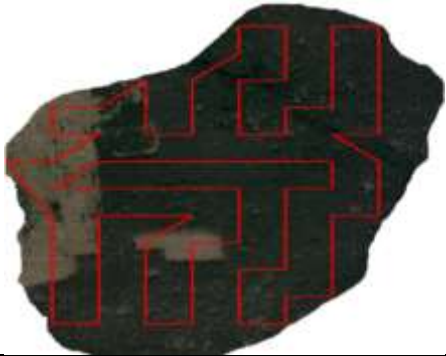
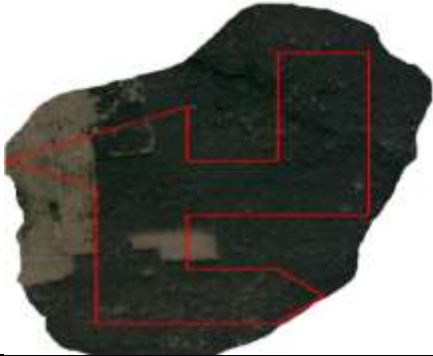




10. MITAV 2020. The international conference of mathematics, information technologies and applied sciences, Union of Czech Mathematicians and Physicists, Brno branch, 17–18 червня 2020 р., Брно, Чехія.

11. 15th International Conference on the Experience of Designing and Application of CAD Systems (CADSM 2019), Національний університет «Львівська Політехніка», 26 лютого – 2 березня 2019 р., Поляна-Свалява, Україна.



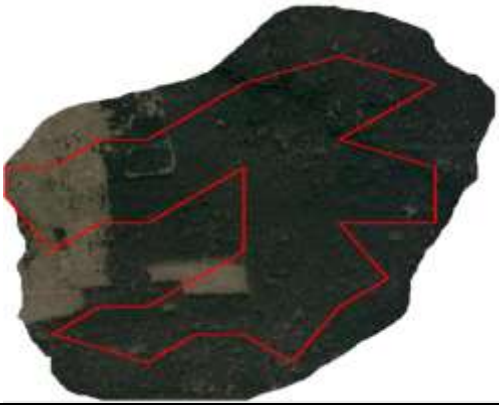
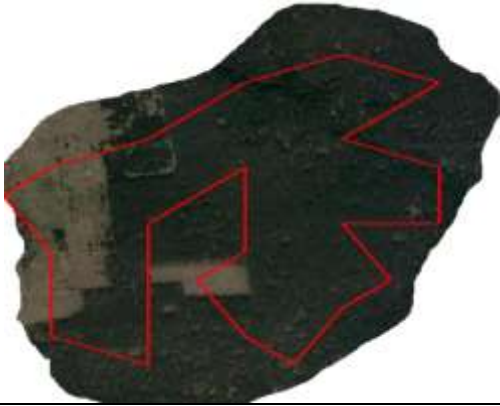


ДОДАТОК Б

Траєкторії при різних вхідних параметрах (крок h , значення можливої цінності виявлених об'єктів IP , довжина траєкторії, витрачений час на побудову траєкторії)

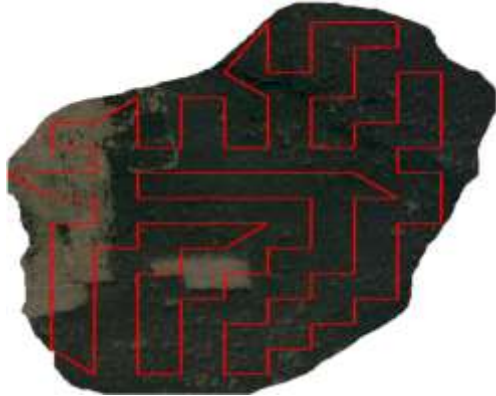

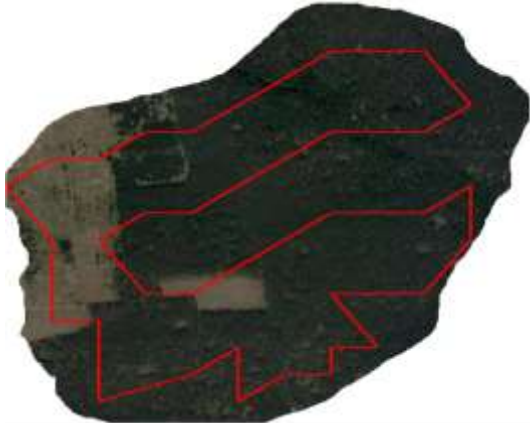
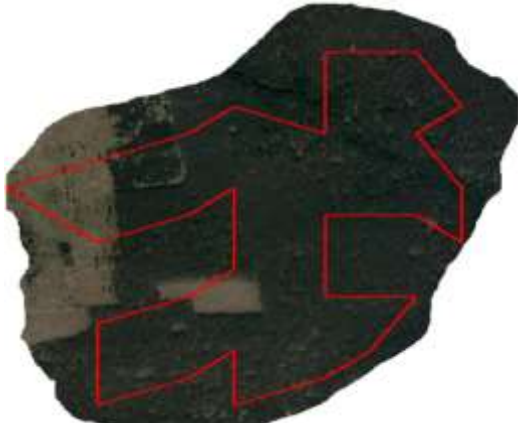


Таблиця Б.1 – Результат побудови траєкторій при різних вхідних параметрах

Крок $h = 60$	
	
$IP = 1$, довжина траєкторії = 5143.28, витрачений час на побудову траєкторії = 1658ms	$IP = 0.9$, довжина траєкторії = 2552.19, витрачений час на побудову траєкторії = 1156ms
	
$IP = 0.7$, довжина траєкторії = 2475.08, витрачений час на побудову траєкторії = 2853ms	$IP = 0.5$, довжина траєкторії = 2363.26, витрачений час на побудову траєкторії = 1178ms
	
$IP = 0.3$, довжина траєкторії = 1800.4, витрачений час на побудову траєкторії = 3170ms	$IP = 0.1$, довжина траєкторії = 1800.4, витрачений час на побудову траєкторії = 2804ms

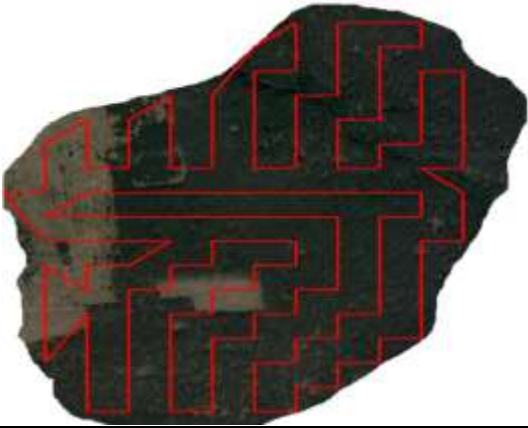
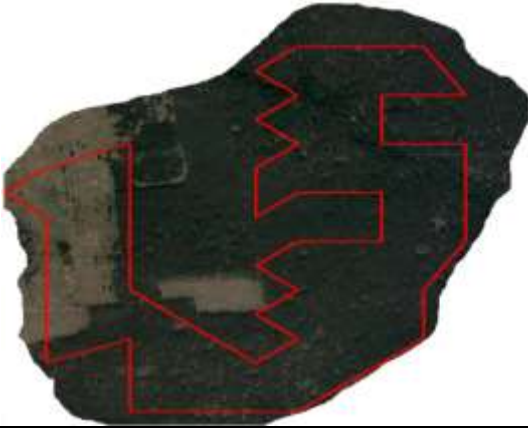




Таблиця Б.2 – Результат побудови траєкторій при різних вхідних параметрах

Крок $h = 55$	
	
$IP = 1$, довжина траєкторії = 5494.47, витрачений час на побудову траєкторії = 1920ms	$IP = 0.9$, довжина траєкторії = 3125.14, витрачений час на побудову траєкторії = 1179ms
	
$IP = 0.7$, довжина траєкторії = 2664.83, витрачений час на побудову траєкторії = 3004ms	$IP = 0.5$, довжина траєкторії = 2709.67, витрачений час на побудову траєкторії = 1186ms
	
$IP = 0.3$, довжина траєкторії = 2180.73, витрачений час на побудову траєкторії = 3127ms	$IP = 0.1$, довжина траєкторії = 2018.92, витрачений час на побудову траєкторії = 1168ms

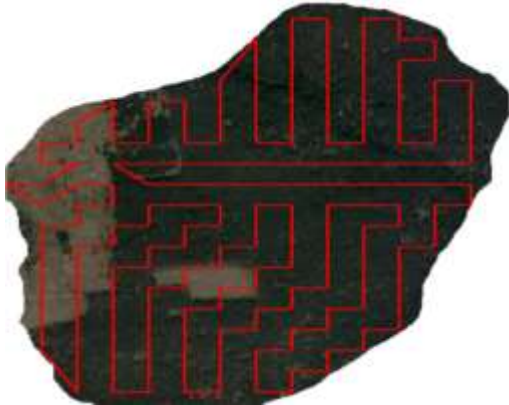





Таблиця Б.3 – Результат побудови траєкторій при різних вхідних параметрах

Крок $h = 50$	
	
$IP = 1$, довжина траєкторії = 7092.34, витрачений час на побудову траєкторії = 12757ms	$IP = 0.9$, довжина траєкторії = 3241.04, витрачений час на побудову траєкторії = 3175ms
	
$IP = 0.7$, довжина траєкторії = 3102.19, витрачений час на побудову траєкторії = 3003ms	$IP = 0.5$, довжина траєкторії = 2854.43, витрачений час на побудову траєкторії = 3184ms
	
$IP = 0.3$, довжина траєкторії = 2097.06, витрачений час на побудову траєкторії = 3175ms	$IP = 0.1$, довжина траєкторії = 2012.3, витрачений час на побудову траєкторії = 2531ms

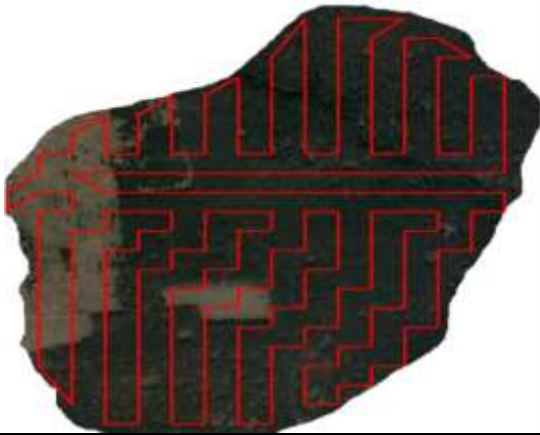
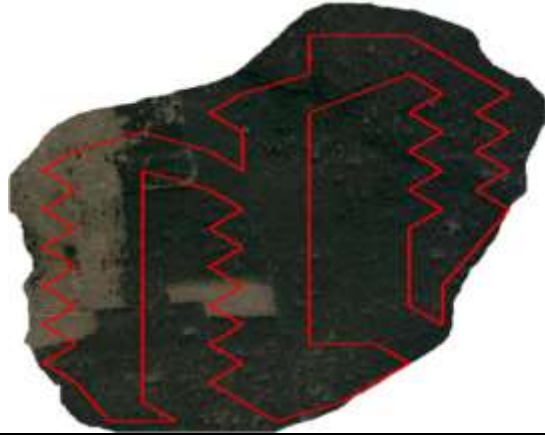
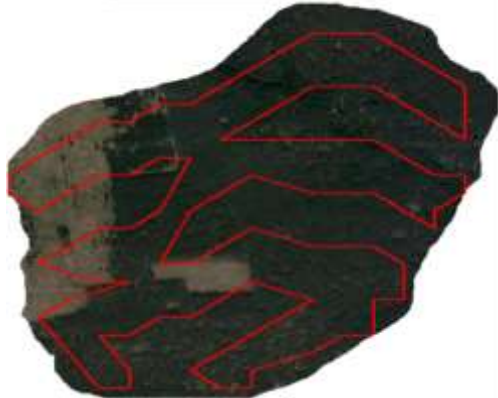

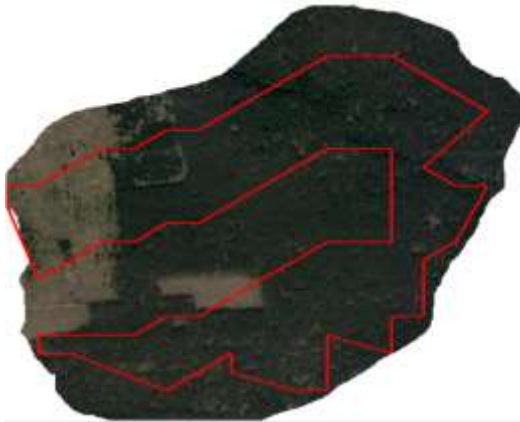

Таблиця Б.4 – Результат побудови траєкторій при різних вхідних параметрах

Крок $h = 45$	
	
$IP = 1$, довжина траєкторії = 7092.34, витрачений час на побудову траєкторії = 12757ms	$IP = 0.9$, довжина траєкторії = 3501.64, витрачений час на побудову траєкторії = 3405ms
	
$IP = 0.7$, довжина траєкторії = 3456.02, витрачений час на побудову траєкторії = 3209ms	$IP = 0.5$, довжина траєкторії = 3257.61, витрачений час на побудову траєкторії = 3144ms
	
$IP = 0.3$, довжина траєкторії = 2645.69, витрачений час на побудову траєкторії = 2631ms	$IP = 0.1$, довжина траєкторії = 2455.82, витрачений час на побудову траєкторії = 3076ms

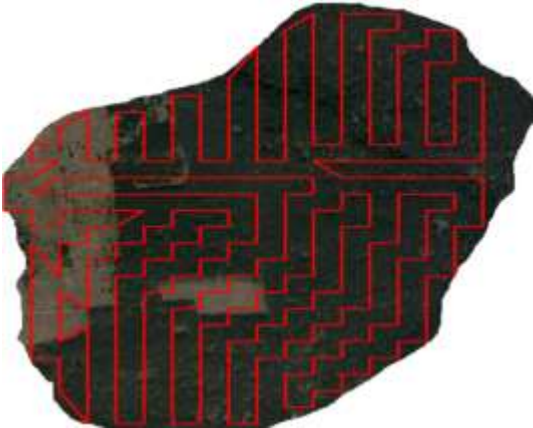





Таблиця Б.5 – Результат побудови траєкторій при різних вхідних параметрах

Крок $h = 40$	
	
$IP = 1$, довжина траєкторії = 7901.72, витрачений час на побудову траєкторії = 15408ms	$IP = 0.9$, довжина траєкторії = 3958.41, витрачений час на побудову траєкторії = 3772ms
	
$IP = 0.7$, довжина траєкторії = 3894.59, витрачений час на побудову траєкторії = 2977ms	$IP = 0.5$, довжина траєкторії = 3838.69, витрачений час на побудову траєкторії = 3393ms
	
$IP = 0.3$, довжина траєкторії = 2993.6, витрачений час на побудову траєкторії = 3282ms	$IP = 0.1$, довжина траєкторії = 2909.08, витрачений час на побудову траєкторії = 3145ms

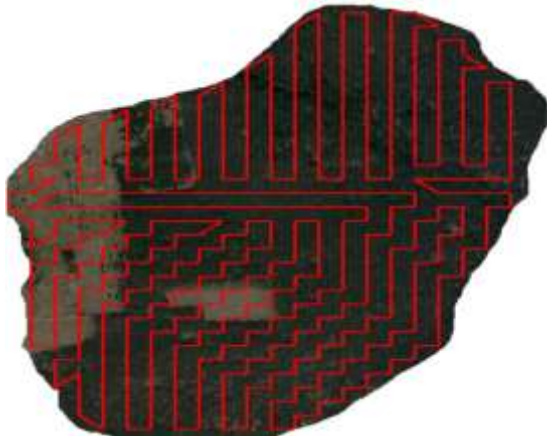



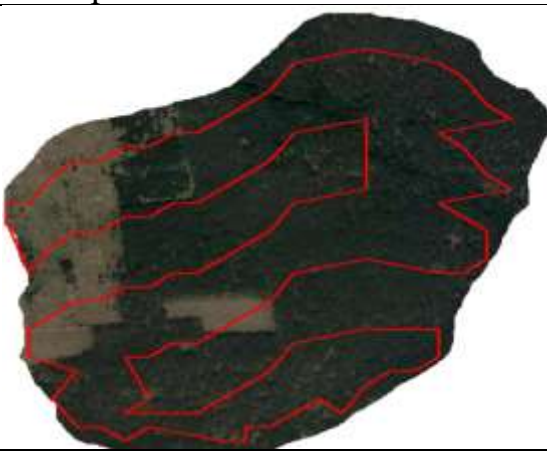
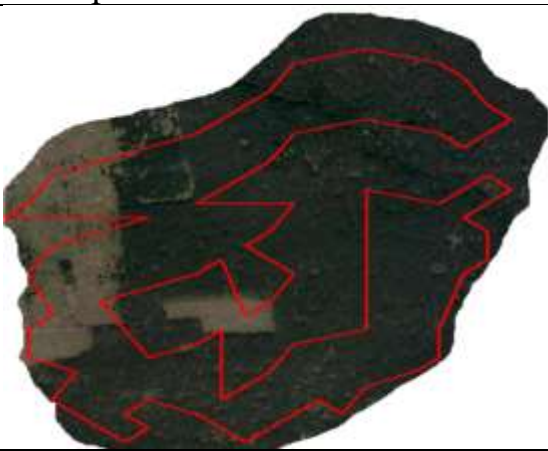
Таблиця Б.6 – Результат побудови траєкторій при різних вхідних параметрах

Крок $h = 35$	
	
$IP = 1$, довжина траєкторії = 9092.5, витрачений час на побудову траєкторії = 38758ms	$IP = 0.9$, довжина траєкторії = 4612.66, витрачений час на побудову траєкторії = 4929ms
	
$IP = 0.7$, довжина траєкторії = 4468.60, витрачений час на побудову траєкторії = 5728ms	$IP = 0.5$, довжина траєкторії = 4207.35, витрачений час на побудову траєкторії = 4156ms
	
$IP = 0.3$, довжина траєкторії = 3175.83, витрачений час на побудову траєкторії = 2845ms	$IP = 0.1$, довжина траєкторії = 2991.53, витрачений час на побудову траєкторії = 3237ms

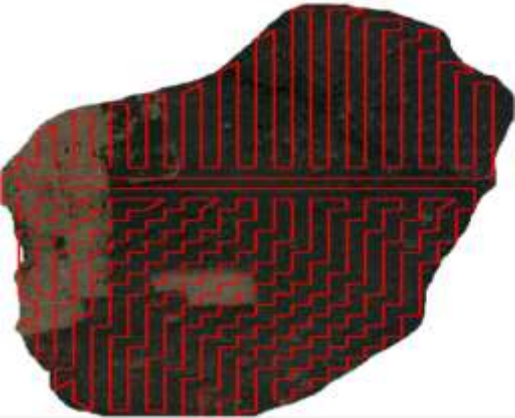

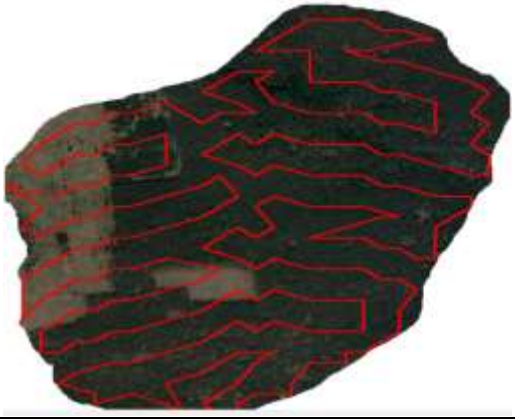

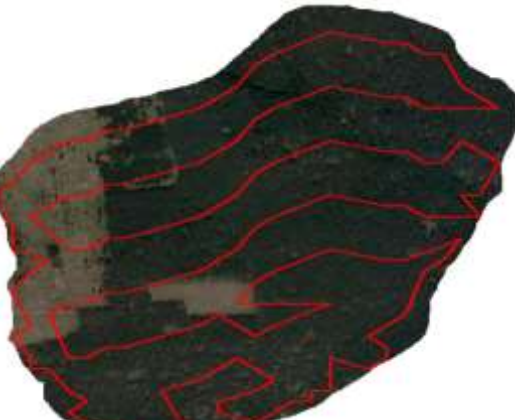

Таблиця Б.7 – Результат побудови траєкторій при різних вхідних параметрах

Крок $h = 30$	
	
$IP = 1$, довжина траєкторії = 10590.65, витрачений час на побудову траєкторії = 170767ms	$IP = 0.9$, довжина траєкторії = 5909,49, витрачений час на побудову траєкторії = 16717ms
	
$IP = 0.7$, довжина траєкторії = 4813.82, витрачений час на побудову траєкторії = 6764ms	$IP = 0.5$, довжина траєкторії = 4581,67, витрачений час на побудову траєкторії = 6577ms
	
$IP = 0.3$, довжина траєкторії = 3501.49, витрачений час на побудову траєкторії = 4091ms	$IP = 0.1$, довжина траєкторії = 3383,07, витрачений час на побудову траєкторії = 3413ms

Таблиця Б.8 – Результат побудови траєкторій при різних вхідних параметрах

Крок $h = 25$	
	
$IP = 1$, довжина траєкторії = 12551.04, витрачений час на побудову траєкторії = 384596ms	$IP = 0.9$, довжина траєкторії = 6306.06, витрачений час на побудову траєкторії = 7749ms
	
$IP = 0.7$, довжина траєкторії = 6051.38, витрачений час на побудову траєкторії = 31256ms	$IP = 0.5$, довжина траєкторії = 5554.64, витрачений час на побудову траєкторії = 7071ms
	
$IP = 0.3$, довжина траєкторії = 4048.99, витрачений час на побудову траєкторії = 7355ms	$IP = 0.1$, довжина траєкторії = 4269.86, витрачений час на побудову траєкторії = 2151ms

Таблиця Б.9 – Результат побудови траєкторій при різних вхідних параметрах

Крок $h = 20$	
	
$IP = 1$, довжина траєкторії = 15880.83, витрачений час на побудову траєкторії = 1661876ms (27.6 minutes)	$IP = 0.9$, довжина траєкторії = 8635.93, витрачений час на побудову траєкторії = 84102ms
	
$IP = 0.7$, довжина траєкторії = 7199.22, витрачений час на побудову траєкторії = 86077ms	$IP = 0.5$, довжина траєкторії = 7096.85, витрачений час на побудову траєкторії = 29061ms
	
$IP = 0.3$, довжина траєкторії = 5070.75, витрачений час на побудову траєкторії = 19520ms	$IP = 0.1$, довжина траєкторії = 4870.31, витрачений час на побудову траєкторії = 5798ms

ДОДАТОК В

Значення довжин траєкторій $L(S)$, кількості об'єктів території $RC(E,V)$, ефективності Eff та виграшу ефективності \overline{Eff} для різних значень кроку h .

Таблиця В.1 – Значення $L(S)$, $RC(E,V)$, Eff та \overline{Eff} для значень кроку $h = 60$

Крок $h = 60$					
Клас можливої цінності виявлених об'єктів	Відмінність однорідності	$L(S)$	$RC(E,V)$	Ефективність	Виграш ефективності
IP1	0	5143,28	19,44284581	100%	0%
IP0,9	0,1	2552,19	39,18203582	202%	102%
IP0,7	0,3	2475,08	40,40273446	208%	108%
IP0,5	0,5	2363,26	42,31443007	218%	118%
IP0,3	0,7	1903,45	52,5361843	270%	170%
IP0,1	0,9	1800,4	55,54321262	286%	186%

Таблиця В.2 – Значення $L(S)$, $RC(E,V)$, Eff та \overline{Eff} для значень кроку $h = 55$

Крок $h = 55$					
Клас можливої цінності виявлених об'єктів	Відмінність однорідності	$L(S)$	$RC(E,V)$	Ефективність	Виграш ефективності
IP1	0	5494,47	18,20011757	100%	0%
IP0,9	0,1	3125,14	31,99856646	176%	76%
IP0,7	0,3	2664,3	37,53331081	206%	106%
IP0,5	0,5	2709,67	36,90486295	203%	103%
IP0,3	0,7	2180,73	45,85620412	252%	152%
IP0,1	0,9	2018,92	49,53143265	272%	172%

Таблиця В.3 – Значення $L(S)$, $RC(E, V)$, Eff та \overline{Eff} для значень кроку $h = 50$

Крок $h = 50$					
Клас можливої цінності виявлених об'єктів	Відмінність однорідності	$L(S)$	$RC(E, V)$	Ефективність	Виграш ефективності
IP1	0	6186,06	16,16537829	100%	0%
IP0,9	0,1	3241,04	30,85429368	191%	91%
IP0,7	0,3	3102,19	32,23529184	199%	99%
IP0,5	0,5	2854,43	35,03326408	217%	117%
IP0,3	0,7	2097,06	47,68580775	295%	195%
IP0,1	0,9	2012,3	49,69437957	307%	207%

Таблиця В.4 – Значення $L(S)$, $RC(E, V)$, Eff та \overline{Eff} для значень кроку $h = 45$

Крок $h = 45$					
Клас можливої цінності виявлених об'єктів	Відмінність однорідності	$L(S)$	$RC(E, V)$	Ефективність	Виграш ефективності
IP1	0	7092,34	14,09971885	100%	0%
IP0,9	0,1	3501,64	28,55804709	203%	103%
IP0,7	0,3	3456,02	28,93501774	205%	105%
IP0,5	0,5	3257,61	30,69735174	218%	118%
IP0,3	0,7	2645,69	37,79732319	268%	168%
IP0,1	0,9	2455,82	40,71959671	289%	189%

Таблиця В.5 – Значення $L(S)$, $RC(E, V)$, Eff та \overline{Eff} для значень кроку $h = 40$

Крок $h = 40$					
Клас можливої цінності виявлених об'єктів	Відмінність однорідності	$L(S)$	$RC(E, V)$	Ефективність	Виграш ефективності
IP1	0	7901,72	12,65547248	100%	0%
IP0,9	0,1	3958,41	25,2626686	200%	100%
IP0,7	0,3	3894,59	25,67664375	203%	103%
IP0,5	0,5	3838,69	26,0505537	206%	106%
IP0,3	0,7	2993,6	33,40459647	264%	164%
IP0,1	0,9	2909,08	34,37512891	272%	172%

Таблиця В.6 – Значення $L(S)$, $RC(E, V)$, Eff та \overline{Eff} для значень кроку $h = 35$

Крок $h = 35$					
Клас можливої цінності виявлених об'єктів	Відмінність однорідності	$L(S)$	$RC(E, V)$	Ефективність	Виграш ефективності
IP1	0	9092,5	10,99807534	100%	0%
IP0,9	0,1	4612,66	21,67946478	197%	97%
IP0,7	0,3	4468,6	22,37837354	203%	103%
IP0,5	0,5	4207,35	23,76792993	216%	116%
IP0,3	0,7	3175,83	31,48783153	286%	186%
IP0,1	0,9	2991,53	33,4277109	304%	204%

Таблиця В.7 – Значення $L(S)$, $RC(E, V)$, Eff та \overline{Eff} для значень кроку $h = 30$

Крок $h = 30$					
Клас можливої цінності виявлених об'єктів	Відмінність однорідності	$L(S)$	$RC(E, V)$	Ефективність	Виграш ефективності
IP1	0	10590,6	9,442291078	100%	0%
IP0,9	0,1	5909,49	16,92193404	179%	79%
IP0,7	0,3	4813,82	20,7735229	220%	120%
IP0,5	0,5	4581,67	21,82610271	231%	131%
IP0,3	0,7	3501,49	28,55927048	302%	202%
IP0,1	0,9	3383,07	29,55895089	313%	213%

Таблиця В.8 – Значення $L(S)$, $RC(E, V)$, Eff та \overline{Eff} для значень кроку $h = 25$

Крок $h = 25$					
Клас можливої цінності виявлених об'єктів	Відмінність однорідності	$L(S)$	$RC(E, V)$	Ефективність	Виграш ефективності
IP1	0	12551,04	7,967467238	100%	0%
IP0,9	0,1	6306,06	15,85776222	199%	99%
IP0,7	0,3	6051,38	16,52515625	207%	107%
IP0,5	0,5	5554,64	18,00296689	226%	126%
IP0,3	0,7	4048,99	24,69751716	310%	210%
IP0,1	0,9	4269,86	23,41997161	294%	194%

Таблиця В.9 – Значення $L(S)$, $RC(E, V)$, Eff та \overline{Eff} для значень кроку $h = 20$

Крок $h = 20$					
Клас можливої цінності виявлених об'єктів	Відмінність однорідності	$L(S)$	$RC(E, V)$	Ефективність	Виграш ефективності
IP1	0	15880,83	6,296900099	100%	0%
IP0,9	0,1	8635,93	11,57952878	184%	84%
IP0,7	0,3	7199,22	13,89039368	221%	121%
IP0,5	0,5	7096,85	14,09075858	224%	124%
IP0,3	0,7	5070,75	19,72094858	313%	213%
IP0,1	0,9	4870,31	20,5325739	326%	226%

ДОДАТОК Г



НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ І ГЛОБАЛЬНОГО ІНФОРМАЦІЙНОГО ПРОСТОРУ

Чоколівський бульвар, 13, м. Київ, 03186, тел/факс (044) 245-88-38, тел. 245-87-97
E-mail: itgis@nas.gov.ua

26.10.2012 № *161/26.10.12-д* На № _____ від _____

Національна академія наук України
Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

Метод визначення оптимальних параметрів сенсорних мереж, розроблений та поданий у дисертаційному дослідженні «Моделі та методи програмованої оптимізації структури сенсорних мереж» здобувачем кафедри програмних систем і технологій факультету інформаційних технологій Київського національного університету імені Тараса Шевченка Петрівського Володимира Ярославовича з галузі знань 12 – Інформаційні технології за спеціальністю 121 – Інженерія програмного забезпечення, пройшов дослідну експлуатацію та впровадження в Інституті телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України. Розроблений метод забезпечує енергоефективність та рентабельність сенсорних мереж при максимізації покриття шляхом знаходження пар оптимальних значень радіусів покриття та перетину зон покриття. Особливістю запропонованої та апробованої технології є одночасне врахування критеріїв максимізації покриття, мінімізації енерговитрат та вартості мережі, а також врахування перетину зон покриття датчиків як умови обміну даними між датчиками.

Директор інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України, член-кореспондент Національної академії наук України, доктор технічних наук, професор



Александр Трофимчук
Олександр ТРОФИМЧУК