МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «КИЇВСЬКИЙ АВІАЦІЙНИЙ ІНСТИТУТ»

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

КАШКЕВИЧ СВІТЛАНА ОЛЕКСАНДРІВНА

УДК 621.396.2.019.4

МЕТОД САМООРГАНІЗАЦІЇ ІНФОРМАЦІЙНИХ МЕРЕЖ В УМОВАХ ДЕСТАБІЛІЗУЮЧИХ ВПЛИВІВ

122 «Комп’ютерні науки»
12 «Інформаційні технології»
Подається на здобуття ступеня доктора філософії
Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.
_____ С.О. Кашкевич

Науковий керівник
Нечипорук Олена Петрівна,
доктор технічних наук, професор

Київ – 2026

АНОТАЦІЯ

Кашкевич С.О. Метод самоорганізації інформаційних мереж в умовах дестабілізуючих впливів – кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії в галузі знань 12 «Інформаційні технології», за спеціальністю 122 «Комп'ютерні науки». – Державний університет «Київський авіаційний інститут», м. Київ, 2026.

Основним завданням мереж передачі даних, що самоорганізовуються, є: побудова стійкої до відмов мережевої інфраструктури; підвищення використання радіо- та радіочастотного ресурсу; забезпечення адаптації мереж до дії зовнішніх факторів; зменшення вартості розгортання та функціонування інформаційної мережі в порівнянні з класичними принципами побудови.

Децентралізована інформаційна мережа, що самоорганізовується, складається з маршрутизаторів та мобільних пристроїв, які зв'язані між собою та одночасно виконують функції клієнта та маршрутизатора.

Дисертаційна робота присвячена розв'язанню науково-прикладної задачі підвищення оперативності та стійкості самоорганізації інформаційних мереж в умовах дестабілізуючих впливів, зумовлених динамічною зміною топології, обмеженими ресурсами вузлів і наявністю завад у радіоканалі.

Для досягнення поставленої мети у роботі використано комплекс методів дослідження. Методи теорії графів та теорії мереж застосовано для формалізації структури інформаційної мережі та опису процесів маршрутизації між вузлами. Методи теорії масового обслуговування використано для побудови імітаційної моделі вузла та радіоканалу у вигляді систем масового обслуговування, що дозволило адекватно описати процеси доступу до каналу, черги повідомлень та затримки передачі.

Метаевристичні методи оптимізації використано для удосконалення процесу маршрутизації та реалізації механізмів самоорганізації мережі в умовах зміни параметрів функціонування. Методи нечіткої логіки застосовано для

прийняття керувальних рішень за умов неповноти, зашумленості та неточності вхідних даних про стан мережі. Імітаційне моделювання використано для дослідження ефективності запропонованих рішень та отримання кількісних показників роботи мережі.

Ефективність розробленого методу оцінювалася за показниками пропускної спроможності мережі, середнього часу затримки передачі повідомлень, ефективності використання службової інформації та часу доступу до радіоканалу. Отримані результати підтверджують доцільність використання запропонованого методу для підвищення оперативності самоорганізації інформаційних мереж у складних умовах функціонування.

У межах даного дослідження інформаційна безпека розглядається з позицій забезпечення стійкого та безперервного обміну інформацією між вузлами мережі за умов дестабілізуючих впливів. Такий підхід відповідає сучасним вимогам до інформаційних систем, де першочергове значення мають доступність інформаційних ресурсів і здатність мережі підтримувати працездатність у складних умовах експлуатації.

Розроблено комплексну модель функціонування інформаційних мереж, яка за рахунок використання удосконаленого алгоритму оптимізації нечіткої логіки, дозволяє забезпечити адаптивний вибір маршрутів у реальному часі при змінній топології та наявності завад. Модель враховує у комплексі навмисні завади адитивного та мультиплікативного характеру, дестабілізуючі фактори, що обумовлені наявністю кібератак.

Запропоновано метод маршрутизації в інформаційних мережах, що на відміну від існуючих дозволяє підвищити оперативність самоорганізації інформаційних мереж за рахунок підвищення вибору маршруту передачі інформації від вузла відправника до вузла отримувача. В запропонованому методі враховується тип невизначеності та зашумленості даних, реалізовуються адаптивні стратегії самоорганізації; враховуються наявні обчислювальні ресурси системи при здійсненні самоорганізації інформаційних мереж та ін.

Розроблено метод самоорганізації інформаційних мереж в умовах дестабілізуючих впливів, який базується на інтеграції удосконаленого методу маршрутизації та комплексної математичної моделі, що описує процеси функціонування мережі на канальному та мережевому рівнях. Метод забезпечує адаптивну перебудову маршрутів передачі даних і параметрів роботи вузлів з урахуванням зашумленості радіоканалу, динаміки топології, обмежених обчислювальних ресурсів і впливу завад, що дозволяє підвищити стійкість, оперативність і надійність функціонування інформаційної мережі.

Адекватність та достовірність наукових результатів, підтверджується використанням адекватного та апробованого математичного апарату, коректністю математичних розрахунків та збіжністю отриманих результатів до відомих в окремих випадках. Також адекватність та достовірність отриманих результатів підтверджується результатами математичного моделювання.

Отримані результати дисертації мають практичну цінність і впроваджені в діяльність ТОВ «ВАТ Олімп», під час створення складової частини інформаційної системи спеціального призначення, ТОВ «ФЛАЙ-ГРУП Україна», під час створення інформаційної системи обробки різнотипних даних, а також в навчальному процесі кафедри комп’ютерних систем механічного факультету Харківського національного автомобільно-дорожнього університету, в навчальному процесі кафедри інтелектуальних кібернетичних систем факультету комп’ютерних наук та технологій Національного авіаційного університету та в держбюджетній науково-дослідній роботі Харківського національного автомобільно-дорожнього університету.

Ключові слова: самоорганізація, сигнал, інформаційна безпека, алгоритм, бездротова мережа, системи зв'язку, передані дані, вузол, стандарт, обробка даних, IEEE 802.11, нечітка логіка, ZigBee, математичне моделювання, OSI, модель управління, швидкість передачі, багатошляхова маршрутизація, WSN.

ANNOTATION

Kashkevych, S. Method of information networks self-organization under destabilizing impacts. This is a qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in speciality 122 «Computer Science». – State University «Kyiv Aviation Institute», Kyiv, 2026.

The main tasks of self-organising data transmission networks are: building a fault-tolerant network infrastructure; increasing the use of radio and radio frequency resources; ensuring the adaptation of networks to external factors; reducing the cost of deploying and operating an information network compared to traditional construction principles.

The main tasks of self-organising data transmission networks are: building a fault-tolerant network infrastructure; increasing the use of radio and radio frequency resources; ensuring the adaptation of networks to external factors; reducing the cost of deploying and operating an information network compared to traditional construction principles.

A decentralised, self-organising information network consists of routers and mobile devices that are interconnected and simultaneously perform the functions of a client and a router.

The dissertation is devoted to solving the scientific and applied problem of increasing the efficiency and stability of self-organisation of information networks in conditions of destabilising influences caused by dynamic changes in topology, limited node resources and the presence of interference in the radio channel.

To achieve the set goal, a set of research methods was used in the work. Methods of graph theory and network theory were applied to formalise the structure of the information network and describe the routing processes between nodes. Methods of queuing theory were used to construct a simulation model of a node and radio channel in the form of queuing systems, which made it possible to adequately describe the processes of channel access, message queues, and transmission delays.

Metaheuristic optimisation methods were used to improve the routing process and implement network self-organisation mechanisms under changing operating parameters. Fuzzy logic methods were used to make management decisions under conditions of incompleteness, noise and inaccuracy of input data on the network status. Simulation modelling is used to study the effectiveness of the proposed solutions and obtain quantitative indicators of network performance.

The effectiveness of the developed method was evaluated based on network throughput, average message transmission delay, service information utilisation efficiency, and radio channel access time. The results confirm the feasibility of using the proposed method to improve the efficiency of information network self-organisation in complex operating conditions.

Within the scope of this study, information security is considered from the perspective of ensuring stable and continuous information exchange between network nodes under conditions of destabilising influences. This approach meets modern requirements for information systems, where the availability of information resources and the ability of the network to maintain operability under difficult operating conditions are of paramount importance.

A comprehensive model of information network functioning has been developed, which, through the use of an improved fuzzy logic optimisation algorithm, allows for adaptive route selection in real time with variable topology and interference. The model takes into account a combination of intentional additive and multiplicative interference, as well as destabilising factors caused by cyber attacks.

A routing method in information networks is proposed, which allows to increase the efficiency of self-organisation of information networks by increasing the efficiency of selecting the route for transmitting information from the sender node to the receiver node. The proposed method takes into account the type of uncertainty and noise in the data, implements adaptive self-organisation strategies, and considers the available computing resources of the system when performing self-organisation of information networks, etc.

A method of self-organisation of information networks under destabilising influences has been developed, which allows for adaptive restructuring of data transmission parameters and routes, taking into account noise, dynamic changes in topology, and limited computing resources of nodes.

The adequacy and reliability of the scientific results obtained personally by the applicant in the course of the dissertation research is confirmed by the use of adequate and proven mathematical apparatus, the correctness of mathematical calculations and the convergence of the results obtained with those known in individual cases. The adequacy and reliability of the results obtained are also confirmed by the results of mathematical modelling.

The results obtained in the dissertation are of practical value and have been implemented in the activities of «VAT Olymp» LLC during the creation of a component of a special-purpose information system, «FLY-GROUP Ukraine» LLC, during the creation of an information system for processing different types of data, as well as in the educational process of the Department of Computer Systems of the Faculty of Mechanical Engineering of the Kharkiv National Automobile and Highway University, in the educational process of the Department of Intelligent Cybernetic Systems of the Faculty of Computer Science and Technology of the National Aviation University, and in the state-funded research work of Kharkiv National Automobile and Highway University.

Keywords: self-organisation, signal, information security, algorithm, wireless network, communication systems, transmitted data, node, standard, data processing, IEEE 802.11, fuzzy logic, ZigBee, mathematical modeling, OSI, control model, transmission speed, multipath routing, WSN.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

Статті у наукових фахових виданнях України:

1. Плєхова Г. А., Неронов С. М., Костікова М.В., Кашкевич С. О. Удосконалення моделі безпечної маршрутизації в програмно-конфігурованих мережах. ХНУРЕ. *Біоніка інтелекту.* 2024. *No* 1 (100). С. 50–57. *DOI*: https://doi.org/10.30837/bi.2024.1(100).07.

Особистий внесок автора: алгоритмічна реалізація удосконаленої моделі безпечної маршрутизації, проведення обчислювальних експериментів.

Особистий внесок *Плєхової Г.А.:* постановка наукової проблеми.

Особистий внесок *Неронова С.М.:* побудова математичного апарату.

Особистий внесок *Костікової М.В.*: огляд літератури, підбір і систематизація даних щодо загроз у *SDN*.

Статті у наукових виданнях України:
(статті у періодичних наукових виданнях, проіндексованих у базах даних Web of Science Core Collection та/або Scopus)

1. Mamoori, G. A., Sova, O., Zhuk, O., Repilo, I., Melnyk, B., Sus, S., Bondarchuk, M., Kashkevich, S., Moroz, M., & Klyuchak, O. The development of solution search method using improved jumping frog algorithm. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2023, *Vol.* 4, *No.* 3 (124), *pp.* 45–53. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.285292

Особистий внесок автора: реалізація алгоритму в програмному середовищі, симуляційні експерименти, аналіз отриманих результатів.

Особистий внесок Mamoori G.A.: постановка проблеми, огляд літератури, формулювання гіпотези дослідження.

Особистий внесок Sova O.: наукове керівництво, загальна методологія дослідження, редагування тексту.

Особистий внесок Zhuk O.: забезпечення математичного апарату моделювання, участь у розробці алгоритму.

Особистий внесок Repilo I.: постановка задач прикладного використання.

Особистий внесок Melnyk B.: моделювання експериментальних умов, аналіз результатів.

Особистий внесок Sus S.: підготовка даних для експериментів, допомога у валідації моделі.

Особистий внесок Bondarchuk M.: побудова тестових сценаріїв та їх перевірка.

2. *Tamer, K. A., Sova, O., Shaposhnikova, O., Yashchenok, V., Stanovska, I., Shostak, S., Rudenko, O., Petruk, S., Matsyi, O., & Kashkevich, S. Development of a solution search method using a combined bio-inspired algorithm. EasternEuropean Journal of Enterprise Technologies.* 2024, *Vol.* 1, No. 4 (127), *pp.* 6–13. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.298205

Особистий внесок автора: розроблення математичних моделей комбінованого алгоритму та опис його параметрів.

Особистий внесок Thamer K. A.: формування наукової концепції.

Особистий внесок Sova O.: координація дослідницького процесу.

Особистий внесок Shaposhnikova O.: програмна реалізація.

Особистий внесок Yashchenok V.: проектування структурної схеми алгоритму та проведення обчислювальних експериментів.

Особистий внесок Stanovska I.: обґрунтування вибору біоінспірованих підходів і аналіз їх ефективності для задач оптимізації.

Особистий внесок Shostak S.: математичне моделювання процесів.

Особистий внесок Rudenko O.: адаптація генетичного алгоритму до комбінованої схеми та інтеграція у загальний метод.

Особистий внесок Petruk S.: розроблення експериментальної бази.

Особистий внесок Matsyi O.: обробка даних, підготовка та систематизація експериментальних показників.

3. *Kashkevich, S., Litvinenko, O., Shyshatskyi, A., Salnyk, S., Velychko, V. The method of self-organization of information networksin the conditions of the complex*

influence of destabilizing factors. Сучасні інформаційні системи. 2024. Т. 8, № 3. С. 59–79. https://doi.org/10.20998/2522-9052.2024.3.07.

Особистий внесок автора: реалізація комбінованого алгоритму, проведення обчислювальних експериментів, аналіз результатів.

Особистий внесок Lytvynenko O.: побудова математичного апарату.

Особистий внесок Shyshatskyi A.: постановка наукової проблеми.

Особистий внесок Salnyk S.: аналітична підтримка.

Особистий внесок V. Velychko.: підготовка ілюстративного матеріалу.

4. *Kuchuk N., Kashkevich, S. Radchenko V., Andrusenko Y., Kuchuk H. Applying edge computing in the execution IoT operative transactions.* Сучасні інформаційні системи. 2024. Т. 8, № 4. С. 59–79. https://doi.org/10.20998/2522-9052.2024.4.07

Особистий внесок автора: розробка алгоритму розподілу завдань між вузлами *IoT,* участь у математичному моделюванні, проведення аналізу результатів.

Особистий внесок Kuchuk N.: загальне наукове керівництво, постановка задачі дослідження, редагування статті.

Особистий внесок Radchenko V.: моделювання агентного середовища та підготовка експериментальної бази.

Особистий внесок Andrusenko Y.: реалізація експериментальної частини, перевірка працездатності методу.

Особистий внесок Kuchuk H.: математичне обґрунтування методу та оцінка його ефективності.

5. *Owaid, S. R., Kashkevich, S. Shyshatskyi, A., Radzivilov, H., Sova, O., Zarubenko, A., Veretnov, A., Lazuta, R., Noskov, O., & Voznytsia, A. Development of heterogeneous data processing method in organizational and technical systems. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies.* 2025, *Vol. 1, No.* 4 (133), *pp.* 64–71. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.322629

Особистий внесок автора: формалізація задачі, розробка підходу до інтеграції метаевристичних алгоритмів, участь у програмній реалізації та аналізі результатів моделювання.

Особистий внесок Owaid, S. R.: постановка наукової задачі, методологія дослідження, редагування рукопису.

Особистий внесок Shyshatskyi, A.: наукове керівництво, формування концепції дослідження, критичний аналіз результатів.

Особистий внесок Radzivilov, H.: математичне обґрунтування алгоритмічних рішень.

Особистий внесок Sova, O.: забезпечення моделювання та верифікації, редагування рукопису.

Особистий внесок Zarubenko, A.: участь у тестуванні та оцінці результатів на прикладах.

Особистий внесок Veretnov, A.: побудова експериментальних сценаріїв.

Особистий внесок Lazuta, R.: допомога у зборі та підготовці вхідних даних.

Особистий внесок Noskov, O.: підтримка під час аналізу гетерогенних даних.

Особистий внесок Voznytsia, A.: дослідження поведінки алгоритмів та допомога у візуалізації результатів.

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації

1. Патент України на корисну модель №158500. Пристрій побудови маршрутів передачі інформації в мережах спеціального призначення із можливістю самоорганізації / С. О. Кашкевич, А. В. Шишацький, Неронов С. М., Плєхова Г. А., Єфименко О. В. Левтеров А. І.; – № *и* 2024 04274; заявл. 30.08.2024; опубл. 13.02.2025, бюл. № 7.

Особистий внесок автора: розробка алгоритмічних процедур побудови маршрутів, адаптація методу до умов самоорганізації мереж спеціального призначення, формування опису технічного рішення.

Особистий внесок Шишацький А.В.: наукове керівництво, методологічне забезпечення, редагування матеріалів заявки.

Особистий внесок Неронов С.М.: технічна верифікація пристрою.

Особистий внесок Плєхова Г. А.: участь у математичному моделюванні, допомога у підготовці графічних матеріалів для заявки.

Особистий внесок Єфименко О. В.: консультації щодо практичного впровадження пристрою, технічна експертиза.

Особистий внесок Левтеров А. І.: перевірка працездатності пристрою.

2. Патент України на корисну модель №158501. Пристрій побудови маршрутів передачі інформації в інформаційних мережах спеціального призначення / С. О. Кашкевич, А. В. Шишацький, Неронов С.М., Плєхова Г.А., Єфименко О. В., Щукін О. В, Орел О.В., Кириченко І. Г., Холодов А. П., Мусаєв З. Р, Ковалевський С. Г.; – № *и* 2024 04273; заявл. 30.08.2024; опубл. 13.02.2025, бюл. № 7.

Особистий внесок автора: алгоритмічна розробка способів побудови маршрутів у мережах спеціального призначення, програмне моделювання.

Особистий внесок Шишацький А.В.: постановка науково-технічної задачі.

Особистий внесок Неронов С.М.: технічна експертиза пристрою.

Особистий внесок Плєхова Г.А.: математичне моделювання алгоритмів.

Особистий внесок Єфименко О.В.: консультації з питань впровадження пристрою у практичні системи.

Особистий внесок Щукін О.В.: участь у створенні технічної документації.

Особистий внесок Орел О.В.: допомога у випробуванні функціональних характеристик, перевірка працездатності пристрою.

Особистий внесок Кириченко І.Г.: технічне забезпечення.

Особистий внесок Холодов А.П.: консультації з апаратної реалізації.

Особистий внесок Мусаєв З.Р.: розробка структурної схеми пристрою.

Особистий внесок Ковалевський С.Г.: проведення експериментальної перевірки пристрою, узагальнення результатів випробувань.

3. Кашкевич С. О. Перспективи використання безпілотних літальних апаратів в сучасних телекомунікаційних мережах. Розвиток інформаційних технологій авіаційної галузі: тези доповідей наукового круглого столу. м. Київ, 25 квітня 2023 р. С. 26. *URL:* https://drive.google.com/file/d/1iL6gUVnncZAc-_iN3VvQuGNQ17YGzUqt/view

4. Нечипорук В.В., Кашкевич С. О. Застосування безпілотних літальних апаратів в протидії тероризму. Протидія терористичним актам у міському середовищі збірник матеріалів Наукового форуму. Навчально науковий інститут права та політології УДУ імені Михайла Драгоманова м. Київ, 21 червня 2023 р. С. 206 – 209.

URL: https://enpuir.udu.edu.ua/entities/publication/64dc8931-5f7e-4231-a872-ba99f261f559 .

5. Кашкевич С. О., Голего Н.М. Живучість телекомунікаційних систем і мереж спеціального призначення. *II* Міжнародна науково-практична інтернет-конференція *«Global Society in Formation of New Security System and World Order»,* 27-28 липня, 2023 р., Дніпро, Україна. С. 189-191. *URL:* http://www.wayscience.com/wp-content/uploads/2023/08/Conference-Proceedings-July-27-28-2023-1.pdf .

6. Шишацький А.В., Кашкевич С. О., Бузун О.Г. Удосконалена методика багатокритеріального оцінювання в умовах невизначеності. Науково-практична конференція «Використання штучного інтелекту в наукових дослідженнях та прикладних розробках», 11 квітня 2024 р., Київ, Україна. С. 67-69. *URL:* https://ipme.kiev.ua/wp-content/uploads/2024/04/Material-aisrad-2024-final.pdf .

7. Кашкевич С. О., Попов М.Д., Корчемний Р.Є. Розробка математичної моделі захисту інформаційних систем. *V* Міжнародної науково практичної конференції молодих вчених, аспірантів і студентів. 18–19 квітня 2024 р. – Київ: КНЕУ, 2024 – 308 с. С. 169.

URL: https://drive.google.com/file/d/1D8vstTNHJjaXL5oH8cprgO8CDgE1GCS/view .

8. Тачиніна О.М., Кашкевич С. О. Принципи побудови інформаційних мереж з можливістю самоорганізації. Науково – практична конференція «Кібербезпека: актуальні питання та шляхи їх вирішення» 13 − 16 червня 2024 Р. С. Світязь, Україна. С. 18-20. *URL: https://old.scsa.org.ua/wp-content/uploads/2024/08/zbirnik.pdf?utm_source* .

9. *Kashkevych S., Hryshko N. Method of self-organization of information networks in conditions of destabilizing influences*. Інтелектуальні технології лінгвістичного аналізу м. Київ, 23-24 жовтня 2024 р. С. 14. *URL: https://drive.google.com/file/d/1ocJsdbmTrgd99Rn2H0cYpS3wZIpZ9MPg/view* .

10. Кашкевич С.О., Тупота Є.В., Подельський С.В. Безпровідні *ad-hoc* мережі: принципи самоорганізації, функціонування та сфери застосування. «Комп'ютерні системи та мережні технології», *XVI* науково-практична конференція: 27-28 березня 2025 р. С. 44. *URL: https://csnt.nau.edu.ua/en/8-novini/26-pidsumki-konferentsijiji.html* .

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ……..... 17
ВСТУП……. 19
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ТА ПЕРСПЕКТИВ РОЗВИТКУ ІНФОРМАЦІЙНИХ МЕРЕЖ…… 27
1.1 Принципи побудови інформаційних мереж з можливістю до самоорганізації……..... 27
1.2 Аналіз основних факторів, що впливають на ефективність функціонування інформаційних мереж…….…… 37
1.3 Аналіз методів підвищення ефективності функціонування інформаційних мереж……..…..…….. 48
1.4 Постановка наукового завдання дослідження……..…… 51
Висновки до розділу 1……. 58
РОЗДІЛ 2. МОДЕЛЬ ФУНКЦІОНУВАННЯ ІНФОРМАЦІЙНИХ МЕРЕЖ…….....…….....…….....…….....…….....…….....……..... 60
2.1 Опис протоколів інформаційних мереж …….…… 60
2.2 Основні математичні співвідношення моделі функціонування інформаційних мереж……. 61
2.3 Аналіз адекватності та достовірності моделі функціонування інформаційних мереж……..... 75
Висновки до розділу 2…… 76
РОЗДІЛ 3. МЕТОД САМООРГАНІЗАЦІЇ ІНФОРМАЦІЙНИХ МЕРЕЖ…….…….…….……. 78
3.1 Метод маршрутизації в інформаційних мережах …….. 78
3.2 Процедури методу самоорганізації інформаційних мереж в умовах дестабілізуючих впливів …… 98
Висновки до розділу 3……. 113

РОЗДІЛ 4. РЕЗУЛЬТАТИ ОЦІНКИ ЕФЕКТИВНОСТІ МЕТОДУ САМООРГАНІЗАЦІЇ ІНФОРМАЦІЙНИХ МЕРЕЖ В УМОВАХ ДЕСТАБІЛІЗУЮЧИХ ВПЛИВІВ……..... 115

4.1 Імітаційна модель інформаційної мережі в умовах дестабілізуючих впливів……... 115

4.2 Оцінка ефективності методу маршрутизації в інформаційних мережах ……...…. 134

4.3 Оцінка ефективності методу самоорганізації інформаційних мереж в умовах дестабілізуючих впливів ……...…. 142

Висновки до розділу 4……...…….. 148

ВИСНОВКИ……..... 150

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ...……...……...……... 153

ДОДАТКИ…….....…… 169

Додаток А. Акти впровадження результатів дисертаційного дослідження…….. 169

Додаток Б. Приклад перевірки адекватності імітаційної моделі інформаційної мережі……..... 174

Додаток В. Приклад перевірки стійкості імітаційної моделі інформаційної мережі……..……...… 176

Додаток Г. Приклад перевірки чутливості імітаційної моделі інформаційної мережі…… 179

Додаток Д. Правила формування загальної метрики……... 182

Додаток Е. Патент України на корисну модель …….. 199

Додаток Ж Патент України на корисну модель …….. 200

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ABR (Associativity-Based Routing Protocol) – протокол маршрутизації на основі асоціативності

Ad Hoc Network – бездротова мережіа що самоорганізовуються

ADV (Adaptive Distance Vector) – вектор адаптивний відстані

AODV (Ad Hoc on-demand distance vector routing protocol) – дистанційно-векторний *Ad Hoc* протокол за вимогою

ARP (Address Resolution Protocol) – протокол визначення адреси

CBR (Constant Bit Rate) – постійна бітова швидкість.

CEDAR (Core-Extraction Distributed Routing Algorithm) – алгоритм маршрутизації розподілення розподілу ядра

CGSR (Cluster-head Gateway Switch Routing Protocol) – кластерний протокол маршрутизації зі шлюзами, що перемикаються

DDR (Distributed Dynamic Routing) – розподілена динамічна багатошляхова маршрутизація маршрутизація маршрутизація.

DoS (TDenial of Service) – атака типу відмова в обслуговуванні.

DSDV (Destination Sequenced Distance-Vector Routing Protocol) – векторний протокол з динамічним послідовним призначенням

DSR (Dynamic source routing protocol) – протокол динамічної маршрутизації

Icar (Intersection-based connectivity aware routing) – багатошляхова маршрутизація маршрутизація з урахуванням зв’язку на основі перетину

IEEE 802.11 (Institute of Electrical and Electronics Engineers) – інститут інженерів електротехніки та електроніки

FORP (Flow-Oriented Routing Protocol) – протокол орієнтований на потік

FSR (Fisheye State Routing Protocol) – протокол проактивної маршрутизації

GPS (Global Positioning System) – система глобального позиціонування

GSR (Global State Routing Protocol) – протокол маршрутизації стану

HSR (Hierarchical State Routing Protocol) – протокол маршрутизації стану ієрархії

LAR (Location-Aided Routing Protocol) – протокол маршрутизації за допомогою локації

LBR (Latency Based Routing) – протокол на основі затримки

MAC (Media Access Control) – адреса управління доступом до мережі.

MANET (Mobile Ad Hoc network) – бездротова, децентралізована мережа, що здатна до самоорганізації

MCN (Multi-hop Cellular Networks) – багатоланкова стільникова мережа

MDSR (Modified Dynamic Source Routing Protocol) – модифікований протокол динамічної маршрутизації від джерела

MSR (Multipath Source Routing) – багатошляхова маршрутизація з декількома джерелами

OLSR (Optimized Link State Routing Protocol) – оптимізований протокол маршрутизації стану каналу

OSI (Open systems interconnection basic reference model) – базова модель взаємодії відкритих систем

PAR (Power-Aware Routing Protocol) – протокол маршрутизації на основі показника параметру заряду батареї

QoS (Quality of Service) – якость обслуговування.

QoS-MSR (Multipath Source QoS Routing) – протокол якості обслуговування з маршрутизацією з кількох джерел

RABR (Route-Lifetime Assessment-Based Routing) – протокол маршрутизації, що базується на оцінці тривалості життя маршруту

SNMP (Simple Network Management Protocol) – керування мережею.

SSA (Signal Stability-Based Adaptive Routing Protocol) – протокол адаптивної маршрутизації на основі стабільності сигналу

STARA (System and Traffic dependent Adaptive Routing Algorithm) – алгоритм адаптивної маршрутизації), залежний від системного та від трафіку

TCP (Transmission Control Protocol) – протокол управління передачею

ВСТУП

Актуальність.

На теперішній час технології інформаційних мереж, здатних до самоорганізації, широко використовуються в нашому повсякденному житті, а також для вирішення специфічних завдань. Як свідчить проведений в джерелах аналіз [1-30] надалі їх відсоткова частка буде лише збільшуватися. Така особливість обумовлює актуальність зазначеного напрямку для проведення наукових досліджень.

Сучасні інформаційні мережі функціонують в умовах постійного зростання складності, зумовленої збільшенням кількості вузлів, динамічною зміною топології, неоднорідністю трафіку та обмеженістю обчислювальних і енергетичних ресурсів. Особливої актуальності набуває задача забезпечення надійного та оперативного обміну інформацією в умовах дестабілізуючих впливів, таких як завади в радіоканалі, відмови вузлів, конкуренція за спільні ресурси та навмисні інформаційні впливи. За таких умов традиційні підходи до маршрутизації та керування мережею не завжди забезпечують необхідний рівень ефективності та стійкості.

Інформаційна безпека є одним із ключових чинників функціонування сучасних інформаційних мереж, особливо в умовах динамічної зміни топології, зашумленості радіоканалу та обмежених ресурсів вузлів. Порушення стабільності процесів передавання даних призводить до втрати керованості мережею та зниження ефективності її функціонування, що безпосередньо впливає на Інформаційну безпеку системи в цілому.

В наш час активно ведуться роботи з впровадження систем передачі даних з використанням інформаційних мереж, що самоорганізовуються, а саме бездротова мережа *(Ad Hoc Networks).*

Основним завданням мереж передачі даних, що самоорганізовуються, є: побудова стійкої до відмов мережевої інфраструктури; підвищення використання радіо- та радіочастотного ресурсу; забезпечення адаптації мереж

до дії зовнішніх факторів; зменшення вартості розгортання та функціонування інформаційної мережі в порівнянні з класичними принципами побудови.

Децентралізована інформаційна бездротова мережа, що самоорганізовується, складається з маршрутизаторів та мобільних пристроїв, які зв’язані між собою та одночасно виконують функції клієнта та маршрутизатора.

Для вирішення проблематики самоорганізації інформаційних мереж значний внесок зроблено як вітчизняними, так і зарубіжними вченими. Зокрема, цим питанням присвячені праці Сови О.Я., Слюсаря В.І., Штовби С.Д., Ротштейна А.П., Романюка В.А., Зінченка А.О., а також зарубіжних дослідників – *Mitsuo Gen, Pablo Pavon Marino, C. Siva Ram Murthy, Mohammad Ilyas, Jun Zheng, David Simplot-Ryl, Victor C.M. Leung,* та ін.

У таких умовах особливого значення набуває інформаційна безпека інформаційних мереж, оскільки порушення процесів самоорганізації безпосередньо впливає на цілісність, доступність і достовірність переданих даних.

Одним із перспективних напрямів розв’язання зазначених проблем є використання принципів самоорганізації інформаційних мереж, які передбачають здатність мережі автономно адаптувати свою структуру та параметри функціонування відповідно до поточного стану та зовнішніх впливів.

У зв’язку з цим актуальною є задача розроблення комплексного методу самоорганізації інформаційних мереж, який поєднує адаптивну маршрутизацію, урахування зашумленості та динаміки радіоканалу, а також використання інтелектуальних методів керування в умовах невизначеності.

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

Дисертаційна робота виконувалася відповідно до плану науково-дослідних робіт Державного університету «Київський авіаційний інститут» та є складовою частиною комплексних досліджень у галузі інформаційних

технологій. Держбюджетна (кафедральна) науково-дослідна робота № 26-2024/14.03 «Підвищення достовірності цифрової обробки зображень з бортової відеокамери БПЛА». Напрямки досліджень визначені відповідно до технічного завдання до держбюджетної науково-дослідної роботи «Дослідження інноваційних підходів застосування інформаційних технологій в сфері цифровізації транспортних систем» (вихідний № 1110/01 від 08.07.2024), номер державної реєстрації 0123*U*104192. Автор дисертаційної роботи брав участь у зазначених науково-дослідних роботах як співвиконавець.

Мета і завдання дослідження.

Мета дисертаційної роботи полягає у підвищенні оперативності самоорганізації інформаційних мереж в умовах дестабілізуючих впливів.

Для досягнення поставленої мети були поставлені такі завдання:

– провести аналіз сучасного стану розвитку інформаційних мереж;

– розробити комплексну модель функціонування інформаційних мереж;

– удосконалити метод маршрутизації в інформаційних мережах;

– розробити метод самоорганізації інформаційних мереж в умовах дестабілізуючих впливів;

– оцінити ефективність запропонованого методу.

Досягнення поставленої мети також спрямоване на підвищення рівня інформаційної безпеки інформаційних мереж в умовах дії дестабілізуючих впливів.

Об’єкт дослідження – процес функціонування інформаційних мереж, що піддаються дестабілізуючим впливам.

Предмет дослідження – методи підвищення оперативності самоорганізації інформаційних мереж в умовах дестабілізуючих впливів.

Методи дослідження.

Для вирішення поставленої наукового завдання в дисертаційній роботі використані такі методи: системний аналіз, теорія графів, теорія штучного інтелекту, теорія прийняття рішень, математична та нечітка логіка,

математичне програмування, імітаційне комп'ютерне моделювання, математична статистика.

Експериментальні дослідження здійснювалися шляхом імітаційного комп'ютерного моделювання в сучасних обчислювальних середовищах. Для реалізації моделей використовувалися обчислювальні методи та технології *ZigBee* об'єктно-орієнтованого й математичне програмування, із застосуванням як імперативних, так і функціональних парадигм де математичне програмування.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в подальшому розвитку методів прийняття рішень щодо самоорганізації інформаційних мереж в умовах невизначеності та швидких змін топології мережі.

Наукові результати базуються на таких основних положеннях:

уперше:

– запропоновано комплексну модель функціонування інформаційних мереж, яка на відміну від існуючих комбінувано враховує навмисні завади адитивного та мультиплікативного характеру, а також дестабілізуючі фактори, що обумовлені наявністю кібератак, для моделювання самоорганізаційних мереж;

– розроблено метод самоорганізації інформаційних мереж в умовах дестабілізуючих впливів, який за рахунок поєднання\застосування удосконаленого методу маршрутизації та комплексної математичної моделі функціонування інформаційних мереж дозволяє забезпечити адаптивну перебудову параметрів і маршрутів передачі даних з урахуванням зашумленості, динамічної зміни топології та обмежених обчислювальних ресурсів вузлів.

удосконалено:

– метод маршрутизації в інформаційних мережах, що на відміну від існуючих дозволяє підвищити оперативність самоорганізації інформаційних мереж за рахунок вибору маршруту передачі інформації від вузла відправника до вузла отримувача. В основу запропонованого методу покладено

метаевристичний алгоритм на основі нечіткої логіки. В запропонованому методі враховується тип невизначеності та зашумленості даних, реалізовуються адаптивні стратегії самоорганізації; враховуються наявні обчислювальні ресурси системи при здійсненні самоорганізації інформаційних мереж та ін.

отримали подальший розвиток:

– підходи до оцінювання стану інформаційних мереж в умовах дестабілізуючих впливів з урахуванням зашумленості даних та динамічної зміни топології;

–математична модель функціонування інформаційних мереж, що забезпечує узгоджений аналіз багатьох показників ефективності в процесі самоорганізації;

– методи адаптивної маршрутизації, орієнтовані на підвищення пропускної здатності та стабільності роботи мережі без централізованого керування;

– підходи до імітаційного моделювання процесів самоорганізації інформаційних мереж для кількісної оцінки оперативності та стійкості їх роботи.

Наукова значимість отриманих у дисертаційній роботі наукових результатів полягає в підвищенні оперативності процесу самоорганізації інформаційних мереж в умовах впливу дестабілізуючих факторів.

Практичне значення одержаних результатів.

Практичні результати можна звести до наступних пунктів:

1. Удосконалено метод маршрутизації інформаційних потоків між вузлами інформаційної мережі, який забезпечує адаптивний вибір маршрутів передачі даних з урахуванням поточного стану мережі, зашумленості каналів та динамічної зміни топології. Запропонований підхід дозволяє підвищити пропускну здатність мережі та зменшити втрати продуктивності в умовах дестабілізуючих впливів.

2. Розроблено комплексну модель функціонування інформаційних мереж, яка формалізує взаємозв’язок між параметрами вузлів, характеристиками

передачі даних та зовнішніми дестабілізуючими чинниками. Модель придатна для використання в задачах аналізу та імітаційного моделювання процесів самоорганізації мереж і може застосовуватися для оцінки ефективності різних методів керування.

3. Розроблено метод самоорганізації інформаційних мереж в умовах дестабілізуючих впливів, який забезпечує децентралізовану перебудову параметрів і структури мережі без централізованого керування. Метод дозволяє скоротити час адаптації мережі до зміни умов функціонування та підвищити стабільність її роботи, що підтверджено результатами імітаційного моделювання, а саме: пропускна здатність мережі збільшується на 12-20 %; час затримки передачі пакетів скорочується в середньому на 20-25 %; оперативність встановлення маршрутів підвищується на 14-19 %.

4. Проведені в дисертаційній роботі дослідження реалізовані й впроваджені (акти подані у Додатку А до дисертаційної роботи): в навчальному процесі кафедри комп'ютерних систем механічного факультету Харківського національного автомобільно-дорожнього університету. (Акт впровадження результатів від 17.04.2024 року). В держбюджетній науково-дослідній роботі Харківського національного автомобільно-дорожнього університету (Акт впровадження результатів від 08.07.2024 року). В ТОВ «ВАТ Олімп», під час створення складової частини інформаційної системи спеціального призначення (Акт впровадження від 06.06.2024 року); в ТОВ «ФЛАЙ-ГРУП Україна», під час створення інформаційної системи обробки різнотипних даних (Акт впровадження від 01.10.2024 року). В навчальному процесі кафедри інтелектуальних кібернетичних систем факультету комп'ютерних наук та технологій Національного авіаційного університету. (Акт впровадження результатів від 02.09.2024 року).

Особистий внесок здобувача.

Безпосередньо автором здійснено:

– інформаційний пошук та аналіз літературних даних за темою дисертації;

– удосконалено метод маршрутизації в інформаційних мережах;

– побудовано комплексну математичну модель функціонування інформаційних мереж з урахуванням дестабілізуючих факторів;

– запропоновано новий метод самоорганізації інформаційних мереж, що забезпечує підвищення надійності їх роботи в умовах впливу завад та атак;

– оцінку ефективності методу самоорганізації інформаційних мереж.

Співавторами наукових праць є науковий керівник та науковці, спільно з якими проведені дослідження.

У наукових працях, написаних у співавторстві, автору належить:

– в роботі [57] розроблено алгоритм реалізації методу пошуку рішень на базі алгоритму «імператорських пінгвінів»;

– в роботі [74-78] проведено математичну постановку завдань з використанням комбінованого біоінспірованого алгоритму;

– в роботі [64] запропоновані методики підвищення оперативності прийняття рішень з використанням метаевристичних алгоритмів;

– в роботі [77] запропоновані методики підвищення оперативності прийняття рішень з використанням комбінованих метаевристичних алгоритмів;

– в роботі [75] запропоновані основні математичні співвідношення математичної моделі інформаційного конфлікту інформаційних мереж;

– в роботах [74-76] запропоновані основні процедури методу самоорганізації інформаційних мереж в умовах дестабілізуючих впливів;

– в роботах [74-78] запропоновані основні математичні залежності запропонованих методів підвищення оперативності прийняття рішень.

Постановка мети та завдань, обговорення результатів проведені разом з науковим керівником.

Структура та обсяг дисертації.

Дисертація складається з анотації, вступу, 4 розділів, висновків і списку використаних джерел. Повний обсяг дисертації становить 200 сторінок, із них – 167 основного тексту. Робота містить 17 рисунків, 10 таблиць, 7 додатків. Список використаних джерел налічує 111 найменувань.

Апробація результатів дисертації.

Наукові результати та основні положення дисертаційної роботи доповідались, обговорювались на всеукраїнських, міжнародних семінарах та конференціях, а саме: Розвиток інформаційних *ZigBee* технологій авіаційної галузі: тези доповідей наукового круглого столу. м. Київ, 25 квітня 2023 р; Протидія терористичним актам у міському середовищі збірник матеріалів Наукового форуму. Навчально науковий інститут права та політології УДУ імені Михайла Драгоманова м. Київ, 21 червня 2023 р; Міжнародна науково-практична інтернет- *конференція «Global Society in Formation of New Security System and World Order»,* 27-28 липня, 2023 р., Дніпро, Україна; Науково-практична конференція «Використання штучного інтелекту в наукових дослідженнях та прикладних розробках», 11 квітня 2024 р., Київ, Україна; *V* Міжнародної науково практичної конференції молодих вчених, аспірантів і студентів. 18–19 квітня 2024 р. – Київ: КНЕУ, 2024 – 308с; Науково – практична конференція «Кібербезпека: актуальні питання та шляхи їх вирішення» 13 − 16 червня 2024 Р. С. Світязь, Україна; Інтелектуальні технології лінгвістичного аналізу м. Київ, 23-24 жовтня 2024 р; «Комп'ютерні системи та мережні технології», *XVI* науково-практична конференція: 27-28 березня 2025 р.

Публікації. Основні положення та результати дисертаційного дослідження викладено в 16 наукових публікаціях, серед них 1 публікація у науково фаховому виданні України, 5 у виданнях, проіндексованих в базі даних *Scopus*, 8 публікацій у збірниках матеріалів конференцій. Результати дисертаційного дослідження захищені 2 патентами України на корисні моделі.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ТА ПЕРСПЕКТИВ РОЗВИТКУ ІНФОРМАЦІЙНИХ МЕРЕЖ

1.1. Принципи побудови інформаційних мереж з можливістю до самоорганізації.

Синергетичні принципи дедалі активніше впроваджуються у сферу інформаційних технологій. Сучасні технічні системи стають глобальними, розподіленими та багаторівневими, а завдання, які вони виконують, – все більш складними і взаємопов'язаними. Попри значні досягнення у розвитку елементної бази, зокрема підвищення продуктивності обчислювальних засобів, швидкодії каналів зв'язку та ефективності технологій *ZigBee* передавання даних, питання управління у таких системах залишаються актуальними та недостатньо вирішеними. Традиційні підходи кібернетики частково розв'язують проблему управління, пропонуючи моделі автоматизації процесів на основі принципів зворотного зв'язку. Проте структурна й функціональна організація складних інформаційних систем, здатних до адаптації, самоузгодження та відновлення після збоїв, потребує нових концептуальних підходів.

Одним із перспективних напрямів є синергетичний підхід, що базується на принципах самоорганізації, запозичених із природних систем. Самоорганізація – це фундаментальна властивість складних динамічних систем, притаманна всім природним утворенням – від біологічних організмів до соціальних структур, – і є основою ефективного функціонування живих систем, вершиною яких є людина. Здатність системи до самоорганізації є важливою умовою забезпечення її стійкості та інформаційної безпеки в умовах невизначеності та зовнішніх впливів.

Під інформаційною мережею розуміють розподілену штучну систему, що складається з множини елементів, пов'язаних між собою каналами передачі

даних і призначеної для вирішення конкретних завдань. При цьому рівень розподіленості інформаційної системи залежить лише від її призначення.

У таких системах навіть незначний збій або відмова окремого елемента може призвести до миттєвого припинення функціонування всієї системи, що є критично неприпустимим для високонадійних мереж.

У межах даного дослідження інформаційна безпека розглядається з позицій забезпечення стійкого та безперервного обміну інформацією між вузлами мережі за умов дестабілізуючих впливів. Такий підхід відповідає сучасним вимогам до інформаційних систем, де першочергове значення мають доступність інформаційних ресурсів і здатність мережі підтримувати працездатність у складних умовах експлуатації.

На відміну від цього, природні системи не демонструють подібної крихкості: вони здатні адаптуватися, компенсувати порушення та відновлювати стабільність у змінених умовах. Такі властивості досягаються завдяки процесам самоорганізації, у ході яких система самостійно перебудовує власну структуру, взаємозв’язки та функції, підвищуючи ефективність і стійкість свого функціонування.

Самоорганізація – процес, при якому створюється, відтворюється або вдосконалюється організація інформаційних систем. Процеси самоорганізації інформаційних систем можуть відбуватися тільки в інформаційних системах зв'язку з високим рівнем складності і великою кількістю елементів, зв’язки між якими не жорсткі, а ймовірнісні.

За синергетичною концепцією, самоорганізація можлива лише у відкритих системах, що перебувають далеко від термодинамічної рівноваги. Такі системи постійно обмінюються енергією, речовиною та інформацією з навколишнім середовищем. Саме завдяки цьому взаємообміну вони здатні підтримувати стабільність, удосконалювати структуру та функціонування.

Замкнуті системи, описані класичною фізикою, не володіють подібними властивостями, оскільки не мають зовнішніх потоків інформації чи енергії. Вони не здатні до еволюційного розвитку та самовідновлення. Таким чином,

першою необхідною умовою для інформаційних систем, що самоорганізуються, є їх відкритість. Такі системи мають приймати та передавати допустиму інформацію у зовнішнє середовище. Саме завдяки накопиченню, аналізу й адаптації до зовнішніх даних система може самостійно приймати рішення щодо вдосконалення своєї структури, параметрів і способів функціонування.

Іншою характерною рисою самоорганізованих систем є їх ієрархічність. Природні системи мають багаторівневу будову – клітина входить до складу органу, орган утворює організм тощо. За аналогією, інформаційні системи, що самоорганізуються, мають формуватися за тим самим принципом: кожен елемент системи підпорядковується іншому, утворюючи структуру з чітко визначеними зв’язками підпорядкування між рівнями.

В інформаційній системі для надійного зв’язку між елементами потрібні надійні канали передачі даних. Протоколи передачі повинні забезпечувати надійну та гарантовану доставку всіх повідомлень до одержувачів, включаючи умови невизначеності. Така система не повинна містити недоставлених повідомлень, які можуть виникнути внаслідок будь-яких збоїв або відмов обладнання та програмного забезпечення. Для цього системи зв'язку повинні періодично обчислювати та запам’ятовувати свій консистентний глобальний стан, коли всі надіслані повідомлення доставляються та приймаються адресатами.

Іншою характерною властивістю природних систем, що самоорганізуються, є наявність у їхній поведінці так званих точок біфуркації. У синергетиці під точкою біфуркації розуміють стан системи, у якому вона досягає межі стійкості, тобто максимальної хаотичності чи невпорядкованості, після чого відбувається різка, стрибкоподібна зміна її структури або режиму функціонування. Наявність точок біфуркації робить можливими, а іноді й корисними, коливання параметрів системи – відхилення від середніх значень, які слугують механізмом адаптації та розвитку. Саме завдяки таким флуктуаціям і подальшому переходу до нового стану система еволюціонує, набуваючи якісно нових властивостей.

Коли амплітуда коливань перевищує критичне значення, системи зв'язку втрачають здатність підтримувати попередній стан рівноваги, і виникає точка біфуркації – момент, у якому можливі кілька варіантів подальшого розвитку. Особливістю таких процесів є когерентна дія всіх елементів системи: у точці біфуркації вони починають функціонувати узгоджено, підпорядковуючись спільній меті збереження цілісності системи.

Для інформаційних систем, що самоорганізуються, дана властивість проявляється у синхронізованій роботі їхніх механізмів адаптації та перебудови. Це означає, що процес самоорганізації має охоплювати всю систему в цілому – її структуру, зв’язки та функціональні елементи. Лише за цієї умови можливе досягнення стабільного та ефективного режиму функціонування після впливу зовнішніх дестабілізуючих факторів.

Приклад, як можна організувати інформаційну систему, щоб максимально наблизити її до раніше описаної біфуркації. Для цього напишемо формальні позначення. Нехай S – це певна система зв'язку, що складається з множини елементів і вирішує певний набір завдань. Функціонування системи є цілеспрямованим і може бути виражене деякими цільовими функціями J, які мають чисельну оцінку. Тоді якість функціонування системи можна визначити, обчислюючи значення функціоналу J у відповідні моменти часу. Коли це значення стає меншим за певний поріг $(J < J_{\min})$, система зв'язку повинна почати процес самоорганізації, щоб відновити прийнятне значення цільового функціоналу.

Ієрархічна структура інформаційної системи, що самоорганізується, передбачає введення двох принципово різних типів елементів. Першим типом є елементарні об’єкти (ЕО) – елементи, які виконують основну функціональну або корисну роботу в межах системи та безпосередньо пов’язані з її цільовим призначенням. Наприклад, у системі стільникового зв’язку елементарним об’єктом виступає окремий абонент, який здійснює передачу та прийом інформації. Такі елементи не мають підлеглих і не виконують функцій управління. Другим типом є елементи-посередники (ЕП), що забезпечують

допоміжні функції, зокрема модель управління, обробка даних та маршрутизацію, отриманих від елементарних об’єктів. Вони здійснюють координацію взаємодії між ЕО, оптимізують процеси обміну інформацією та підтримують цілісність системи. У певних випадках елементи-посередники також можуть виконувати частину корисних функцій, притаманних елементарним об’єктам. У системах стільникового зв’язку роль таких посередників відіграють ретранслятори, які забезпечують передавання сигналів між абонентами в межах зони покриття.

Кожен елементарний об’єкт належить до певного типу. Позначимо множину всіх типів ЕО у системі S як $T_S : T_S = \{T_1, T_2, ... T_n,\}$, де n – кількість різних типів ЕО в системі S. Тип ЕО визначає набір функцій, який може бути реалізований за даними ЕО. ЕО i-го типу може працювати за одним із заздалегідь передбачених алгоритмів, реалізуючи певну функцію. Алгоритм функціонування для кожної конкретної системи зв’язку може суттєво відрізнятися залежно від її архітектури та призначення. У багатьох випадках він має складну структуру, а іноді є частково прихованим у межах програмно-апаратної реалізації. При цьому не є критично важливими деталі внутрішнього функціонування окремих об’єктів або точне відтворення їх моделей. Основне значення має результат їх діяльності – вихідна функція, що безпосередньо впливає на формування цільової функції всієї системи зв’язку. Наприклад, під час оптимізації пропускної здатності мережі стільникового зв’язку не має значення, як саме реалізовано роботу абонентського пристрою. Важливим є лише те, як його функціонування впливає на загальну ефективність передачі даних у системі.

ЕО i-го типу у кожен момент часу реалізує деяку вихідну функцію $f_{k,i} \in F_i$, де F_i – набір функцій, що реалізують ЕО i-го типу: $F_i = \{F_{1,i}, F_{2,i} ... F_{m,i}\}$, де m – число різних функцій, які може реалізувати об’єкт i-го типу. У загальному випадку вплив ЕО на цільову функцію може виражатися не однією, а відразу кількома незалежними функціями $\{f_{k,i}^1, f_{k,i}^2 ... f_{k,i}^p\}$, де p – загальна кількість

функцій ЕО, що впливають на формування цільового функціоналу системи зв'язку J. Кожна функція $f_{k,i}^{j}$ залежить від набору параметрів, що характеризують ЕО типу i: $f_{k,i}^{j} = f(x_{1,i}, x_{2,i}, ..., x_{q,i})$, де q – число керованих параметрів ЕО i-го типу.

Як параметри можуть виступати фізичні величини, що мають різну природу, проте їхні значення завжди перебувають у межах деякого діапазону або мають інші обмеження довільного характеру. Проаналізовано випадки, коли для кожного з параметрів обмеження задаються у вигляді нерівностей виду $a_i \le x_i \le b; a_i, b_i \in R$, де R – множина дійсних чисел.

Елемент посередник збирає, обробляє, аналізує, передає іншим елементам посередникам результати роботи підопічних. Результат його функціонування можна представити як деяку функцію згортки: $\mu = f(el_1, el_2, ..., el_s)$, де el_i – результат роботи i-го елемента, керованого поточним ЕП; s – загальна кількість елементів, підключених до поточного ЕП; f – деякий оператор (наприклад, оператор додавання). Тому, сам ЕП керується елементом вищого за ієрархією рівня і передає йому результати своєї роботи.

Додатковим параметром ЕП є максимальна кількість елементів, які можуть бути до нього підключені. Це число надалі визначається як кількість вільних комірок ЕП. Такий параметр відображає ресурсну місткість елемента-посередника та впливає на ефективність побудови топології мережі. Системи зв’язку, побудовані за описаним принципом, може бути представлена у вигляді графа, вершини якого відповідають елементам системи (елементарним об’єктам або посередникам), а дуги – зв’язкам між ними. У структурі такої мережі можуть бути виділені один або кілька спеціальних елементів (особливо у випадку масштабних систем), що виконують функції оцінювання якості роботи мережі та обчислення значень цільового функціоналу. Саме в цих елементах реалізуються основні механізми самоорганізації – аналіз поточного стану системи, адаптивне коригування параметрів взаємодії між вузлами та забезпечення узгодженого функціонування всієї інформаційної мережі.

Розподілена система функціонує, і для неї безперервно або дискретно в певні моменти часу обчислюється значення цільового функціонала J, що кількісно характеризує якість вирішення поставлених завдань системою. Еволюційний підхід вимагає від системи зв'язку постійного вдосконалення свого функціонування, що описується в прагненні до розумної максимізації (або мінімізації) значення $J : J \to \max(\min)$. Однак при розрахунках таке бажання не є економічно обґрунтованим, а іноді навіть неможливим. Крім того, система, яка спочатку використовує всі свої ресурси, не має шансів на подальший розвиток.

Розвиваючи синергетичний підхід, важливо враховувати ще один фундаментальний аспект функціонування живих систем — явище гомеостазу. Воно полягає не у прагненні до максимізації чи мінімізації певних параметрів, а у підтриманні їх у межах життєво необхідних значень, що забезпечують стабільність і стійкість системи. Для біологічних організмів це проявляється у збереженні таких показників, як температура тіла, артеріальний тиск або частота серцевих скорочень. На основі цього від системи зв'язку вимагається виконання більш м’якої умови $J \geq J_{\min}$, яка полягає в тому, що система не повинна функціонувати гірше, ніж деякий поріг. Якщо нерівність виконана, система продовжує функціонувати, зберігаючи результати своєї роботи, у випадку невиконання нерівності запускаються механізми самоорганізації.

На відміну від систем живої та неживої природи, де коливання можуть мати абсолютно непередбачуваний характер і фізичну основу, зміни в інформаційній системі можуть відбуватися на трьох рівнях:

– зміни значень параметрів елементів інформаційної системи;

– зміни в функціях, які реалізують елементи інформаційної системи;

– зміни в структурі інформаційної системи.

Інформаційні системи зв’язку можуть реалізовувати три основні типи самоорганізації: параметричну, функціональну та структурну. Вибір конкретного типу або їх комбінації залежить від призначення системи, її архітектури та характеру зовнішніх впливів. Параметрична самоорганізація

передбачає адаптацію числових параметрів системи (наприклад, потужності передавачів, порогів прийому сигналу, коефіцієнтів фільтрації) без зміни її функціональної структури. Функціональна самоорганізація полягає у зміні ролей або функцій окремих елементів системи з метою підвищення ефективності взаємодії. Структурна самоорганізація – це найглибший рівень адаптації, який передбачає перебудову топології мережі або зв'язків між вузлами.

Загалом, зміна структури є найбільш ресурсоємною та істотно впливає на роботу системи в цілому, тоді як модифікація функцій елементів має менший, але все ще значний вплив. Найменш затратним видом самоорганізації є параметричний, що забезпечує гнучке налаштування окремих характеристик системи без порушення її цілісності. У зв'язку з цим, коли в інформаційній системі відбуваються події або група подій, які призвели до порушення нерівності $J \geq J_{\min}$. Спочатку слід активізувати механізми параметричної самоорганізації, намагаючись знову досягти нерівності шляхом зміни значень керованих параметрів елементів інформаційної системи.

Завдання параметричної самоорганізації інформаційної системи в загальному вигляді формуються таким чином: $J(x) \to \min(x), x \in D \subset R_n$, де $D = \{x \in R_n \mid g_i(x,\delta) \leq 0, i \in [1:m]; g_i(x,\delta) = 0, i \in [m+1:r]\}$ – множина допустимих рішень; $x = \{x_1,...,x_z\}$ – вектор вхідних параметрів, $\delta = \{\delta_1,...,\delta_w\}$ – вектор зовнішніх параметрів, що характеризують невизначеність обстановки; r – кількість обмежень у вигляді нерівностей і рівностей; w – кількість зовнішніх параметрів.

У межах множини D виконуються прямі, функціональні та критеріальні обмеження, представлені в вигляді загальної системи нерівностей та рівностей. Прямі обмеження накладаються безпосередньо на компоненти вектора вхідних параметрів системи. Функціональні обмеження визначають умови працездатності системи, дотримання яких є критично важливим для забезпечення коректного функціонування об'єкта оптимізації. При цьому немає

потреби забезпечувати виконання цих умов із надмірним запасом – достатньо гарантувати їх дотримання у допустимих межах.

Для реалізації процесів параметричної самоорганізації можуть застосовуватись різні методи параметричної оптимізації. Вибір конкретного методу залежить від типу оптимізаційної функції та характеру зв'язків між параметрами системи. До найбільш поширених підходів належать метод циклічного покоординатного спуску та метод експоненціальної релаксації, які забезпечують ефективне наближення до оптимальних параметрів у реальному часі.

Метод циклічного покоординатного спуску (ЦПС) є одним з найпростіших методів параметричної самоорганізації, хоча і має низьку ефективність в авральній ситуації. При вирішенні канонічного завдання побудови мінімізуючої послідовності $\{x_k\}$ функціоналу $J_{(x)}$ перехід від вектору x_i до вектору x_{i+1} за методом ЦПС відбувається наступним чином: для $l \in [1:n]$ компонента x_l^{i+1} визначається як $x_l^{i+1} \in Arg\min Jx_1^{i+1}, x_2^{i+1}, ..., x, x_{l+1}^{i+1}, ..., x_n^{i+1})$.

Простий варіант метода ЦПС завдається вектор початкових кроків $h = (h_1, ..., h_n)$ просувань із точки x у напрямку координатних ортів $e_1, e_2, ..., e_n$. Далі кроки h_1 модифікуються від ітерації до ітерації. Якщо виконується нерівність $J(x = h_i e_i < J(x)$, то поточна точка x замінюється на $x + h_i e_i$, а значення h_i потроюється $h_i = 3h_i$. Після цього здійснюється перехід до наступного номера i. Якщо $J(x + h_i e_i) > J(x)$, то здійснюється множення h_i на –0.5 і також здійснюється перехід до наступного координатного орту.

Метод експоненціальної релаксації належить до градієнтних методів параметричної оптимізації, що базуються на рекурентних процедурах з постійним контролем точності розрахунків. Такий підхід дозволяє уникнути накопичення обчислювальних похибок і забезпечує стабільність процесу збіжності до оптимального рішення. Особливістю методу є необхідність обчислення похідних від мінімізованих функцій, що потребує додаткових

обчислювальних ресурсів, проте забезпечує високу точність і стійкість при вирішенні погано обумовлених або аварійних задач, де потрібна швидка адаптація параметрів системи.

Функціональна самоорганізація полягає у виборі та перерозподілі функцій, що реалізуються окремими елементами системи, і є найменш формалізованим типом самоорганізації, оскільки значною мірою залежить від специфіки об’єкта. У практичних системах зазвичай визначаються множини функцій, які можуть виконуватись різними типами елементів, або задаються обов’язкові функції без фіксації конкретних виконавців.

Згідно із синергетичним підходом, параметрична та функціональна самоорганізація належать до еволюційного етапу розвитку системи, оскільки викликають поступові, некритичні зміни в її структурі. На відміну від них, структурна самоорганізація відповідає фазі біфуркації, коли система переходить у новий стан рівноваги. Вона є найбільш складною формою самоорганізації, і всі зміни, що вносяться в архітектуру або топологію системи, повинні мати чітке обґрунтування та бути спрямованими на підвищення її стабільності й ефективності. Запропоновано підхід, що ґрунтується на поступовому збільшенні вартості змін у системі та кількості внесених коригувань; він передбачає три основні етапи: самоорганізацію типів елементів інформаційної системи; реконфігурацію інформаційної системи; додавання або видалення її елементів.

Під час самоорганізації типів системи зв'язку намагаються змінити типи окремих або всіх елементів для максимізації цільових функцій. Це може реалізовуватись шляхом оновлення або математичне моделювання програмного забезпечення, у результаті чого елементи отримують новий або частково змінений набір функцій, не змінюючи при цьому загальної кількості компонентів системи.

Реконфігурація також не впливає на кількісний склад елементів, але передбачає їхнє переміщення на більш оптимальні позиції з погляду підвищення значення цільового функціоналу. Таке переміщення здійснюється з

урахуванням фізичних можливостей, кількості доступних ресурсів та економічної доцільності, забезпечуючи ефективне перерозподілення ролей і навантаження між вузлами системи. Отримані теоретичні результати можуть бути використані в подальшому для розробки програмного забезпечення управління складними розподіленими інформаційної системи, що функціонують в тому числі в умовах автономності та невизначеності навколишнього середовища.

Аналіз праць [1–13], присвячених поняттю «самоорганізація», дозволяє визначити основні властивості систем, що самоорганізуються.

До них належать: ендогенний порядок – перехід системи з одного стабільного стану в інший під дією внутрішніх процесів; емерджентність – виникнення нових властивостей, що не зводяться до суми функцій окремих елементів; простота локальних правил – складна поведінка системи формується на основі простих взаємодій між її компонентами; нестабільність – наявність нелінійної динаміки, коли незначні зміни параметрів викликають суттєві зрушення у функціонуванні; чутливість до початкових умов – малі відхилення можуть призвести до різних результатів; множинність рівноважних станів – у точці біфуркації система може перейти до одного з кількох можливих стабільних режимів; критичність – наявність порогових ефектів і фазових переходів, характерних для систем, що перебувають у стані далекому від рівноваги.

1.2. Аналіз основних факторів, що впливають на ефективність функціонування інформаційних мереж.

Інформаційна бездротова мережа з можливістю самоорганізації *(Self-Organizing Network, SON)* – це динамічні системи зв'язку, структура яких не фіксована наперед і може змінюватися відповідно до поточних умов функціонування. Така бездротова мережа здатна автономно перерозподіляти

функції між своїми вузлами у процесі зміни трафіку, підключення нових або відключення наявних пристроїв [6, 8]. Основною відмінністю самоорганізованих інформаційних мереж від традиційних є можливість прямого обміну даними між будь-якими вузлами, що перебувають у зоні зв'язку, без залучення централізованої інфраструктури [12, 14]. Кожен вузол такої мережі одночасно може виконувати функції як кінцевого пристрою, так і проміжного маршрутизатора, що передані дані далі напрвляє по мережі.

Самоорганізовані мережі зазвичай функціонують на основі безпровідних каналів зв'язку, оскільки користувацькі пристрої можуть вільно переміщуватися у просторі, виконуючи роль як терміналів, так і точок доступу [8, 14]. Через цю мобільність топологія мережі постійно змінюється, що робить її динамічною та адаптивною системою. Для побудови подібних мереж найчастіше використовуються технології *ZigBee, Bluetooth* та *Wi-Fi* [6, 17].

Розвиток сучасних бездротових технологій *ZigBee* та швидке зростання кількості мобільних пристроїв створюють передумови для формування нових підходів до організації інформаційних мереж. За даними аналітичних досліджень, кількість мобільних терміналів у світі невпинно зростає і вже найближчими роками перевищить кількість стаціонарних пристроїв, що визначає необхідність переходу від централізованих архітектур до децентралізованих мережевих систем [6].

Одним із найперспективніших напрямів є самоорганізовані бездротові мережі, у яких вузли можуть автономно встановлювати, підтримувати та відновлювати канали зв'язку без участі центрального контролера [14]. До таких систем належать *Mesh*-мережі, мобільні *ad hoc*-мережі *(MANET),* сенсорні *(WSN)* та тактильні мережі нового покоління, що застосовуються у сфері транспорту, оборони, моніторингу навколишнього середовища та промислових *IoT*-рішень [17].

Особливістю цих мереж є їхня адаптивність, що дозволяє їм перебудовувати структуру в реальному часі залежно від змін топології, навантаження або умов передачі сигналу. Самоорганізація забезпечується через

обмін службовими повідомленнями між вузлами, які одночасно можуть виконувати роль як передавача, так і ретранслятора даних. У результаті формується динамічна багатошарова структура зв’язків, здатна самостійно реагувати на дестабілізуючі фактори – завади, втрату вузлів або зміну умов передачі [20].

Для реалізації таких систем використовуються стандарти бездротового зв’язку *Bluetooth, Wi-Fi, ZigBee, LTE-A* та *5G,* що забезпечують масштабованість і високу швидкість обміну інформацією. Дослідники відзначають, що ефективність функціонування таких мереж значною мірою залежить від алгоритмів маршрутизації, управління трафіком і механізмів самоорганізації [6, 12, 17].

Одним із найбільш поширених типів самоорганізованих інформаційних систем є *Mesh*-мережі, які формуються на основі бездротових технологій *Wi-Fi, Bluetooth* або *ZigBee.* Такі мережі мають комірчасту архітектуру, у якій стаціонарні вузли-маршрутизатори створюють магістральну структуру обміну даними, а кінцеві користувачі – мобільні або фіксовані пристрої – підключаються до найближчих вузлів у межах зони радіовидимості [17]. Основною властивістю *Mesh*-мереж є здатність до автоматичного відновлення маршруту у випадку виходу з ладу одного з вузлів, що забезпечує високу надійність і відмовостійкість системи. Топологічно такі мережі зазвичай наближені до структури "зірки" або гібридної решітки, де окремі вузли можуть мати випадкові міжвузлові зв’язки [8, 14].

Іншим різновидом самоорганізованих систем є мобільні бездротова мережа *ad hoc*-мережі, які характеризуються повною децентралізацією управління та відсутністю базових станцій чи опорних елементів. Кожен вузол у *MANET* одночасно виконує функції як термінала, так і маршрутизатора, забезпечуючи передачу даних між іншими вузлами.

На відміну від *Mesh*-архітектури, де опорна структура частково фіксована, у *MANET*-топологія постійно змінюється через мобільність вузлів і динамічні зміни радіоумов. Це зумовлює потребу у маршрутизаційних

алгоритмах із високою адаптивністю та можливістю швидкого реагування на зміну конфігурації мережі [14, 20].

Такі мережі активно використовуються у тактичних комунікаційних системах, транспортних платформах, розподілених сенсорних мережах та системах екстреного реагування, де необхідне стабільне з'єднання в умовах обмеженої інфраструктури.

Бездротові сенсорні мережі *(WSN)* здебільшого використовуються як телеметричні системи для збору та передавання даних у розподілених середовищах. Такі мережі складаються з компактних сенсорних вузлів, що виконують функції вимірювання, локальна обробка даних й передавання інформації до центрального вузла або базової станції через радіоканал. Основною перевагою є автономність і здатність до самоорганізації, що забезпечує побудову динамічної топології залежно від стану вузлів і умов середовища.

Незалежно від типу інформаційної мережі *Mesh, MANET* чи *WSN* – для них характерні динамічна зміна структури, енергетичні обмеження вузлів, варіативність пропускної здатності каналів і неоднорідність за потужністю передавачів та мобільністю. Такі особливості впливають на стабільність, безпеку й ефективність обміну даними, тому повинні враховуватися на всіх етапах побудови та модель управління самоорганізованими інформаційними мережами.

Важливим етапом побудови самоорганізованої інформаційної мережі є формування її топології, тобто встановлення фізичних і логічних зв'язків між вузлами, а також модель управління топологічною структурою під час зміни умов функціонування. При цьому необхідно враховувати просторове розташування вузлів, оскільки воно безпосередньо впливає на якість зв'язку та маршрутизацію. У різних протоколах доступу до середовища передбачено власні механізми визначення координат і сусідства вузлів. Найбільш поширеними є підходи, що базуються на географічному позиціонуванні вузлів, методах визначення віртуальних координат або тріангуляції. Також

застосовуються способи оцінювання відстані між вузлами за рівнем потужності прийнятого сигналу *(RSSI),* часом затримки передавання *(ToA)* та іншими радіопараметрами, що дозволяють підвищити точність формування топології в динамічних умовах роботи мережі. [1, 10 – 12].

Управління в інформаційних мережах, що самоорганізуються, має низку специфічних особливостей і суттєво відрізняється від керування в інфраструктурних системах. По-перше, процес управління має бути розподіленим між усіма вузлами мережі, забезпечуючи повну децентралізацію прийняття рішень. По-друге, формування керувальних рішень повинно здійснюватися оперативно, у межах жорстких часових обмежень, що обумовлено динамікою змін топології [9].

До основних принципів управління вузлом у мережі, що самоорганізується, належать адаптивність, функціональність, розподіленість, координація взаємодії, ієрархічність та автоматизація процесів прийняття рішень. Механізм управління має забезпечувати моніторинг стану вузлів, збирання й обробка даних про топологію, а також прийняття рішень щодо зміни конфігурації мережі, маршрутизації та параметрів передавання даних [9].

Під час управління мережею важливу роль відіграють керовані параметри фізичного, канального й мережевого рівнів, зокрема потужність передавача, тип модуляції, швидкість передавання даних. Водночас слід враховувати некеровані фактори, такі як динаміка зміни топології, мобільність вузлів і розмірність мережі, що істотно впливають на ефективність її функціонування.

Для вирішення завдань управління топологією мережі існує багато алгоритмів [7, 11 – 14].

Існуючі підходи до керування топологією інформаційних мереж, що самоорганізуються, поділяються на однорідні та неоднорідні. В однорідних системах передбачається, що всі вузли мають однакову потужність передавачів і фіксований радіус дії, тобто модель управління здійснюється за єдиними параметрами для всієї мережі. У разі використання неоднорідних методів допускається керування характеристиками вузлів на різних рівнях моделі *OSI*

[11-14]. Це забезпечує більшу гнучкість та адаптивність мережі, дозволяючи змінювати параметри передачі, енергоспоживання чи маршрутизації залежно від умов функціонування.

У межах неоднорідних підходів до керування топологією інформаційних мереж виділяють централізовані та децентралізовані алгоритми.

Децентралізовані методи, у свою чергу, поділяються на геометричні, що базуються на інформації про просторове розташування вузлів, та графові, у яких кожен вузол має відомості лише про своїх безпосередніх сусідів [14]. Найбільш поширеними графовими підходами є алгоритми *LMST, DLSS, FLSS,* що забезпечують ефективне побудування та підтримання топології мережі [12, 17].

З огляду на складність управління мобільними вузлами в динамічному середовищі, зростає інтерес до методів, заснованих на теорії ігор, які дозволяють моделювати процес прийняття рішень вузлами як взаємодію раціональних агентів [14, 20-23].

На основі проведеного аналізу можна зробити висновок, що підходи до побудови самоорганізованих мереж суттєво відрізняються від методів, застосовуваних в інфраструктурних системах. Процес встановлення та підтримання зв’язків між вузлами має динамічний характер, що потребує спеціальних рішень для швидкої адаптації топології. Існує широкий спектр алгоритмів управління, які використовуються в протоколах маршрутизації таких мереж, а їх вибір визначається використаною технологією бездротового *ZigBee* доступу та вимогами до продуктивності системи.

Як зазначалося раніше, формування фізичної топології інформаційних мереж, що самоорганізуються, значною мірою визначається технологіями доступу до середовища передавання даних. Більшість сучасних самоорганізованих систем базуються на існуючих стандартах бездротового зв’язку, таких як *IEEE* 802.15.1 *(Bluetooth), IEEE* 802.11 *(Wi-Fi), IEEE* 802.15.4 *(ZigBee)* тощо, вибір яких залежить від призначення та умов функціонування мережі [18–20].

Розширення смуги пропускання зазвичай супроводжується збільшенням енергоспоживання пристроїв, що використовуються у мережі [19].

Найбільш енергоефективними вважаються стандарти *RFID* та *IEEE* 802.15.4, які дають змогу працювати пристроям від однієї батареї протягом кількох років. Водночас стандарт *Wi-Fi*, що забезпечує вищі швидкості передавання даних, характеризується підвищеним енергоспоживанням, хоча нині активно розробляються методи його оптимізації [23].

Під час вибору технології *ZigBee* доступу слід враховувати споживану потужність, пропускну здатність, кількість одночасно активних пристроїв та інші параметри, що впливають на ефективність роботи системи. Крім того, необхідно враховувати переваги й обмеження кожного стандарту, оскільки саме поєднання їхніх властивостей визначає баланс між енергоспоживанням, швидкодією та масштабованістю мережі.

Слід зазначити, що незалежно від технології доступу, яка використовується, у процесі формування та модель управління топологією мережі, а також під час керування окремими вузлами, застосовуються різні підходи.

Аналіз сучасних технологій доступу показав, що бездротові стандарти *Wi-Fi, Bluetooth* та *IEEE* 802.15.4 *(ZigBee)* є найпоширенішими у побудові мереж, що самоорганізуються.

Під час вибору базової технології необхідно враховувати призначення мережі *(Mesh, MANET, WSN, ZigBee)*, характер розв’язуваних завдань, а також переваги й обмеження кожного зі стандартів.

На даний час для таких мереж ключовими залишаються завдання формування топології (встановлення фізичних зв’язків між вузлами), міжвузлового управління та організації ефективної маршрутизації.

Важливу роль у функціонуванні мереж, що самоорганізуються, відіграє модель управління, зокрема механізми маршрутизації. Під маршрутизацією розуміють процес визначення оптимального шляху, яким інформаційний пакет доставляється від вузла-відправника до вузла-одержувача [25].

Комплекс процедур, що реалізують цей процес, описується у протоколах маршрутизації, які використовуються у реальних телекомунікаційних системах. Один пристрій мережі *WSN* може підтримувати кілька таких протоколів. Протокол маршрутизації — це мережевий протокол, який визначає правила пошуку, вибору та оновлення маршрутів передавання даних у мережі [26, 27].

Слід зазначити, що вимоги до протоколів маршрутизації в мережах, що самоорганізуються, суттєво відрізняються від вимог, характерних для інфраструктурних (провідних) мереж типу *LAN* чи *WAN*. Незважаючи на те, що основні алгоритми пошуку маршрутів можуть бути подібними, специфіка бездротових систем полягає у динамічності топології: вузли можуть змінювати положення, енергетичні параметри чи стан зв'язку. Через це традиційні протоколи маршрутизації, ефективні в стаціонарних мережах, часто виявляються неефективними або навіть непридатними для використання в умовах самоорганізованих бездротових систем.

З огляду на наведене, розв'язання задачі маршрутизації в мережах, що самоорганізуються, є актуальним і становить важливу науково-практичну проблему. Це підтверджується численними дослідженнями вітчизняних і зарубіжних авторів [28, 29] та інших.

Вибір конкретного протоколу маршрутизації для таких мереж визначається низкою факторів, серед яких – тип і технологія бездротового доступу, розміри мережі, її топологія, мобільність вузлів та параметри навантаження. Оптимальне поєднання цих характеристик дозволяє забезпечити ефективний обмін даними та стабільність функціонування мережі навіть в умовах динамічних змін її структури.

Протоколи маршрутизації в мережах, що самоорганізуються, незалежно від алгоритмів, покладених в їх основу, повинні містити механізми, спрямовані на розв'язання таких основних завдань [30]: – виявлення сусідніх станцій;

– виявлення сусідніх вузлів (станцій) та встановлення початкових зв'язків між ними;

– оцінювання якості каналів зв'язку між суміжними вузлами;

– розповсюдження службової інформації про поточний стан мережі *WSN*;

– вибір оптимальних маршрутів для передачі інформаційних пакетів;

– ретрансляцію даних за обраними маршрутами.

У роботах [28, 31] сформульовано низку вимог до ефективного вирішення завдань маршрутизації в мережах, що самоорганізуються. Серед них – мінімальний час побудови маршруту, висока надійність доставки пакетів, обмежений обсяг службового трафіку, відсутність петель у маршрутах, наявність механізмів швидкого виявлення та відновлення розірваних з'єднань, висока масштабованість і підтримка необхідного рівня якості обслуговування *(QoS)*. З розвитком мереж *WSN* такого типу до цих вимог додаються й інші, зумовлені зростанням обчислювальної складності та обсягів трафіку.

На сьогодні розроблено велику кількість протоколів маршрутизації для мереж, що самоорганізуються. Однією з найпоширеніших класифікацій є поділ за принципом функціонування. Зокрема, проактивні (табличні) протоколи маршрутизації підтримують актуальні таблиці маршрутів, періодично обмінюючись службовими повідомленнями про зміни топології мережі. У результаті кожен вузол зберігає в пам'яті таблицю доступних маршрутів до інших вузлів і може оперативно здійснювати передачу даних за потреби [31].

Основна відмінність між проактивними протоколами маршрутизації полягає у виборі базового алгоритму, що використовується для побудови таблиць маршрутів. Переважна більшість таких протоколів базується на алгоритмах Беллмана–Форда (із різними модифікаціями) або алгоритмі Дейкстри, які забезпечують пошук найкоротшого шляху між вузлами мережі. Серед найвідоміших проактивних протоколів, що застосовуються в мережах, які самоорганізуються, варто відзначити *DSDV, OLSR, FSR, WRP, B.A.T.M.A.N.* та *Babel, WSN*. [6, 7, 31–36].

Проведений аналіз показує, що проактивні протоколи маршрутизації демонструють найвищу ефективність у невеликих і малорухливих мережах. Однак зі зростанням кількості вузлів та динаміки топології обсяг службового трафіку значно збільшується, що призводить до перевантаження мережі та

підвищеного енергоспоживання вузлів. Це суттєво обмежує можливість використання проактивних протоколів у великих мобільних мережах типу *Ad-Hoc (MANET)* [30].

Досить поширеним підходом є реактивні *(on-demand)* протоколи маршрутизації. Їхня особливість полягає в тому, що побудова маршруту до певного вузла здійснюється лише у момент виникнення потреби в передачі даних. Передавальний вузол у цьому випадку ініціює широкомовне розсилання по мережі запиту на встановлення маршруту, який має досягти вузла-призначення. У відповідь вузол-одержувач формує повідомлення підтвердження, на основі якого відправник визначає оптимальний маршрут і заносить його до власної таблиці маршрутів.

Під час наступних передач даних цей маршрут використовується повторно, доки він залишається актуальним. У разі втрати зв’язку або зміни топології активується процедура оновлення або відновлення маршруту. До найбільш відомих реактивних протоколів маршрутизації належать *AODV, DSR* та *DYMO* [22].

На відміну від проактивних, реактивні протоколи маршрутизації виявляють вищу ефективність у динамічних середовищах, зокрема в мережах типу *MANET, WSN* завдяки зменшенню обсягу службової інформації, що передається мережею, оскільки маршрути формуються лише за необхідності. Проте, попри свої переваги, такі протоколи мають низку обмежень. Серед них – збільшення затримки під час первинного пошуку маршруту, що особливо проявляється при великій кількості вузлів і високій мобільності [28]. Це може призводити до зниження ефективності або навіть втрати працездатності системи. Додатковим недоліком є потреба у відновленні маршрутів у режимі реального часу, що ускладнює використання реактивних протоколів для трафіку з жорсткими часовими вимогами, таких як відео- чи голосова передача.

Для усунення недоліків як проактивних, так і реактивних підходів були запропоновані гібридні протоколи маршрутизації, які поєднують механізми обох типів. Зазвичай такі протоколи поділяють мережу на множину підмереж

(кластерів), усередині яких застосовується проактивна багатошляхова маршрутизація, тоді як обмін між підмережами відбувається за реактивним принципом. Подібна структура дає змогу зменшити розмір таблиць маршрутів, оскільки кожен вузол зберігає передані дані лише про вузли власного кластера. Крім того, це скорочує обсяг трафіку, що розповсюджується мережею, обмежуючи його циркуляцію межами підмереж. Серед найпоширеніших гібридних протоколів варто відзначити *HWMP, ZHLS* та *ZRP* [29, 32-36].

Поєднання переваг проактивних і реактивних протоколів маршрутизації дало змогу створити гібридні підходи, що ефективно застосовуються у великих і динамічних мережах, зокрема в мобільних мережах *Ad-hoc (MANET), WSN*. Водночас їхнім суттєвим недоліком залишається підвищена складність реалізації, потреба у більш потужних обчислювальних ресурсах вузлів, а також зниження ефективності маршрутизації, пов’язане з необхідністю кластеризації мережі [28].

Питання вдосконалення протоколів маршрутизації в умовах самоорганізованих мереж розглянуто у низці робіт [28, 29, 32] та інших, де запропоновано підходи до підвищення ефективності маршрутизації незалежно від розмірності, динаміки чи типу мережі.

Отже, можна зробити висновок, що існуючі протоколи маршрутизації, попри широке застосування, мають низку обмежень, які потребують подальшого вирішення. Вибір конкретного протоколу здебільшого визначається призначенням мережі, рівнем мобільності вузлів і вимогами до якості обслуговування *(QoS).* Для невеликих або малорухливих мереж доцільно застосовувати проактивні чи реактивні протоколи, тоді як у масштабних – ефективнішими є гібридні рішення.

Значна частина дестабілізуючих факторів безпосередньо пов’язана з порушенням інформаційної безпеки інформаційних мереж.

Оскільки самоорганізовані мережі є бездротовими, для них залишаються актуальними традиційні проблеми бездротових технологій – енергоефективність, синхронізація, електромагнітна сумісність, безпека

передавання даних тощо. Для їх мінімізації використовуються завадостійкі види модуляції та технології *MIMO* на апаратному і програмному рівнях.

З проведеного аналізу встановлено, що більшість проблем у мережах, що самоорганізуються, мають взаємозалежний характер і потребують комплексного підходу до їх вирішення. Однією з ключових проблем залишається визначення просторового розташування вузлів.

На сьогодні для вирішення цього завдання розроблено різноманітні методи позиціювання, серед яких найбільшого поширення набули методи тріангуляції, що дають змогу з високою точністю визначати координати вузлів навіть у динамічно змінюваних умовах мережевої топології.

На сучасному етапі розвитку інформаційних технологій однією з ключових проблем залишається пошук і розробка ефективних протоколів маршрутизації для мереж, що самоорганізуються. Більшість існуючих рішень демонструють прийнятну ефективність лише в мережах невеликого масштабу, проте стикаються з проблемою масштабованості та зниження продуктивності. Залежно від типу мережі використання традиційних протоколів може призводити до неефективного розподілу ресурсів або навіть до порушення працездатності мережі *WSN*.

Питання підвищення ефективності маршрутизації розглядаються у численних наукових роботах [29–31], однак остаточного рішення цієї проблеми поки не існує. Водночас залишається низка відкритих наукових завдань, пов’язаних із підвищенням ефективності функціонування інформаційних мереж *WSN* із можливістю до самоорганізації [4].

1.3. Аналіз методів підвищення ефективності функціонування інформаційних мереж.

Попри значну кількість сучасних досліджень у сфері стандартів і специфікацій когнітивних радіосистем, відсутня їх узгоджена систематизація. Аналіз наукових джерел показує, що як українські, так і зарубіжні дослідники

зосереджуються на окремих аспектах проблеми, проте низка напрямів досі вивчена недостатньо.

У роботі [1] розглянуто стандарт *IEEE* 802.11, який забезпечує ефективніше використання спектра, але має невирішені питання сумісності та значні витрати на впровадження.

Для усунення цих обмежень у праці [2] запропоновано підхід до розподіленого управління ресурсами. З урахуванням цього актуальним є подальше вдосконалення механізмів забезпечення сумісності в когнітивних системах.

У роботі [3] подано результати математичного моделювання процесів розподілу пропускної здатності в когнітивних радіорелейних мережах, однак питання ефективності використання спектра в умовах інтенсивних завад залишилось відкритим.

Однією з причин цього є неоднозначність інтерпретації ситуацій штучним інтелектом (ШІ), що обмежує доцільність його застосування в окремих програмних рішеннях. Потребує подальших досліджень питання підвищення етичних стандартів використання ШІ у сфері регіональної безпеки.

У роботі [4] досліджено застосування *Named Data Networking* у когнітивних радіомережах.

Показано, що такий підхід підвищує ефективність обміну даними, проте залишаються відкритими проблеми конфіденційності через складність інтеграції механізмів приватності. Їх можна частково усунути шляхом розробки додаткових рівнів безпеки, що вимагає подальших досліджень.

У дослідженні [5] подано метод шифрування із використанням веб-сторінок як криптографічного ключа, однак не враховано ризики зміни веб-контенту, що знижує надійність системи у застосуванні до розумного радіо. Це може бути вирішено через використання стабільніших джерел даних, хоча питання практичної реалізації потребує подальших досліджень.

У [6] увагу приділено інтеграції ШІ в технології регіональної безпеки. Автори визначили низку практичних принципів, проте не охопили загальний

контекст впливу на мережеву інфраструктуру, ймовірно через обмеження швидкодії. Подальші роботи доцільно спрямувати на вдосконалення алгоритмів де обробка даних.

У праці [7] запропоновано метод зниження інтерференції між сусідніми частотними діапазонами в когнітивних системах.

Підхід демонструє ефективність, проте залишаються питання стабільності роботи в різних умовах через апаратні обмеження системи.

Варіантом усунення зазначених проблем може бути впровадження адаптивних технологій, що дають змогу системам автоматично підлаштовуватися до умов середовища, однак цей напрям потребує подальших досліджень.

У роботі [8] представлено результати оптимізації мережевих структур для аудіоаналітики.

Доведено, що впровадження алгоритмів машинного навчання підвищує ефективність обробки аудіоданих, проте залишаються відкритими питання масштабованості через високі витрати на обладнання та програмне забезпечення.

Можливим шляхом розв’язання є використання хмарних рішень, однак це потребує додаткового аналізу економічної доцільності.

У дослідженні [9] розглянуто вплив неповної інформації про канал зв’язку на ймовірність відмов у когнітивних мережах. Недоліком є відсутність механізмів адаптації до змін середовища. Це може бути компенсовано розробкою більш стійких алгоритмів передачі, що забезпечить підвищення надійності систем.

У праці [10] проаналізовано підходи до балансування навантаження в мережах, проте не вирішено питання сумісності з іншими стандартами безпеки. Це пов’язано зі складністю інтеграції нових рішень у застарілі системи. Перспективним напрямом є створення модульних архітектур, які потребують подальшого опрацювання для гармонізації старих і нових технологій.

У роботі [11] удосконалено методи керування радіочастотним спектром у

когнітивних системах із використанням штучних нейронних мереж.

Разом із тим залишаються невирішеними проблеми масштабування та адаптації в складних мережах через високу обчислювальну складність. Потенційним рішенням є застосування оптимізованих алгоритмів машинного навчання, що потребує подальшого дослідження.

У [12] проаналізовано методи аналізу спектру в когнітивних мережах, проте не розглянуто їх інтеграцію у загальну архітектуру систем зв'язку. Технічні обмеження можна подолати шляхом створення універсальних інтерфейсів, ефективність яких має бути перевірена у майбутніх дослідженнях.

У роботі [13] наведено аналіз безпеки в когнітивних радіомережах, підкреслено необхідність розвитку підходів до захисту, проте не запропоновано конкретних рішень для змінних умов частотного середовища.

Доцільним є розроблення адаптивних алгоритмів безпеки, що потребує подальших досліджень.

У працях [14, 15] зроблено значний внесок у сферу фільтрації даних і машинного навчання, однак не враховано їх інтеграцію в загальну інфраструктуру когнітивного радіо, що обмежує практичне застосування отриманих результатів. Причиною є обмежені ресурси для інтеграції складних алгоритмів та складна адаптація до змінних умов когнітивних радіомереж.

Варіантом подолання є розробка модульних інтегрованих рішень адаптації, що вимагає подальших досліджень для оптимізації алгоритмів.

1.4. Постановка наукового завдання дослідження.

Проведений аналіз особливостей побудови інформаційних мереж показав наявність протиріччя між потенційними можливостями сучасних методів самоорганізації та зростаючими вимогами до їх ефективності [63, 65, 57, 60, 66, 67, 69] (рис. 1.1). Зокрема, існуючі підходи не забезпечують достатньої здатності до адаптації вузлів за змінних умов роботи, часто мають централізований характер де модель управління, не орієнтована на прийняття

рішень у реальному часі, а базуються на обмеженій кількості параметрів під час оцінювання стану мережі (або мобільних вузлів) і характеризуються високою обчислювальною складністю.



Рис. 1.1 – Загальна схема вирішення наукового завдання дисертаційного дослідження

Враховуючи виявлені недоліки, у роботі запропоновано новий підхід до самоорганізації інформаційних мереж, який реалізує принцип адаптивної взаємодії системи з умовами її функціонування та забезпечує необхідний рівень якості обслуговування.

Його сутність полягає у поетапній реалізації функцій управління – покриття, моніторингу та передачі даних – із урахуванням наявних ресурсних обмежень та динаміки навантаження. Відповідно до проведеного аналізу сформуємо вихідні положення та вхідні передані дані для подальшого дослідження.

Задано: ІМ представляться у вигляді графа $G = (V, E)$ із множиною вершин $V = \{i\}$ і множиною ребер $E = \{(i, u)\}$, $i,u \in V$; C_i – множина сенсорів $i = \overline{1,n}$, d_{iu} – відстань між сенсорними вузлами, множина шлюзів $D \in V$.

Параметри ψ_i *сенсорного вузла* $i = \overline{1,\ N}$: координати розміщення (x_i, y_i); потужність передачі $p_i = p_{\min} \ldots p_{\text{пор}}$; інтенсивність подачі інформації моніторингу Q_i^{ξ} ξ-го типу трафіку; енергія батареї $e_i \le E_{\text{поч}}$; енергія, яка необхідна для передачі, прийнята інформація та моніторинг відповідно $e^{\text{Пд}}, e^{\text{Пр}}$, $e^{\text{мон}}$, $r_{i\ \text{мон}}$ – радіус моніторингу, $r_{i\ \text{пер}}$ – радіус передачі, β_i – кут сектору спостереження.

Параметри інформаційного обміну: інтенсивність вхідних потоків $Q^{\xi}(t) = \left\| Q_{aD}^{\xi}(t) \right\|$, які визначаються множиною цілей Z_j (зон спостереження) $j = \overline{1,m}$, $\sum_{a=1}^{n} \sum_{b=1}^{D} q_{aD}^{\xi}(t) \le q_{\max}^{\xi}$, де a – відправник, D – базова станція, $t_{\text{з}}^{\xi}(m_{aD})$ – затримка передачі ξ-го типу трафіка за маршрутом m_{aD}, $l_{aD}^{\xi}(m_{aD})$ – кількість ретрансляцій по маршруту m_{aD}, F – швидкості передачі даних в радіоканалі; ξ=1,2 – тип трафіка (передані дані, відео); q_{iu}^{ξ} – інтенсивність потоку пакетів в радіоканалі iu, що надходять за всіма маршрутами m_{aD};

Параметри мережі: кількість стаціонарних i=1...N та мобільні мережі сенсорних вузлів , j = 1…M; $\omega(t) \le \omega_{\max}$ – інтенсивність зміни топології; $R(t) = \|r_i(t)\|$ – швидкості передачі даних в радіоканалі; $E(t) = \|e_i(t)\|$ – енергія батареї; тип покриття (бар'єрне, площі, цілей) площі моніторингу A.

Множина цілей управління. На етапі функціонування СУ ІМ реалізує множину цілей управління $\text{Ц} = \left\{ \text{Ц}^{\text{ІМ}} \right\}$, які залежать від її функцій (покриття, моніторинг, передані дані – телекомунікаційна складова) при обмеженнях на якість обслуговування при покритті, моніторингу, передачі даних та наявних ресурсів [1-5].

Ціллю покриття може бути забезпечення покриття певного типу: площі, бар'єру, часткового (α-покриття) покриття: $\text{Ц}_{\text{пок}} = \left\{ \text{Ц}_{\text{пок}}^{\text{пл}}, \text{Ц}_{\text{пок}}^{\text{б}}, \text{Ц}_{\text{пок}}^{a-\text{пок}} \right\}$.

Зважаючи на високу складність формалізації процесу де модель управління та з урахуванням відмінностей у побудові ІМ різних типів здійснюється декомпозиція завдання синтезу методів та методик саморганізації за функціями управління та рівнями моделі *OSI* (мережевому $U_{\text{мер}} = \{ U_{\text{мар}}(t), U_{\text{топ}}(t) \}$ і прикладному $U_{\text{пок}} = \{ U^{\text{пл}}_{\text{пок}}, U^{\text{б}}_{\text{пок}}, U^{a-\text{пок}}_{\text{пок}} \}$ для досягнення системної оптимізації:

$$U^*(t) = \arg \underset{U \in \Omega}{opt} \{ \text{Ц}(K(t), U(t)) \}, \tag{1.1}$$

$$\text{Ц} = \{ \text{Ц}^{\text{пок}}, \text{Ц}^{\text{топ}}, \text{Ц}^{\text{мар}} \}, \ \text{Ц}^{\text{пок}} \succ \text{Ц}^{\text{топ}} \succ \text{Ц}^{\text{мар}}, \tag{1.2}$$

$$\text{Ц}_{\text{пок}} = \left\{ \text{Ц}^{\text{пл}}_{\text{пок}}, \text{Ц}^{\text{б}}_{\text{пок}}, \text{Ц}^{a-\text{пок}}_{\text{пок}} \right\}, \tag{1.3}$$

$$\text{Ц}^{\text{пок}}_{\text{б}} = \{ (\Pi_{\text{сил}}; \Pi_{\text{сл}}, \min C_{\text{мобвз}}, \min \sum l_{\text{м}} \}, \tag{1.4}$$

$$\text{Ц}^{k\text{-пок}}_{\text{пл}} = \{ \max m_{\text{пл}}, \ \max T_{\text{ф}_{\text{БСМ}}} \}, \tag{1.5}$$

$$\text{Ц}^{\alpha\text{-пок}}_{\text{пл}} = \{ \Pi^{\alpha}_{\text{пл}} \geq \Pi^{\alpha}_{\text{зад}}, \max T_{\text{ф}_{\text{БСМ}}}, \ \text{НВМ} \leq \text{НВМ}_{\text{зад}} \}, \tag{1.6}$$

$$\text{Ц}^{\text{ткм}} = \{ \text{Ц}^{\text{топ}}, \text{Ц}^{\text{мар}} \}, \tag{1.7}$$

$$\text{Ц}^{\text{топ}} = \{ Cv_{iD} = 1, \ \min P_{\text{заг}}, \ l(iD) \} \leq l_{\text{зад}}, \max T_{\text{ф}} \}, \tag{1.8}$$

$$\text{Ц}^{\text{мар}} = \{ \min P_{\text{мар}}, \max S_{\text{мар}} (S_{\text{мар}} \geq S_{\text{пор}}), \max T^{n\text{ткм}}_{\text{ф}} \}, \tag{1.9}$$

$$K(t) = \{ N(t), M(t), p_i(t), e_i(t), r_{i\text{мон}}(t), r_{i\text{пер}}(t), \left\| Q^{\xi}(t) \right\|, O(t), \omega(t), Cv(t) \}, \tag{1.10}$$

де $\mathbf{Ц}$ – ціль управління ІМ, що визначається оператором мережі (виходячи з обстановки), параметрами стану мережі та зон спостереження; U^* – оптимальний управляючий вплив в ІМ з множини $U(t)$; $K(t)$ – параметри функціонування ІМ.

Позначення: $\mathrm{О}(t) = \{ X(t)$ або $Z(t)$ або $\mathrm{Б(t)} \}$ – об'єкти покриття (Z – цілі спостереження, X – площа спостереження, Б – побудова бар'єру спостереження); α – ступінь покриття ($\alpha =]0...1]$); $\omega(t)$ – інтенсивність зміни топології; $Q^{\xi} = \|q_{iD}\|$ – інтенсивність та тип ξ-го трафіку моніторингу; $S^{\xi}_{\text{мар}}$ – пропускна спроможність маршруту для ξ-го типу трафіка; $Cv(t) = \|Cv_{iD}(t)\|$ – наявність маршруту між i и D; $t^{\xi}_{\text{з}}$ – затримка передачі трафіка ξ- го типу; $s(cv_{iD})$ – пропускна спроможність радіоканалу; l^{ξ}_{ab} – кількість ретрансляцій для пари вузлів (a, D) за маршрутом m_{aD}, a – відправник, D – адресат (шлюз); p_i – потужність передачі i-го вузла відповідно до прийнятих маршрутних рішень; C – множина сенсорних вузлів; $e^{\text{б}}_i$ – енергія батареї сенсорних вузлів; $t^{\xi}_{\text{здоп}}$, $l^{\xi}_{\text{доп}}$ – допустимі значення параметрів.

При виконанні обмежень на множину управляючих впливів та ресурси мережі:

$$\Omega = f\left(\Omega_{\text{пок}}, \Omega_{\text{ткм}}, \Omega_{\text{рес}}\right),$$

$\Omega_{\text{пок}}$ – обмеження при управління покриттям, $\Omega_{\text{ткм}}$ – обмеження при управлінні телекомунікаційною складовою, $\Omega_{\text{рес}}$ – мережеві обмеження ресурсів:

$$\Omega_{\text{рес}} = \begin{Bmatrix} p_i \le p_{\text{пор}},\ r^{\xi}_{\text{мон}} \le r^{\xi}_{\text{монmax}}), \\ M_j(t) \le M_j(t)^{\text{зад}},\ r_{\text{пер}} \le r^{\xi}_{\text{перmax}} \\ e^{\text{б}}_i \le e^{\text{б}}_{i\max} \end{Bmatrix},$$

$$\Omega_{\text{пок}} = \left\{ \begin{array}{l} 0 \le e_i(t) \le e_{\max} \;\; i = \overline{1, n_{\text{О пок}}}, \\ p_i(t) \le p_{\max}, \; Cv_{iD} = 1 \end{array} \right\},$$

$$\Omega_{\text{ткм}} = \left\{ \begin{array}{l} Cv_{iD} = 1, \;\; t_{\text{з}}^{\xi}(m_{iD}) \le t_{\text{здоп}}^{\xi}(l_{iD}^{\xi}(m_{iD}) \le l_{\text{доп}}^{\xi}), \\ q_{iD}^{\xi} \le s_{\text{доп}}(cv_{iD}), \;\; S_{\text{мар}}^{\xi} \ge S_{\text{пор}}, Q^{\xi}(t) = \left\| Q_{iD}^{\xi}(t) \right\| \le Q_{\max} \end{array} \right\}.$$

Кінцева мета де модель управління інформаційною мережею полягає у досягненні екстремальних або заздалегідь визначених значень цільового функціонала. Це може означати, наприклад, забезпечення максимального чи необхідного рівня покриття (сильного або слабкого), мінімізацію або стабілізацію потужності передавачів у межах певної топології мережі, а також вибір маршруту з максимальною чи заданою пропускною здатністю.

Усі ці показники визначаються для мережі в цілому або її окремих зон з урахуванням доступних вузлових і мережевих ресурсів (рис. 1.2).

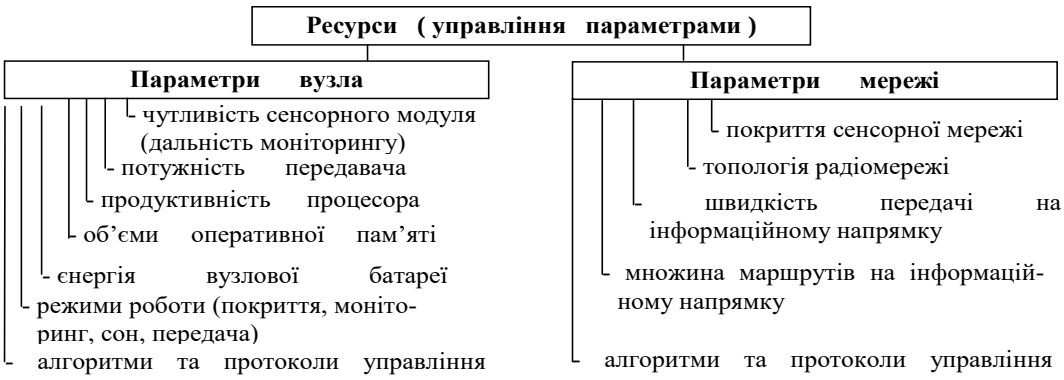


Рис. 1.2 – Ресурси, на основі яких здійснюється управління ІМ

Ресурси вузла поділяються на три основні групи.

До витратних ресурсів належить енергія живлення,раціональне використання якої є критичним для продовження часу автономної роботи вузла.

До керованих ресурсів, що задіюються під час виконання алгоритмів управління, відносять чутливість сенсорного модуля, потужність передавача і швидкість передавання даних.

До обмежувальних ресурсів, що визначають складність алгоритмів управління, належать обчислювальна продуктивність процесора, обсяг оперативної пам’яті, а також програмні режими роботи вузла, які можуть бути реалізовані в межах його апаратних можливостей.

Ресурсами або потенційними можливостями мережі вважаються тип і площа покриття, топологія мережі, швидкість передавання інформації, множина маршрутів передачі, а також алгоритми й протоколи управління.

На першому етапі визначаються вихідні передані дані – об’єкт і предмет дослідження, параметри інформаційної мережі, умови її функціонування, вимоги до методів самоорганізації та показники ефективності.

На другому етапі здійснюється аналіз існуючих методів і методик самоорганізації інформаційних мереж, що застосовуються у стаціонарних та безпроводових системах.

Оцінюється їх відповідність поставленим вимогам, виявляються недоліки й окреслюються напрями їх усунення.

Наступним кроком другого етапу є розроблення методу самоорганізації інформаційних мереж на різних рівнях моделі *OSI*.

Ці рівні, будучи складовими функціональних підсистем де модель управління, мають забезпечувати виконання таких вимог: узгодженість між рівнями, стійкість до дестабілізуючих факторів, адаптивність до змін середовища, мінімальні затримки під час обміну даними, ефективне використання ресурсів мережі та підтримку необхідного рівня якості обслуговування.

Метод самоорганізації має забезпечувати:

– реалізацію основної мети функціонування вузла, що включає покриття, моніторинг та передачу всіх типів інформації із заданою якістю обслуговування;

– можливість прийняття рішень у реальному масштабі часу;

– формування інформаційних потоків з мінімальним навантаженням на мережу;

– раціональне використання вузлових та мережевих ресурсів, зокрема обчислювальних і енергетичних;

– оптимізацію параметрів роботи сенсорних вузлів та всієї інформаційної мережі загалом.

Таким чином, сформульоване наукове завдання спрямоване не лише на підвищення ефективності самоорганізації, але й на забезпечення належного рівня інформаційної безпеки інформаційних мереж.

Висновки до розділу 1.

У даному розділі виконано системний аналіз сучасного стану проблеми підвищення оперативності процесів самоорганізації інформаційних мереж, визначено їхні ключові характеристики, тенденції розвитку та основні напрями подальших досліджень. Проведений огляд моделей і методів самоорганізації інформаційних мереж дозволив зробити висновок про доцільність використання децентралізованих та адаптивних підходів, здатних враховувати невизначеність вхідних даних і змінність умов функціонування. Показано, що ефективна самоорганізація мережі неможлива без формального опису її стану та впливу дестабілізуючих чинників, що зумовлює необхідність розроблення комплексної математичної моделі функціонування інформаційної мережі.

За результатами проведеного аналізу зроблено такі висновки:

1. Аналіз існуючих моделей інформаційних мереж із можливістю до самоорганізації показав їхню обмеженість, зокрема орієнтацію лише на частковий розгляд інформаційних конфліктів на окремих рівнях моделі взаємодії відкритих систем *(OSI).* При цьому залишаються невирішеними питання опису та математичне моделювання взаємного впливу між рівнями, що безпосередньо впливає на ефективність функціонування мережі загалом.

2. На основі аналізу протоколів маршрутизації бездротова мережа *Ad Hoc* установлено, що реактивні протоколи динамічної маршрутизації демонструють вищу ефективність щодо процесів масштабування та здатності до адаптації в

умовах зростання кількості вузлів, їхньої мобільності й географічного розширення меж застосування мережі.

3. Дослідження характеристик протоколів динамічної маршрутизації показало, що найкращі показники за параметрами надійності доставки пакетів, мінімізації службового трафіку й швидкодії демонструє протокол *DSR*. Саме цей протокол обґрунтовано обрано базовим для подальших досліджень, математичне моделювання та вдосконалення в межах дисертаційної роботи.

4. Використання моделей і алгоритмів динамічної маршрутизації в інформаційних мережах із властивістю самоорганізації дозволяє забезпечити збирання і обробка даних необхідних обсягів службової інформації про поточний стан мережі, підвищити точність прийняття рішень щодо побудови маршрутів.

5. Визначено, що синтез методів штучних нейронних мереж з алгоритмами балансування навантаження та керування енергетичними параметрами вузлів сприятиме підвищенню ефективності самоорганізації, зменшенню часу збіжності процесів маршрутизації та подовженню терміну роботи автономних вузлів, які живляться від батарей.

6. Сформульовано наукове завдання, що підлягає вирішенню, визначено концептуальні засади подальших досліджень і запропоновано узагальнену концепцію дисертаційної роботи, спрямовану на підвищення оперативності процесів самоорганізації інформаційних мереж у складних умовах дестабілізуючих впливів.

На підставі виконаного аналізу сформульовано вимоги до методу самоорганізації інформаційних мереж, який повинен забезпечувати швидку перебудову маршрутів і параметрів роботи мережі, стійкість до дестабілізуючих впливів та можливість кількісної оцінки ефективності прийнятих рішень. Отримані в розділі 1 результати слугували підґрунтям для розроблення комплексної математичної моделі та методу самоорганізації інформаційних мереж, що розглядаються в наступних розділах дисертаційної роботи.

РОЗДІЛ 2
МОДЕЛЬ ФУНКЦІОНУВАННЯ ІНФОРМАЦІЙНИХ МЕРЕЖ

Наявні та перспективні системи зв’язку мають забезпечувати обслуговування великої кількості стаціонарних і мобільних користувачів, розташованих у межах певної території, незалежно від їхнього розподілу у просторі. У зв’язку з цим особливої актуальності набувають системи, здатні формувати бездротові інформаційні мережі з можливістю до самоорганізації. Такі мережі не потребують централізованого управління, оскільки кожен вузол у них виконує рівноправні функції передавання, приймання й ретрансляції даних. Запропонована модель дозволяє враховувати вплив дестабілізуючих факторів на стан інформаційної безпеки інформаційної мережі.

Інформаційна бездротова мережа, що самоорганізується, може здійснювати передачу даних у двох режимах: через прямий канал між відправником і одержувачем або через проміжні вузли за принципом транзитної маршрутизації. У таких системах реалізується багатоадресний доступ до спільного частотного каналу, що дозволяє вузлам обмінюватися інформацією незалежно один від одного. Основним механізмом підвищення ефективності функціонування подібних бездротових мереж виступають протоколи маршрутизації, які забезпечують оптимальний розподіл маршрутів, адаптацію до змін топології та мінімізацію затримок при передачі даних.

2.1. Опис протоколів інформаційних мереж.

Дослідження процесів, у яких застосовується математичне моделювання функціонування складних технічних систем в умовах протидії організаційно-технічних факторів, представлені в роботах [51, 52]. Питання потокових моделей багатошляхової маршрутизації в телекомунікаційних мережах розглянуті у працях [53, 54]. Розробці відмовостійких моделей маршрутизації

присвячено дослідження [54, 55], а проблеми багатокритеріального вибору та оптимізації маршрутів висвітлено у роботі [55].

Загальні питання де математичне моделювання телекомунікаційних мереж розглянуто в дослідженнях [56, 57]. У роботі [59] автори вводять кількісний параметр стійкості зв'язку для спеціалізованої бездротової мережі за умови мобільності за моделлю Орнштейна–Уленбека. Значна кількість сучасних досліджень присвячена вдосконаленню моделей маршрутизації з урахуванням підтримки *QoS (Quality of Service)* [57]. У праці [58] запропоновано модель маршрутизації, що наслідує принципи глобальної супутникової мережі компанії *SpaceX* і ґрунтується на використанні знімків поточного підключення до мережі для підвищення ефективності вибору маршрутів.

2.2. Основні математичні співвідношення моделі функціонування інформаційних мереж.

Нині відбувається активне формування методологічних засад теорії інформаційних конфліктів у технічній сфері, що розглядається як закономірний етап розвитку та синтез раніше відокремлених напрямів – теорії інформаційної безпеки, кіберпротидії та управління стійкістю інформаційних систем.

Для дослідження процесів антагоністичної взаємодії в інформаційних мережах, де може бути порушена доступність, цілісність або конфіденційність даних, уже давно введено поняття "інформаційний конфлікт" [51].

У більшості робіт це поняття розглядається у контексті використання технічних засобів впливу на інформаційні потоки з метою дестабілізації процесів обміну та управління [51-54].

Інформаційний конфлікт, у загальному вигляді, має ієрархічну структуру, в якій інформація формується, обробляється та узагальнюється на різних рівнях взаємодії сторін.

В основу архітектури сучасних інформаційних мереж покладено семирівневу модель взаємодії відкритих систем *OSI (The Open Systems*

Interconnection model), що передбачає розподіл функцій управління за рівнями та забезпечує незалежність їх реалізації [56].

Нижній, фізичний рівень інформаційного конфлікту відображає протидію технічних систем, які здійснюють цілеспрямований вплив за допомогою електромагнітних випромінювань чи фізичних впливів на інфраструктуру для отримання первинної інформації про характеристики, параметри або стан об'єктів іншої сторони чи, навпаки, для унеможливлення такого отримання [51].

Як показано в дослідженнях [51-58], сучасний інформаційний конфлікт виходить за межі локальних технічних систем і переходить у глобальний телекомунікаційний простір.

У більшості робіт [51-57], де розглядається взаємодія типу "інформаційно-управляюча система – система дестабілізуючих впливів", аналіз здійснюється лише в межах одного рівня функціонування систем. Водночас у працях [51], [52], [59] підкреслюється, що інформаційний конфлікт має складну ієрархічну структуру та складається з множини дуальних ситуацій на різних рівнях системної взаємодії.

У роботах [51, 52] подальшого розвитку набуває підхід де математичне моделювання інформаційного конфлікту шляхом урахування його багаторівневості та узгодження з моделлю *OSI*. Автори пропонують здійснювати декомпозицію конфлікту на окремі підконфлікти, що виникають на кожному з рівнів моделі, з урахуванням особливостей їх взаємодії.

Таким чином, запропонований у роботах [51, 53] концептуальний підхід де багаторівневе математичне моделювання інформаційного конфлікту з одного боку розвиває існуючі дослідження [51], [54], [57], а з іншого – формалізує опис конфліктної взаємодії згідно з рівнями еталонної моделі *OSI*. Запропонована концептуальна модель *CSI (Conflict System Interconnection Reference Model)* визначає об'єкти, принципи та структуру опису локальних інформаційних конфліктів у межах кожного рівня інформаційних мереж.

Разом із значним науковим внеском розглянутих робіт у розвиток теорії інформаційних конфліктів та впливу дестабілізуючих факторів, залишаються відкритими такі питання:

– математичне моделювання конфлікту інформаційних мереж і дестабілізуючих чинників здебільшого обмежується одним або кількома рівнями без урахування міжрівневого впливу в межах моделі *OSI;*

– не враховується часовий аспект, пов'язаний із збором, обробкою та узагальненням даних, необхідних для прийняття управлінських рішень;

– відсутній облік апріорної невизначеності щодо характеристик та засобів деструктивного впливу;

– не враховується ступінь зашумленості даних, що істотно впливає на достовірність оцінок стану системи.

Наявність зазначених недоліків підтверджує актуальність виконаного дослідження.

Теоретико-множинна модель інформаційної мережі, що функціонує в умовах дестабілізуючих впливів, може бути подана у вигляді наступного виразу:

$$MOD = \{ T, S, F, \Phi, X, U, R, A, Z, E, K, \Lambda, \Theta, Y \}, \qquad (2.1)$$

де T – період часу функціонування інформаційної мережі;

S – простір станів інформаційної мережі;

F – оператор переходів інформаційної мережі;

Φ – оператор зв'язків між ієрархічними рівнями інформаційної мережі:

X – простір параметрів інформаційної мережі;

U – множина управляючих впливів;

R – множина ресурсів інформаційної мережі;

A – множина алгоритмів інформаційної мережі;

Z – множина елементів інформаційної мережі;

E – множина каналоутворюючих засобів в інформаційній мережі;

K – множина каналів, що з'єднують вузлові елементи інформаційної мережі;

Λ – матриця розподілу інформаційних потоків між абонентами і вузловими елементами інформаційної мережі (матриця тяжіння);

Θ – простір станів функціонально-структурних зв'язків між протоколами;

Y – множина вихідних параметрів інформаційної мережі. [33-40].

Модель (2.1) дозволяє описати процеси в інформаційній мережі з урахуванням запізнень у часі. Затримки необхідні на збір і обробка даних та узагальнення інформації. Також у виразі (2.1) описуються процеси, що мають як кількісні, так і якісні одиниці виміру.

Інформаційна безпека мережі має ієрархічну структуру та складається з λ рівнів.

Кожен l-й рівень ($l = \overline{1, \lambda}$) інформаційної мережі вирішує свої функціональні завдання. Кожному рівню притаманні окремі для нього параметри природного середовища χ_l, ресурси, R_l і впливи V_l. Ефективність функціонування нижніх рівнів безпосередньо визначає ефективність функціонування більш верхніх рівнів.

Кожен рівень містить сукупність функціонально-взаємодіючих протоколів:

$$\Pi_l = \bigcup_{\beta \in B_l} \pi_{l\beta},$$

де B_l – множина протоколів, які реалізуються на l-му рівні інформаційної мережі, що функціонують в параметричному просторі середовища [33-40]:

$$X_l = R_l \times \chi_l \times V_l,$$

де $\chi_l = \bigcup_{l\in\chi} \chi_{l,\pi} R_l = \bigcup_{l\in R} R_{l,\pi} V_l = \bigcup_{l\in V} V_{l,\pi}$.

Описання всіх складових виразу (2.1). Кожен *l*-ий рівень інформаційної мережі виконує свої функціональні завдання. При цьому безпосередньо сам рівень утворений сукупністю функціонально-взаємодіючих протоколів $\Pi_l = \bigcup \pi_l$, які функціонують в параметричному просторі середовища $X_l = R_l \times \chi_l \times V_l$, де $\chi_l = \bigcup_{l\in\chi} \chi_{l,\pi} R_l = \bigcup_{l\in R} R_{l,\pi} V_l = \bigcup_{l\in V} V_{l,\pi}$. Відповідно кожному рівню притаманні окремі для нього параметри природного середовища χ_l, ресурси, R_l і впливи V_l. При цьому ефективність функціонування нижніх рівнів визначає ефективність функціонування більш верхніх рівнів.

Інформаційна безпека мережі охоплює сім рівнів, що відповідають рівням еталонної моделі *OSI*. Для кожного з них визначено власну сукупність протоколів, які забезпечують цілісність, конфіденційність та доступність даних у межах відповідного рівня. З урахуванням наведеного вище формального опису протоколу, кожен рівень моделі в структурі ієрархічної моделі інформаційної мережі може бути представлений через систему параметрів і відображень, які характеризують його функціональні зв'язки та взаємодію з іншими рівнями.

1) Вхідні параметри *l*-ого рівня: множина узагальнених параметрів середовища $X_l = R_l \times \chi_l \times V_l$, де $\chi_l = \bigcup_{l\in\chi} \chi_{l,\pi} R_l = \bigcup_{l\in R} R_{l,\pi} V_l = \bigcup_{l\in V} V_{l,\pi}$ в якій функціонує множина протоколів $\Pi_l = \bigcup \pi_l$ на *l*-му рівні, де [33-40]:

множина параметрів природного середовища *l*-го рівня $\chi_l \left(\chi_l \subseteq \chi\right)$;

множина ресурсів інформаційної мережі *l*-го рівня $R_l \left(R_l \subseteq R\right)$;

множина деструктивних впливів V_l, що реалізовані системою деструктивних впливів на *l*-му рівні і впливаючих на функціонування протоколів $\Pi_l = \bigcup \pi_l$;

множина керуючих впливів $U_l = \left\langle \left\{ U_{l,\pi} \right\} \times T \right\rangle \left(U_l \subseteq U \right)$ на протоколи Π_l з боку інформаційної мережі на *l*-му рівні; множина моментів часу функціонування інформаційної мережі *T*.

2) Перетворення, які визначають загальну динамічну модель *l*-ого рівня інформаційної мережі:

множина алгоритмів A_l протоколів Π_l на *l*-му рівні інформаційної мережі:

$$A_l = \bigcup_{\Pi_l} A_{l,\pi}; \tag{2.2}$$

множина параметрів Ω_l алгоритмів A_l протоколів на *l*-му рівні інформаційної мережі:

$$\Omega_l = \bigcup_{\Pi_l} \Omega_{l,\pi}; \tag{2.3}$$

вираз ψ_l, що описує зміну станів s_l *l*-ого рівня інформаційної мережі:

$$s_l = \left\{ s_\pi \right\} \bigcup \Theta_l = \psi_l \left(t_0, t, \left\{ \pi \right\}, \left\{ S_\pi \right\}, X_l, U_l, A_l, \Theta_l \right), \tag{2.4}$$

при цьому стан *l*-ого рівня буде визначено як об’єднання множини станів всіх протоколів цього рівня $\left\{ s_\pi \right\}$ і стану функціонально-структурних зв’язків між протоколами Θ_l [33-40].;

перетворення f_l, яке визначає вихідні показники якості обслуговування Q_l, які забезпечують протоколи Π_l на *l*-му рівні функціонування:

$$Q_l = f_l \left(t, s_l, X_l, U_l, A_l \right). \tag{2.5}$$

перетворення γ_l, яке показує вихідні параметри Y_l протоколів Π_l на *l*-му рівні:

$$Y_l = \gamma_l\left(t, s_l, X_l, U_l, A_l\right). \tag{2.6}$$

перетворення φ_l, яке показує параметричну множину середовища X_{l+1} функціонування протоколів більш високого рівня Π_l:

$$X_{l+1} = \varphi_l\left(s_\pi, t, X_l, U_l, A_l\right). \tag{2.7}$$

3) Вихідні параметри: множина вихідних параметрів *l*-ого рівня Y_l;

множина показників якості обслуговування Q_l, які забезпечуються на *l*-му рівні функціонування;

множина параметрів середовища для функціонування протоколів для високого рівня X_{l+1};

канал спостереження $N_l = \bigcup N_{l,\pi} = \left\langle Y_{l,N} \times Q_{l,N} \right\rangle$ з боку інформаційної мережі в інтересах прийняття рішень з управління інформаційною мережею;

канал спостереження $M_l = \bigcup N_{l,\pi} = \left\langle Y_{l,M} \times Q_{l,M} \right\rangle$ з боку системи дестабілізуючих впливів в інтересах прийняття рішень щодо доцільного застосування впливів V_l.

З урахуванням проаналізованного ієрархічна модель інформаційної мережі як сукупності рівнів моделі *OSI* буде визначатися наступними параметрами і перетвореннями [33-40].:

1) Вхідні параметри інформаційної мережі: множина узагальнених параметрів середовища $X = \bigcup X_l$, що включають в себе:

множина параметрів природного середовища $\chi = \bigcup \chi_l$ множина ресурсів інформаційної мережі $R = \bigcup R_l$;

множина впливів $V = \bigcup V_l$ реалізованих системою дестабілізуючих впливів на *l*-их рівнях функціонування;

множина управляючих впливів $U = \bigcup U_l$ з боку інформаційної мережі на *l*-их рівнях функціонування;

множина моментів часу функціонування *T*.

2) Перетворення, що визначають динамічну модель інформаційної мережі: множина алгоритмів *A* інформаційної мережі [33-40]:

$$A = \bigcup A_l \tag{2.8}$$

– множина параметрів Ω алгоритмів *A* інформаційної мережі:

$$\Omega = \bigcup \Omega_l \,. \tag{2.9}$$

– множина протоколів П інформаційної мережі:

$$\Pi = \bigcup \Pi_l \tag{2.10}$$

– множина ψ, що задають зміну станів *S* інформаційної мережі:

$$S = \{S_l\} \bigcup \Theta = \psi\left(t_0, t, \{S_l\}, X, U, A, Z, E, K, \Lambda, \Theta\right), \tag{2.11}$$

де: $Z = \{z_i\}$ – множина елементів інформаційної мережі;

$E = \{e_i\}$ – множина каналоутворюючих засобів в інформаційній мережі;

$K = \{k_{ij}\}$ – множина каналів, що з'єднують вузлові елементи інформаційної мережі;

– множина перетворень *f*, що визначають вихідні показники якості обслуговування *Q* інформаційної мережі:

$$Q = f\left(t, S, X, U, A\right), f = \bigcup f_l, Q = \bigcup Q_l. \tag{2.12}$$

– множина перетворень *γ*, що визначають вихідні параметри *Y* інформаційної мережі:

$$Y = \gamma\left(t, S, X, U, A\right), \gamma = \bigcup \gamma_l, Y = \bigcup Y_l. \tag{2.13}$$

– множина перетворень φ, що визначають між ієрархічні зв'язки між рівнями інформаційної мережі:

$$\varphi = \bigcup \varphi_l. \tag{2.14}$$

Тому множина перетворень φ буде визначати відмінність даної моделі від класичної моделі *OSI,* яка в данномувигляді не відображає міжрівневих взаємозв’язків.

3) Вихідні параметри [33-40].:

множина вихідних параметрів інформаційної мережі *Y*;

кінцеві вихідні параметри інформаційної мережі Y_7;

множина показників якості обслуговування *Q* інформаційної мережі;

канал спостереження $N = \bigcup N_l = \langle Y_N \times Q_N \rangle$ з боку інформаційної мережі в інтересах прийняття рішень з управління інформаційною мережею;

канал спостереження $M = \bigcup M_l = \langle Y_M \times Q_M \rangle$ з боку системи дестабілізуючих впливів в інтересах прийняття рішень щодо застосування багаторівневих впливів *V*.

У загальному вигляді процеси функціонування інформаційної мережі описуються перетвореннями (2.10)–(2.14). Базовою складовою інформаційної мережі є просторово розподілена транспортна підсистема, елементи якої формують основу її структури. Саме стан цих елементів визначає поточний стан S інформаційної мережі в цілому, відображаючи її працездатність, стабільність та рівень взаємодії між вузлами.

$$S = \psi\left(t_0, t, \{S_l\}, X, U, A, Z, E, K, \Lambda, \Theta\right), \tag{2.15}$$

де: $E = \{e_i\}$ – множина каналоутворюючих засобів, встановлених на вузлових елементах інформаційної мережі, де кожен засіб підтримує множину протоколів π_i, де $e_i = \langle\{\pi_i\}\rangle$;

$Z = \{z_i\}$ – множина вузлових елементів мережі, де вузловий елемент містить множину каналоутворюючих засобів e_i, тобто $z_i = \langle\{e_i\}, \{\pi_i\}, \{k_{ij}\}\rangle$;

$K = \{k_{ij}\}$ – множина каналів зв'язку, які з'єднують вузлові елементи інформаційної мережі;

Λ – матриця розподілу інформаційних потоків між абонентами і вузловими елементами інформаційної мережі (матриця тяжіння).

Параметри $Z \times K$ задають граф інформаційної мережі, а окремі дії $V_{l,\pi}$ за рахунок порушення функціонування або блокування протоколів, які використовують канали зв'язку $k_{ij} = \langle z_i, z_j, e_i, e_j, \pi_{l,k}\rangle$, та вузли $z_i = \langle\{e_i\}, \{\pi_i\}, \{k_{ij}\}\rangle$, які призводять до зміни топології [33-40].

Процес функціонування інформаційної мережі визначається як $\gamma : \langle t, S, X, U, A\rangle \to Y$, яке описується виразом (2.13).

У процесі функціонування інформаційної мережі проводиться доставка повідомлень Y_7 з показниками якості Q,які відповідають цільовим

призначенням інформаційної мережі в залежності від її поточного стану *S* та множини вхідних впливів *X* , та модель управління *U*.

Якість виконання функцій за цільовим призначенням інформаційної мережі буде визначатися показниками *Q*, які залежать від множини використовуваних протоколів *П*, які будть функціонувати відповідно до алгоритмів *A* та їх параметрами Ω, і залежити від параметрів середовища $X = R \times \chi \times V$.

Інформаційна безпека мережі функціонує ефективно коли задані показники якості верхнього (прикладного) рівня Q_7, одержувані в результаті згортки $Q_1 \to Q_2 \to ... \to Q_i \to ... \to Q_7$, отримають значення не нижче необхідного, коли виконується умова критерію [33-40]:

$$\forall \left\{ q_7 \geq q_7^{необх} \right\} \in Q_7. \qquad (2.16)$$

У цьому контексті ключову роль відіграють чотири нижні рівні моделі *OSI* – фізичний, канальний, мережевий та транспортний.

Саме вони забезпечують роботу телекомунікаційного обладнання інформаційної мережі й водночас є найбільш вразливими до навмисних дестабілізуючих впливів.

Тому як окремий випадок доцільно розглядати інформаційну мережу у вигляді просторово розподіленої транспортної структури, обмеженої зазначеними чотирма рівнями. У цьому разі критерій (2.15) набуває такого вигляду:

$$\forall \left\{ q_4 \geq q_4^{необ} \right\} \in Q_4. \qquad (2.17)$$

Інформаційний конфлікт доцільно розглядати з урахуванням рівнів, на яких відбувається вплив, оскільки характер і наслідки порушень суттєво різняться залежно від рівня взаємодії:

а) вплив на фізичному рівні – наприклад, створення радіоелектронних перешкод, що призводить до зниження якості сигналу та втрати частини інформації;

б) вплив на мережевому рівні – прикладом є атаки типу *DDoS,* які перевантажують маршрутизатори та спричиняють відмову у доступі;

в) однорівневий вплив на фізичному рівні – наслідки перешкод можуть проявлятися у вигляді втрати достовірності прийому сигналів, що не компенсується засобами фізичного чи канального рівнів, проте може бути частково усунено шляхом перемаршрутизації на мережевому рівні;

г) різнорівневий (комплексний) вплив – поєднання фізичних та інформаційних атак, що призводить до дестабілізації протоколів маршрутизації, порушення узгодженості між рівнями *OSI* і, як наслідок, до неможливості доставки пакетів.

При цьому найбільш імовірним сценарієм буде використання на нижніх рівнях некритичних динамічних дій $\left(Q_1(V_1)\rangle Q_1^{необ}\right)$, результат роботи яких відображається на більш верхні рівні $\left(V_1 \to X_1 \to \Pi_1 \to Y_1 \to X_2 \to \Pi_2 \to ...\right)$ і переводить інформаційну мережу в гранично стійкий стан [33-40]..

Як зазначено у роботі [19], ефективність управління багаторівневою системою, якою виступає інформаційна безпека, визначається узгодженістю між глобальними та локальними цілями її функціонування на різних рівнях. Порушення цієї узгодженості призводить до виникнення міжрівневої неузгодженості, тобто конфлікту між рішеннями, що приймаються локально на окремих рівнях. У загальному випадку для багаторівневих систем характерні два основні типи конфліктів [19]: міжрівневі, що виникають між різними рівнями ієрархії управління, та внутрішньорівневі, які проявляються всередині одного рівня під час взаємодії його елементів.

З проведеного аналізу, інформаційна бездротова мережа є ефективною у разі, якщо її показники якості верхнього (прикладного) рівня Q_7, одержувані в

результаті згортки $Q_1 \to Q_2 \to ... \to Q_i \to ... \to Q_7$, мають значення не нижче необхідного, коли виконується критерій $\forall\left\{q_7 \geq q_7^{необ}\right\} \in Q_7$.

Буде розлянуто поняття ефективних умов функціонування – $X_{еф} = \bigcup X_l \left(X_l = \left\langle R_l \times \chi_l \times V_l \right\rangle\right)$, які при управлінні інформаційною мережею $U = \bigcup U_l$ забезпечують виконання критерію ефективності функціонування $\forall\left\{q_7 \geq q_7^{необ}\right\}$. Існування цих заданих умов визначає ділянки неефективних дій − тобто впливів $V_{нееф} = \bigcup V_l$, які при управлінні $U = \bigcup U_l$ не здатні вивести інформаційну мережу за межі ефективного її функціонування: $Q\left(U, X_{еф}\left(V_{нееф}\right)\right) \geq Q^{необ}$. Іншими словами, ефективні умови функціонування інформаційної мережі відповідають умові неефективних дій.

На даний час у моделі *OSI* використовується класичний принцип незалежності інформаційної мережі на різних рівнях її функціонування. В основу багаторівневого підходу відповідно до моделі *OSI* покладено два основні положення [33-40].:

1) Протоколи вищих рівнів Π_l і система управління ними повинна забезпечити виправлення неефективних вихідних параметрів (вихідних умов) нижчих рівнів $Y_{l-1\ \ нееф} \to Y_{l\ \ еф}$:

$$\varphi_l : Y_{l-1\ \ нееф} \overset{\Pi_l}{\to} \left[\begin{array}{l} X_{l\ \ еф} \\ X_{l\ \ нееф} \end{array}\right., \tag{2.18}$$

$X_{l\ \ еф}$ – відповідає випадку коли протоколи Π_l виправляють неефективні умови функціонування попереднього рівня;

$X_{l\ \ нееф}$ – коли не виправляють. Тоді: $X_{l\ \ нееф} = \bigcup\limits_{\Pi_l} X_{l,\pi\ \ нееф}, X_{l\ \ еф} = \bigcup\limits_{\Pi_l} X_{l,\pi\ \ еф}$

в підсумку $X_l = X_{l\ \ еф} \bigcup X_{l\ \ нееф}$.

2) На своєму рівні функціонування протоколи Π_l будуть функціонально незалежні від нижчих рівнів Π_{l-1} та будуть забезпечувати задану ефективність функціонування [33-40]:

$$f_l : \left\langle t, s_l, X_{l\ \ еф}, U_l, A_l \right\rangle \overset{\Pi_l}{\to} Q_l \left| Q_l \geq Q_l^{необ} \right. . \tag{2.19}$$

Вираз (2.18) дає підстави зробити висновок, який на перший погляд виглядає логічним: якщо вихідні параметри протоколів нижчого рівня функціонують ефективно, то й умови роботи протоколу вищого рівня також будуть ефективними.

$$Y_{l-1\ \ еф} \Rightarrow Y_{l\ \ еф}, \tag{2.20}$$

поширюючи цей висновок на всі рівні інформаційної мережі, можна стверджувати, що ефективність функціонування *l*-го рівня є передумовою ефективної роботи всіх наступних рівнів системи.

$$X_{1\ \ еф} \Rightarrow Y_{1\ \ еф} \Rightarrow ... \Rightarrow Y_{l-1\ \ еф} \Rightarrow X_{l\ \ еф} \Rightarrow ... \Rightarrow Y_{7\ \ еф}. \tag{2.21}$$

Разом із тим, з практики відомо, що існують режими функціонування протоколів, які формально відповідають критеріям ефективності нижчих рівнів, але в цілому призводять до неефективності роботи вищих рівнів. Отже, логічний висновок (2.21) не завжди виконується: коректна робота нижчого рівня не гарантує коректної або ефективної роботи всієї системи вищих рівнів. Для навмисної реалізації таких умов неефективного функціонування інформаційної мережі можна виокремити три базові варіанти впливу.

1) Вплив на нижчому рівні V_i , який є неефективним на *i*-му рівні (тобто не веде до зниження $Q_i < Q_i^{необ}$), але за рахунок впливу $V_{i\ \ неефф} \to X_{i\ \ еф} \to Y_{i\ \ еф} \to ... \to X_{j\ \ неефф} \to Y_{j\ \ неефф}$ на вищий *j*-ий рівень

інформаційної мережі формує його неефективну середу $X_{j\ нееф}$, тому це буде призвоити до критичного падіння якості функціонування цього рівня [33-40];

2) Сукупність впливів $V = \bigcup V_i$ на різних рівнях які окремо неефективні, але за рахунок їх впливу на вищі рівні створює неефективні умови середовища $X_{j\ нееф}$ на вищому *j*-му рівні

$$X_{1\ еф} \to Y_{1\ еф} \to \ldots \to X_{i-1\ еф} \xrightarrow{V_{i-1\ нееф}} Y_{i-1\ еф} \to X_{i\ еф} \xrightarrow{V_{i\ нееф}} Y_{i\ еф} \ldots \to X_{j\ нееф} \to Y_{j\ нееф};$$

3) Поодинокий вплив V_i або їх сукупність $V = \bigcup V_i$ на різних рівнях, яке призводять до виникнення і розвитку внутрішньосистемних конфліктів в інформаційній мережі як усередині окремого рівня, так і між рівнями функціонування [71-85].

2.3. Аналіз адекватності та достовірності моделі функціонування інформаційних мереж.

Запропоновано модель функціонування інформаційних мереж, яка відображає взаємозв'язок між рівнями та дозволяє враховувати вплив дестабілізуючих факторів різної природи.

Основними перевагами цієї моделі є: однозначність оцінки стану мережі в умовах комплексного впливу; широка сфера застосування у системах зв'язку та маршрутизації; можливість адаптації до змін сигнальної обстановки; підвищена точність оцінювання стану; забезпечення структурно-параметричного синтезу інформаційних мереж.

Переваги моделі зумовлені тим, що вона враховує більшу кількість дестабілізуючих факторів, зокрема адитивні та мультиплікативні завади, а також впливи, пов'язані з кібератаками.

Недоліком запропонованого підходу є підвищена обчислювальна складність у порівнянні з простішими моделями, що пояснюється необхідністю розрахунку більшої кількості параметрів стану мережі.

Модель доцільно застосовувати в автоматизованих системах де модель управління та мережевих пристроях. Вона дозволяє ідентифікувати структуру дестабілізуючих впливів, оцінювати стан мережі, використовувати ефективні сигнально-кодові конструкції для підвищення відмовостійкості, раціонально розподіляти радіочастотний ресурс, збільшувати швидкість оцінки параметрів на різних рівнях функціонування, а також розробляти заходи для підвищення завадозахищеності.

Запропоновану математичну модель доцільно реалізовувати в програмному забезпеченні модулів оцінки перспективних засобів радіозв'язку, що ґрунтуються на архітектурі відкритого типу S*CA (Software Communications Architecture)*. Перспективним напрямом подальших досліджень є розробка методики маршрутизації в інформаційних мережах на основі зазначеної моделі.

Висновки до розділу 2.

У результаті проведеного дисертаційного дослідження в другому розділі запропоновано модель функціонування інформаційних мереж, яка забезпечує підвищення достовірності оцінки стану мережі та враховує взаємодію між різними рівнями її структури.

Переваги моделі зумовлені урахуванням більшої кількості дестабілізуючих факторів у порівнянні з відомими підходами. У ній комплексно враховано вплив навмисних завад адитивного та мультиплікативного характеру, а також дестабілізуючих чинників, пов'язаних із кібератаками.

Недоліком запропонованої математичної моделі є підвищена обчислювальна складність, що обумовлено необхідністю де обробка даних великої кількості параметрів стану інформаційної мережі.

Модель інформаційного конфлікту може бути використана для створення нових стратегій управління інформаційними мережами з урахуванням комплексного впливу деструктивних факторів, інформаційно-технічного впливу. Крім того, вона може слугувати основою для обґрунтування нових підходів до виявлення і математичне моделювання прихованого функціонального придушення мереж за рахунок формування та розвитку внутрішніх суперечностей між окремими протоколами.

У межах розділу обґрунтовано вибір параметрів, які використовуються для оцінювання стану мережі, та показано доцільність їх комплексного врахування при аналізі процесів маршрутизації та самоорганізації. Запропонований підхід дозволяє перейти від окремих характеристик роботи мережі до узагальненої оцінки її стану, що є необхідним для прийняття керуючих рішень у децентралізованих системах.

Перспективним напрямом подальших досліджень є розробка методики вибору оптимальної топології інформаційних мереж з урахуванням дестабілізуючих впливів та умов їх функціонування.

Отримані результати підтверджують можливість застосування моделі для оцінювання рівня інформаційної безпеки мереж.

РОЗДІЛ 3.
МЕТОД САМООРГАНІЗАЦІЇ ІНФОРМАЦІЙНИХ МЕРЕЖ

3.1. Метод маршрутизації в інформаційних мережах.

Упродовж останніх років значна кількість дослідників запропонувала різні методи оптимального вибору маршруту [60–150], розглядаючи ключові параметри, що впливають на ефективність протоколів динамічної маршрутизації в інформаційних мережах, здатних до самоорганізації. Багато сучасних протоколів динамічної маршрутизації мають у своїй структурі системи пошуку маршрутів із вбудованими алгоритмами мінімізації вартості доставки пакетів від вузла джерела до вузла призначення.

Задача пошуку найкоротшого шляху між двома вузлами є *NP*-складною, і тому потребує застосування евристичних або метаевристичних підходів. Крім того, сучасні користувачі вимагають не лише мінімізації кількості переходів (хопів) до адресата, але й забезпечення додаткових параметрів якості обслуговування (*QoS).* До таких параметрів належать енергоспоживання вузлів [68-71], що є особливо важливим у мережах, де більшість пристроїв працюють від акумуляторів; пропускна здатність каналу зв’язку; динамічність зміни топології мережі; затримка під час передачі даних; кількість альтернативних маршрутів та надійність доставки пакетів. Однак більшість наявних моделей пошуку та підтримання маршрутів не враховують усі ці чинники одночасно [72].

Запропонований метод маршрутизації ґрунтується на інтеграції декількох підсистем, що взаємодіють між собою для забезпечення адаптивності та відмовостійкості процесу передавання даних. Загальна структура методу включає чотири основні складові [73] : систему підтримання маршрутів, систему пошуку маршрутів, систему прийняття рішень щодо напряму передачі *IP*-пакетів та систему пам’яті, яка забезпечує взаємодію між зазначеними підсистемами (рис. 3.1).

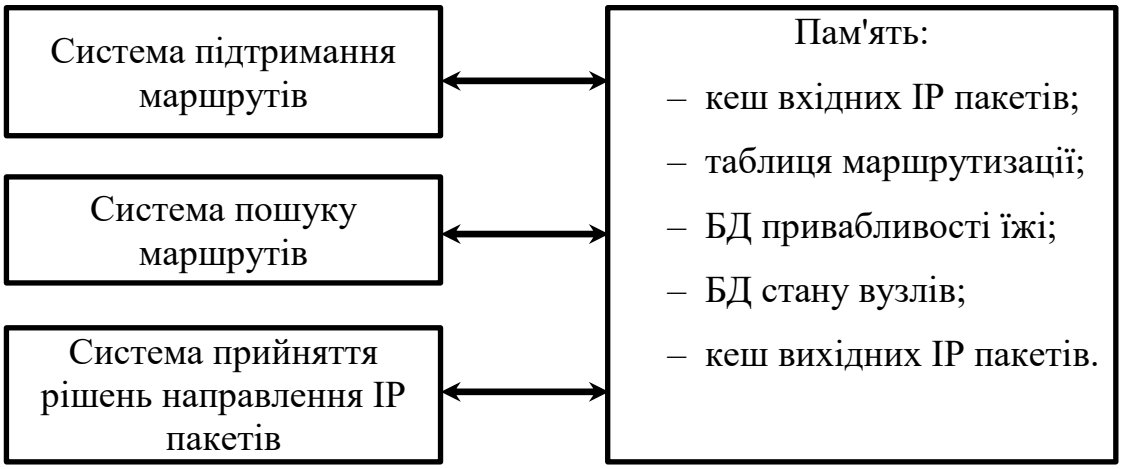


Рис. 3.1 Загальна структурна схема методу маршрутизації

Запропонована методика маршрутизації ґрунтується на поєднанні алгоритму в якому нечітка логіка [16-18] та алгоритму «зграї котів» *(Cat Swarm Optimization, CSO)* [108], що забезпечує пошук оптимального багатопараметричного маршруту між парою вузлів *NS/ND.* Оптимальним вважається маршрут, який задовольняє сукупність основних критеріїв, необхідних для підвищення ефективності передавання даних. До таких критеріїв належать: якість обслуговування *(QoS),* швидкість каналу зв'язку, надійність доставки пакетів, енергетична складова, час *затримки (End-to-End Delay)* та кількість доступних маршрутів.

Процес визначення маршруту та відправлення *IP*-пакету до вузла призначення в інформаційних мережах, що самоорганізовуються, складається з таких етапів (рис. 3.2):

Крок 1 – збір даних про стан вузлів мережі та занесення їх до кешу поточного стану.

Крок 2 – отримання запиту на відправку пакета до вузла призначення.

Крок 3 – перевірка наявності маршруту в таблиці маршрутизації; якщо маршруту немає, система ініціює процедуру пошуку (крок 4); якщо маршрут наявний, система прийняття рішення обирає його для передавання даних.

Крок 4 – виконання запиту на пошук маршруту.

Крок 5 – після отримання відповіді запис знайденого маршруту до кешу.

Крок 6 – фазифікація та дефазифікація показників маршруту де нечітка логіка для подальшої оцінки його придатності.

Крок 7 – пошук оптимального маршруту з використанням алгоритму «зграї котів».

Крок 8 – формування бази даних знайдених маршрутів.

Крок 9 – прийняття рішення щодо відправлення *IP*-пакету відповідним маршрутом із урахуванням параметрів *QoS* та поточного стану мережі.

Крок 10 – відправлення *IP*-пакету до вузла призначення.

Запропонований підхід дозволяє підвищити адаптивність і точність процесу маршрутизації, зменшити час затримки передавання даних [78-86].



Рис. 3.2 Алгоритм методу маршрутизації в інформаційних мережах, що самоорганізовуються

Своєю чергою, розроблена система *ACSFL (Adaptive Cat Swarm Fuzzy Logic)* інтегрована в модифікований алгоритм протоколу динамічної маршрутизації *DSR,* що дозволяє підвищити його ефективність за рахунок зниження кількості службових пакетів під час пошуку маршруту та оптимізації вибору траєкторій передавання даних.

Для прогнозування трафіку найближчих інтервалів часу в алгоритмі застосовуються штучні нейронні мережі [76], які аналізують динаміку зміни навантаження в мережі та забезпечують адаптацію маршрутизації до поточного стану каналів зв’язку.

Запропонований метод також враховує наявність множини альтернативних маршрутів, здійснюючи їх ранжування за критеріями надійності, пропускної здатності, затримки та енергетичної ефективності. Це дає змогу забезпечити балансування навантаження між вузлами мережі та підвищити загальну стабільність процесу передавання даних.

Враховуючи результати проведеного аналізу існуючих протоколів динамічної маршрутизації та необхідність зменшення службового трафіку в спеціалізованих мережах з можливістю самоорганізації, обґрунтовано доцільність використання саме протоколу *DSR (Dynamic Source Routing)* як базового [78-86].

Протокол *DSR* [69] реалізує два основні механізми:

– механізм вивчення маршруту *(Route Discovery)* – використовується тоді, коли вузол-відправник не має інформації про шлях до адресата і ініціює процедуру пошуку маршруту;

– механізм підтримання маршруту *(Route Maintenance)* – активується у випадках, коли вже відомий маршрут стає недоступним через зміну топології мережі або відмову вузла.

Якщо вузол-відправник не може доставити пакет через зламаний маршрут, він передає його іншому вузлу, який має відомий шлях, або повторно запускає процес пошуку нового маршруту за допомогою механізму *Discovery.*

На відміну від більшості інших протоколів динамічної маршрутизації, *DSR* не надсилає періодичних службових повідомлень, що суттєво зменшує обсяг службового трафіку, знижує енергоспоживання вузлів і підвищує ефективність функціонування мережі з можливістю самоорганізації.

Пошук маршруту в модифікованому протоколі *DSR (MDSR)* здійснюється лише за необхідності, тобто після виявлення невдалої спроби передачі даних. Однією з ключових переваг цього підходу є можливість швидкого відновлення роботи мережі після тимчасового виходу вузла з неї: при повторному підключенні вузол одразу відновлює передачу даних без необхідності повторного пошуку маршрутів.

Протокол *DSR* здатний перехоплювати службову інформацію з переданих пакетів, що дозволяє вузлам навчатися і формувати кеш із кількома маршрутами до кожного вузла призначення. Це дає змогу уникати зайвих накладних витрат у випадках, коли передача пакета першим маршрутом виявляється невдалою. Завдяки цьому забезпечується гнучкість, зменшується час реакції системи на зміни топології, а також підвищується ефективність маршрутизації [78-86].

Модифікований *DSR (MDSR)* реалізує механізми балансування навантаження між доступними маршрутами (рис. 3.3), що підвищує пропускну здатність мережі та знижує ризик перевантаження окремих вузлів. Якщо стандартна версія *DSR* орієнтована на односпрямовані зв’язки та асиметричні маршрути (що враховує можливість різної якості зв’язку в різних напрямках або впливу радіозавад), то модифікований алгоритм побудовано з урахуванням сучасних двонаправлених каналів зв’язку. Це дозволяє використовувати маршрути не лише для прямої, але й для зворотної передачі даних, зберігаючи при цьому можливість підтримки асиметричних маршрутів, коли це необхідно.

Протокол *DSR* має здатність взаємодіяти з іншими мережами, зокрема *IP* або бездротова мережа *Ad Hoc* мережама. На відміну від базового *DSR*, модифікований *MDSR* підтримує механізм пріоритетності трафіку *(QoS)*, що

дозволяє ефективніше керувати потоками даних у мережах спеціального призначення.

Крім того, у *MDSR* реалізовано підтримку протоколу *IPv6*, який замінює застарілий *IPv4*. Це розширює адресний простір і спрощує процедуру конфігурації: відпадає потреба у використанні протоколу *DHCP* або ручного призначення *IP*-адрес. Застосування *IPv6* дозволяє швидко розгортати мережі спеціального призначення, підвищуючи їхню гнучкість та масштабованість.

Додатково *MDSR* здійснює аналіз усіх вхідних пакетів, зчитуючи *IP*-адресу відправника та його *MAC*-адресу, що дозволяє автоматично оновлювати таблицю *ARP*. Це знижує накладні витрати на обслуговування протоколу ARP та підвищує швидкість обробки даних [78-86].

Алгоритм роботи модифікованої процедури пошуку маршруту представлений на рис. 3.6 і демонструє послідовність етапів від виявлення необхідності маршруту до його вибору та використання в системі.

Алгоритм роботи модифікованого протоколу *MDSR* для пошуку маршруту функціонує за чітко визначеною послідовністю етапів, спрямованих на підвищення ефективності та зменшення службового трафіку в мережі, що самоорганізовується:

1. Отримання пакета запиту (блок 1).
2. Після надходження запиту на пошук маршруту перевіряється його унікальний ідентифікатор *(ID)*. Якщо цей *ID* уже оброблявся раніше (блок 2), пакет ігнорується, щоб уникнути дублювання трафіку. Якщо запит новий, здійснюється пошук у таблиці маршрутизації для визначення наявного маршруту до вузла призначення (блок 3).
3. Визначення ролі вузла (блок 4).
4. Якщо поточний вузол є вузлом призначення, формується пакет відповіді, який містить повний маршрут, пройдений пакетом до цього вузла (блок 12), і відправляється до вузла-ініціатора.

5. Якщо ж вузол не є кінцевим, він додає до пакета свою адресу як частину *“Source route”* (блок 5) і пересилає цей запит усім сусіднім вузлам, використовуючи той самий ідентифікатор пошуку.

6. Формування відповіді на запит (блок 7).

7. Після створення пакета відповіді вузол виконує пошук маршруту до вузла-ініціатора в таблиці маршрутизації (блок 8).

8. Відправлення відповіді (блок 14–15).

9. Якщо знайдено прямий маршрут до вузла-ініціатора, пакет відповіді надсилається безпосередньо цим маршрутом (блок 15).

10. Якщо ж прямого маршруту немає (блок 14), відповідь передається зворотним шляхом — маршрутом, яким пакет запиту досяг вузла призначення (блок 16). Цей маршрут записується до кешу для подальшого використання.

11. Підтвердження та оновлення таблиць (блок 17–18).

12. У разі отримання підтвердження доставки відповіді маршрут заноситься до таблиці маршрутизації (блок 18). Якщо підтвердження не надійшло, ініціюється повторний пошук маршруту до адресата.

13. Обробка даних неотриманих відповідей (блок 9–13).

14. Якщо маршрут не знайдено або відповідь не отримано, формується новий запит на пошук маршруту (блок 9), який розсилається сусіднім вузлам із зазначенням ідентифікатора. Кожен такий запит зберігається в кеші (блок 11) із таймером для повторного надсилання у разі відсутності відповіді. Також ведеться лічильник кількості спроб відправлення (блок 12). Після вичерпання спроб запит видаляється з кешу, а вузол-ініціатор отримує повідомлення про неможливість встановлення маршруту (блок 13).

Таким чином, модифікований алгоритм пошуку маршруту в *MDSR* забезпечує:

– мінімізацію повторних запитів за рахунок кешування маршрутів і контролю унікальності запитів;

– адаптивне балансування навантаження між вузлами;

– зниження службового трафіку завдяки ефективній організації процесів підтвердження, кешування та повторної передачі запитів;

– підвищення надійності маршрутизації в умовах змінної топології мережі. Саме тому в модифікованому алгоритмі маршрутизації *MDSR* збережено підтримку побудови асинхронних маршрутів до вузлів-призначень.

Такий підхід забезпечує значне скорочення службового трафіку в мережі, оскільки відпадає потреба повторно формувати запит на пошук маршруту.

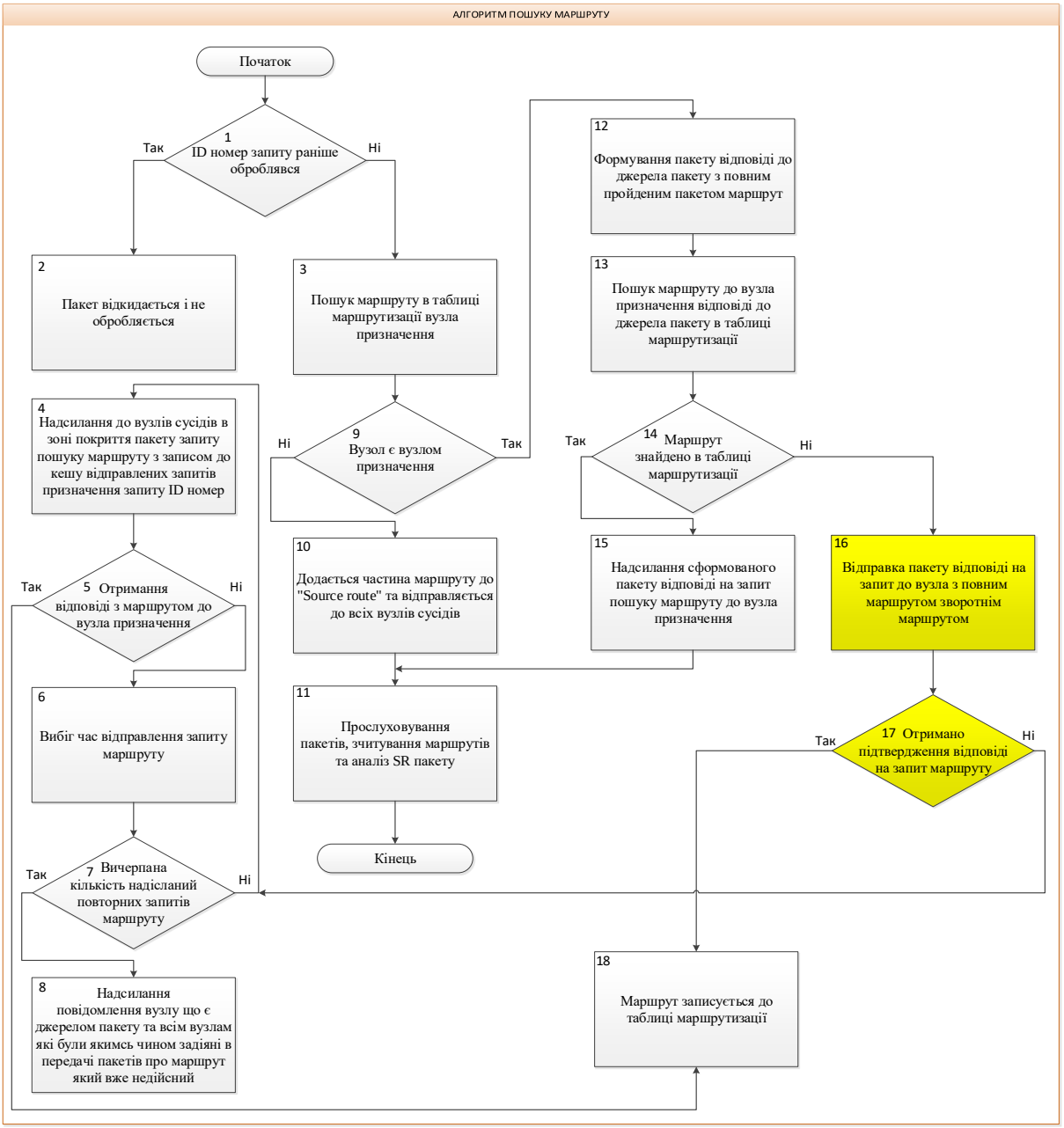


Рис. 3.3. Етапи пошуку маршруту динамічного протоколу маршрутизації *DSR*

Нечітка нейронна мережа *(NFS – neuro-fuzzy system*), розроблена для визначення оптимальних маршрутів у мережах спеціального призначення, поєднує принцип де нечітка логіка та штучних нейронних мереж. Така система дозволяє здійснювати прийняття рішень у складних умовах, коли вхідні параметри є частково невизначеними або змінюються динамічно. Архітектура запропонованої *NFS* складається з п’яти основних шарів: функції лінійної передачі, фазифікації, операції «та», нечіткого умовиводу та дефазифікації [78-86].

Шар 1 На цьому етапі здійснюється отримання основних показників вузлів мережі спеціального призначення з прийнятих *IP*-пакетів. До таких параметрів належать:

– швидкість передачі інформації між вузлами;

– час передачі пакета до вузла призначення (*End-to-End Delay*);

– рівень заряду батареї вузла;

– показник надійності доставки I*P*-пакета.

Показник швидкості передачі інформації P_{speed} швидкість передачі інформації радіозв’язності між вузлами з усього маршруту, тобто:

$$P_{speed} = \min V_{ij\ speed}, \tag{3.1}$$

де V_{ij} − вузол, для передачі пакету на маршруті ij .

За показник заряду батареї, також визначається мінімальний заряд батареї на вузлі, який задіяний у маршруті:

$$P_{power} = \min V_{ij\ pover}. \tag{3.2}$$

Для подальшої обробки даних всі ці параметри нормуються до єдиного діапазону значень. Показник швидкості передачі інформації визначається як

мінімальне значення швидкості радіозв'язку між усіма вузлами маршруту, що дозволяє врахувати «вузьке місце» каналу.

$$P_{delay} = \sum_{i=1}^{N} V_{i_{delay}} . \quad (3.3)$$

Показник надійності передачі *IP* пакету є ймовірнісним показником передачі пакету вздовж всього маршруту:

$$P_{reliability} = \prod_{i=1}^{N} V_{i_{reliability}} . \quad (3.4)$$

Шар 2. Процес фазифікації передбачає перетворення отриманих чітких числових значень параметрів де нечітка логіка, що дозволяє системі гнучко реагувати на зміни умов у мережі. На цьому етапі для кожного з параметрів – таких як швидкість передачі, час затримки, рівень заряду батареї чи надійність доставки — визначаються функції належності, які відображають ступінь належності конкретного значення до певної лінгвістичної категорії (наприклад: низький, середній, високий) [78-86].

Для забезпечення адаптивності протоколу маршрутизації до динамічних змін у топології мережі та стані вузлів у процесі фазифікації використовуються мінімальні та максимальні значення параметрів, отримані з бази даних стану вузлів. Це дозволяє автоматично оновлювати межі функцій належності залежно від поточного стану мережі.

Таким чином, якщо, наприклад, у певний момент середня швидкість передачі даних у мережі знижується через перешкоди або збільшення навантаження, система самостійно адаптує межі функцій належності, зберігаючи коректність оцінки параметра "швидкість передачі". Результатом фазифікації є набір нечітких значень вхідних змінних, який передається на наступний етап де обробкиа даних — шар операцій типу "та", де здійснюється формування правил нечіткого висновку для оцінювання якості маршруту.

$$\xi_{ij_{speed}} = S(i,j,t),\ \text{де}\ 0 \le q \le 1,\ 0 = \min P_{speed},\ 1 = \max P_{speed}, \tag{3.5}$$

$$\xi_{ij_{power}} = P(i,j),\ \text{де}\ 0 \le q \le 1,\ 0 = \min P_{power},\ 1 = \max P_{power}, \tag{3.6}$$

$$\xi_{ij_{delay}} = S(i,j,t),\ \text{де}\ 0 \le q \le 1,\ 0 = \min P_{delay},\ 1 = \max P_{delay}, \tag{3.7}$$

$$\xi_{ij_{reliability}} = S(i,j,t),\ \text{де}\ 0 \le q \le 1,\ 0 = \min P_{reliability},\ 1 = \max P_{reliability}. \tag{3.8}$$

Побудова функцій приналежності для всіх чотирьох параметрів відповідно до рівнянь:

$$\mu_{Low}(x) = \max\left(0, \min\left(1, \frac{\Delta - x}{\Delta}\right)\right), \tag{3.9}$$

функція належності визначає слабке *(Weak)* та середнє *(Medium)* значення параметру:

$$\mu(k,x) = \max\left[0, \min\left[\frac{x - \Delta\cdot(k-1)}{\Delta}, \frac{\Delta\cdot(k+1) - x}{\Delta}\right]\right], \tag{3.10}$$

функція належності, що визначає високе *(High)* значення параметру

$$\mu_{High}(x) = \min\left(1, \max\left(0, \frac{x - (N-1)\Delta}{\Delta}\right)\right). \tag{3.11}$$

де $N = 3,\ \Delta = \frac{1}{N},\ \mu(1,x) \equiv \mu_{Weak}(x),\ \mu(2,x) \equiv \mu_{Medium}(x).$

Побудова функцій належності для узагальненої метрики маршруту (рівня придатності джерела живлення АК, що передається зворотним зв'язком після кожного проходу) виконується за [22]:

$$\mu_{FA1}(x) = \max\left(0, \min\left(1, \frac{\Delta - x}{\Delta}\right)\right), \tag{3.12}$$

$$\mu(k, x) = \max\left[0, \min\left[\frac{x - \Delta \cdot (k-1)}{\Delta}, \frac{\Delta \cdot (k+1) - x}{\Delta}\right]\right], \tag{3.13}$$

$$\mu_{FA13}(x) = \min\left(1, \max\left(0, \frac{x - (N-1)\Delta}{\Delta}\right)\right), \tag{3.14}$$

де $N = 12$; $\Delta = \frac{1}{N}$; $\mu(1, x) \equiv \mu_{FA2}(x)$, $\mu(2, x) \equiv \mu_{FA3}(x)$, $\mu(3, x) \equiv \mu_{FA4}(x)$, $\mu(4, x) \equiv \mu_{FA5}(x)$, $\mu(5, x) \equiv \mu_{FA6}(x)$, $\mu(6, x) \equiv \mu_{FA7}(x)$, $\mu(7, x) \equiv \mu_{FA8}(x)$, $\mu(8, x) \equiv \mu_{FA9}(x)$, $\mu(9, x) \equiv \mu_{FA10}(x)$, $\mu(10, x) \equiv \mu_{FA11}(x)$, $\mu(11, x) \equiv \mu_{FA12}(x)$, $\mu(12, x) \equiv \mu_{FA13}(x)$ – функції рівня придатності джерел для АК.

Шар 3. На цьому етапі нечітка логіка система формує набір правил, що описують взаємозв'язки між параметрами маршруту. Кожне правило реалізує логічні операції типу "та" або "або", об'єднуючи значення параметрів у комбінації, які визначають рівень придатності маршруту. Кількість вузлів у даному шарі відповідає кількості таких логічних операцій. Для повного перебору всіх можливих комбінацій чотирьох параметрів, кожен з яких має по чотири терми, необхідно 256 нейронів. Кожен нейрон відповідає окремому варіанту поєднання термів параметрів, що забезпечує врахування всіх можливих сценаріїв стану мережі при визначенні оптимального маршруту [78-86].

якщо P_{speed} є $\mathrm{A_x}$ *та* P_{power} є $\mathrm{B_x}$ *та* P_{delay} $\mathrm{C_x}$ *та* $P_{reliability}$ $\mathrm{D_x}$ *то*, (3.15)

де A_x, B_x, C_x, D_x – функції належності визначені відповідно на $P_{speed}, P_{power}, P_{delay}, P_{reliability}$.

Тоді на вході нейрон третього шару матє вигляд:

$$If\ I_1 \text{ is } Low \text{ and } I_2 \text{ is } Low \text{ and } I_3 \text{ is } High \text{ and } I_4 \text{ is } Low \text{ then }. \quad (3.16)$$

На виході нейрона третього шару відбувається агрегування передумов де нечітка логіка правил визначається за виразом, що є логічною кон'юнкцією, якщо $\mu_g = \mu(P_{speed} \cap P_{power} \cap P_{delay} \cap P_{reliability})$ то:

$$\mu_g = \min\left\{\mu(P_{speed}), \mu(P_{power}), \mu(P_{delay}), \mu(P_{reliability})\right\}. \quad (3.17)$$

Шар 4. На цьому рівні відбувається активізація результатів де нечітка логіка правил, тобто формування конкретних висновків на основі комбінацій вхідних параметрів, отриманих із попереднього шару. Кожен нейрон четвертого шару виконує обчислення значення вихідної змінної для певної комбінації термів, визначених у шарі 3.

$$If\ I_1 \text{ is } Low \text{ and } I_2 \text{ is } Low \text{ and } I_3 \text{ is } High \text{ and } I_4 \text{ is } Low \text{ then } O \text{ is } Ph1$$

Правила реалізовані в програмній системі де імітаційне комп'ютерне моделювання в *Fuzzy Logic Designer* відповідно до Додатка І.

Шар 5. На цьому етапі відбувається перетворення нечіткого результату, отриманого після обробки даних всіх правил, у чітке числове значення, яке може бути використане як керуючий сигнал для вибору маршруту [78-86]. Оскільки вихідна змінна має нечіткий характер, виконується процес дефазифікації. Для цього у запропонованому методі застосовується метод центру тяжіння, який забезпечує найкраще відображення узагальненого результату системи:

$$y = \frac{\int_{\min}^{\max} x_i \cdot \mu(x) \cdot dx}{\int_{\min}^{\max} \mu(x) \cdot dx}, \tag{3.18}$$

де y – результат дефазифікації, x – вихідна лінгвістична змінна ω, $\mu(x)$ – функція належності де нечітка логіка множини.

Шар 6. Є функція активації нейронів часто є неперервною і нелінійною функцією, яка називається сигмоподібною функцією і визначається як:

$$f(x) = \frac{1}{1 + \exp(ax^2)}, \tag{3.19}$$

де a – константа та $a \geq 0$.

Сьомий крок полягає у визначенні передачі *IP* пакету до вузла призначення. На відміну від стандартного протоколу динамічної маршрутизації *DSR,* який використовує алгоритм пошуку найкоротшого шляху Дейкстри, у цьому методі застосовується модифікований алгоритм «зграї котів» із наявністю зворотного зв'язку. Такий підхід передбачає використання показника привабливості маршруту, який після кожного проходу (ітерації) передається назад до вузла-відправника, дозволяючи системі зберігати результати попередніх пошуків і враховувати їх при подальшому виборі шляху. Процедура, що базується на поєднанні нечіткої логіки та алгоритму зграї котів, реалізується у декілька послідовних етапів.

Крок 1. Введення вихідних даних. На даному етапі визначається: швидкість передачі інформації, заряд батареї, час передачі пакету, надійність передачі пакет, частота зміни топології інформаційної мережі.

Крок 2. Створення зграї АК. Відбувається ініціалізація популяції АК X_i (i = 1,2,....., n). Сукупність агентів-котів формує популяцію, яку можна подати у вигляді матриці X, де кожен i-й елемент відповідає положенню

окремого агента. Розташування АК здійснюється на площині пошуку з урахуванням невизначеності стану інформаційної мережі, а також виконується початкова ініціалізація базової моделі її параметрів згідно з моделлю, представленою у другому розділі дисертації. Запропонований метод належить до біоінспірованих алгоритмів і ґрунтується на поведінці зграї котів *(Cat Swarm, CS),* де кожен агент може перебувати в одному з двох станів: режимі пошуку *(Seeking Mode, SM)* або режимі переслідування *(Tracing Mode, TM).* Початкові координати агентів у просторі задач задаються на етапі ініціалізації алгоритму.

$$x_{i,d} = lb_d + r \cdot \left(ub_d - lb_d \right), \tag{3.20}$$

X – популяційна матриця АК, X_i – *i*-й член зграї АК, $x_{i,d}$ – *d*-й вимір у просторі пошуку рішення, щодо стану інформаційної мережі, *N* – кількість АК, *m* – кількість змінних рішення, *r* − випадкове число в інтервалі [0, 1], lb_d та ub_d − нижня та верхня межа *d*-их змінних рішення.

Крок 3. Нумерація АК в зграї, *i*, *i*є [1,2,…,*N*]. На цьому етапі кожному агенту-коту (АК) надається унікальний порядковий номер, що дозволяє ідентифікувати його в межах популяції. Це забезпечує можливість відстеження індивідуальних параметрів пошуку та визначення оптимального рішення для кожного окремого елемента зграї.

Крок 4. Перевірка придатності кожного АК.

Відповідність кожного пошукового АК оцінюється на кожній ітерації за допомогою вдосконаленого генетичного алгоритму, описаного в роботах [64, 74–78], шляхом порівняння отриманих результатів із еталонними функціями. Показник придатності кожного АК у складі зграї (окремий рядок матриці *X*) визначається та зіставляється з показниками інших агентів. Режим пошуку характеризується повільними, малорухливими переміщеннями поблизу поточної позиції, що забезпечує локальне сканування простору можливих рішень.

Крок 5. Побудова ймовірних маршрутів. На цьому етапі для кожного АК обчислюється ймовірність усіх можливих прямих маршрутів на основі їх функції витрат.

Крок 6. Попереднє оцінювання ймовірних маршрутів АК. На цьому етапі область пошуку визначається ореолом активності кожного агента. Оскільки джерелом для АК виступають ресурси, аналогічні тваринній здобичі, виконується сортування можливих варіантів за рівнем придатності, що дозволяє виділити найбільш перспективні напрямки для подальшого пошуку. Мінімальна придатність FS_{ht}, яка знаходиться поряд та вимагає найменшої витрати енергії для її пошуку та здобування. Нормальна придатність позначимо як FS_{at}. Проте, в контексті дисертаційного дослідження це є загальна оцінка маршруту в штучній нейронній мережі (шар 4).

Інші не пріоритетні джерела позначимо як $FS_{nt.}$:

$$FS_{ht}=FS(\text{sorte_index}(1)), \tag{3.21}$$

$$FS_{at}(1:3)=\text{FS}(\text{sorte_index}(2:4)), \tag{3.22}$$

$$FS_{nt}(1:NP\text{-}4)=\text{FS}(\text{sorte_index}(5: NP)). \tag{3.23}$$

Крок 7. Оновлення позиції АК для проведення локальної оптимізації.
На цьому етапі АК оновлюють свої позиції, імітуючи поведінку тих, що навчають, і тих, що навчаються. Для цього спочатку обчислюється нова позиція кожного АК, який перебуває в режимі навчання, на основі повторення дій відповідно до рівняння (3.24). Такий підхід забезпечує суттєві зміщення у розташуванні агентів, що сприяє кращому охопленню простору рішень і підвищує ефективність глобального пошуку. Згідно з рівнянням (3.25), оновлена позиція АК вважається прийнятною, якщо вона покращує значення цільової функції. Тобто, зміщення агентів у просторі рішень

спрямоване на наближення до оптимальних варіантів і запобігання потраплянню алгоритму в неефективні області пошуку.

$$\vec{X}_i^{P2}(t+1) = \vec{X}_i(t+1) + \overrightarrow{rand} * \left(\vec{K}(t) - \overrightarrow{rand}_2 * \vec{X}_i(t+1)\right), i = 1,..., N,\ j = 1,..., m, \quad (3.24)$$

$$\vec{X}_i(t+1) = \begin{cases} \vec{X}_i^{P2}(t+1), F\left(\vec{X}_i^{P2}(t+1)\right) \langle F\left(\vec{X}_i(t+1)\right) \\ \vec{X}_i(t+1), else, \end{cases}, i = 1,..., N, \quad (3.25)$$

де $\vec{X}_i^{P2}(t+1)$ – нова розрахована позиція *i*-го АК на основі другої фази навчання, $x_{i,j}^{P2}(t+1)$ – це його *j*-ий вимір, $\overrightarrow{rand}$ є випадковим вектором виміру, отриманим із рівномірного розподілу. Режим пошуку визначається трьома ключовими параметрами. Перший – обсяг пам'яті пошуку *(seeking memory pool, SMP),* який задає кількість копій кожного АК, що створюються для оцінки можливих варіантів переміщення. Другий – крок зміни по кожній координаті простору *(seeking range of the selected dimension, SRD),* який регулює амплітуду зміщення при пошуку нової позиції. Третій – кількість координат, що підлягають зміні *(counts of dimension to change, CDC),* яка визначає ступінь варіативності позицій у процесі пошуку оптимального рішення [100-110].

Крок 9. *Глобальне оновлення маршрутів.*

При стрімкій зміні топології інформаційної мережі відбувається глобальне оновлення таблиці маршрутизації, що є рівнозначній процедурі де є глобальна оптимізація. Для алгоритму зграї котів – це процедура погоні.Режим погоні визначається швидкими стрибками з великою амплітудою і дозволяє вивести кішку cat_p з локального екстремуму, якщо вона туди потрапила. Поєднання локального сканування та різких змін поточного стану дозволяє з більшою ймовірністю відшукати глобальний екстремум у порівнянні з традиційними методами багатоекстремального процесу де оптимізація. На даному етапі позиція АК оновлюються на основі моделювання зусиль АК, що навчаються під час виховання самосвідомості. Цей процес призводить до

великих змін у положенні АК, що відіграє впливову роль у збільшенні здатності АК, що навчаються для глобального пошуку та використання у пошуку можливих кращих рішень навколо виявлених рішень за допомогою рівняння (3.26). Відповідно до рівняння (3.27), запропонована обчислена позиція для кожного члена сукупності є прийнятною, якщо вона покращує значення цільової функції.

$$\vec{X}_i^{P3}(t+1) = \vec{X}_i(t+1) + \overrightarrow{rand} * \left(\vec{X}_i(t+1) - \vec{X}_i(t)\right), i = 1,..., N, \tag{3.26}$$

$$\vec{X}_i(t+1) = \begin{cases} \vec{X}_i^{P3}(t+1), F\left(\vec{X}_i^{P3}(t+1)\right) \langle F\left(\vec{X}_i(t+1)\right); \\ \vec{X}_i(t+1), else, \end{cases} \tag{3.27}$$

де $\vec{X}_i^{P3}(t+1)$ – нова розрахована позиція *i*-го АК у під час фази погоні, $x_{i,j}^{P3}(t+1)$ – це його *j*-ий вимір, $\overrightarrow{rand}$ є випадковим вектором розмірності *m*, взятим із рівномірного розподілу в інтервалі [0,1], що є вектором погоні.

Режим погоні відповідає процесу глобального пошуку, що дозволяє “проскакувати” локальні екстремуми оптимізованої функції.

Дія 10. Перевірка критерію зупинки. Алгоритм завершується, якщо виконано максимальну кількість ітерацій. В іншому випадку генераціz нових повторюється [100-110].

Дія 11. Навчання баз знань АК.

У цьому дослідженні для навчання баз знань кожного АК застосовано метод навчання на основі еволюційних штучних нейронних мереж, розроблений у роботі [33-35]. Такий підхід дає змогу адаптувати поведінку кожного АК, коригуючи траєкторії його руху для отримання точніших результатів подальшого аналізу. База даних маршрутів у запропонованій системі складається з кількох основних компонентів: кешу часових маршрутів, бази знань маршрутів і таблиці маршрутизації (рис. 3.4). Кеш часових маршрутів містить актуальну інформацію про зв’язки між вузлами, необхідну

для ефективної маршрутизації. Вузол додає передані дані до кешу під час виявлення нових з'єднань де бездротова мережа *Ad Hoc*ю Якщо ж зв'язок між вузлами порушується, відповідний запис видаляється. Після кожного оновлення кешу вузол перевіряє наявність маршруту до цільової адреси. Якщо такий маршрут знайдено, передача пакета здійснюється одразу за ним, після чого запис видаляється з кешу. Такий механізм підвищує ефективність роботи мережі та забезпечує її взаємодію з іншими зовнішніми мережами, зокрема мережею Інтернет або іншими інформаційними системами з відмінними від *MDSR* протоколами маршрутизації.

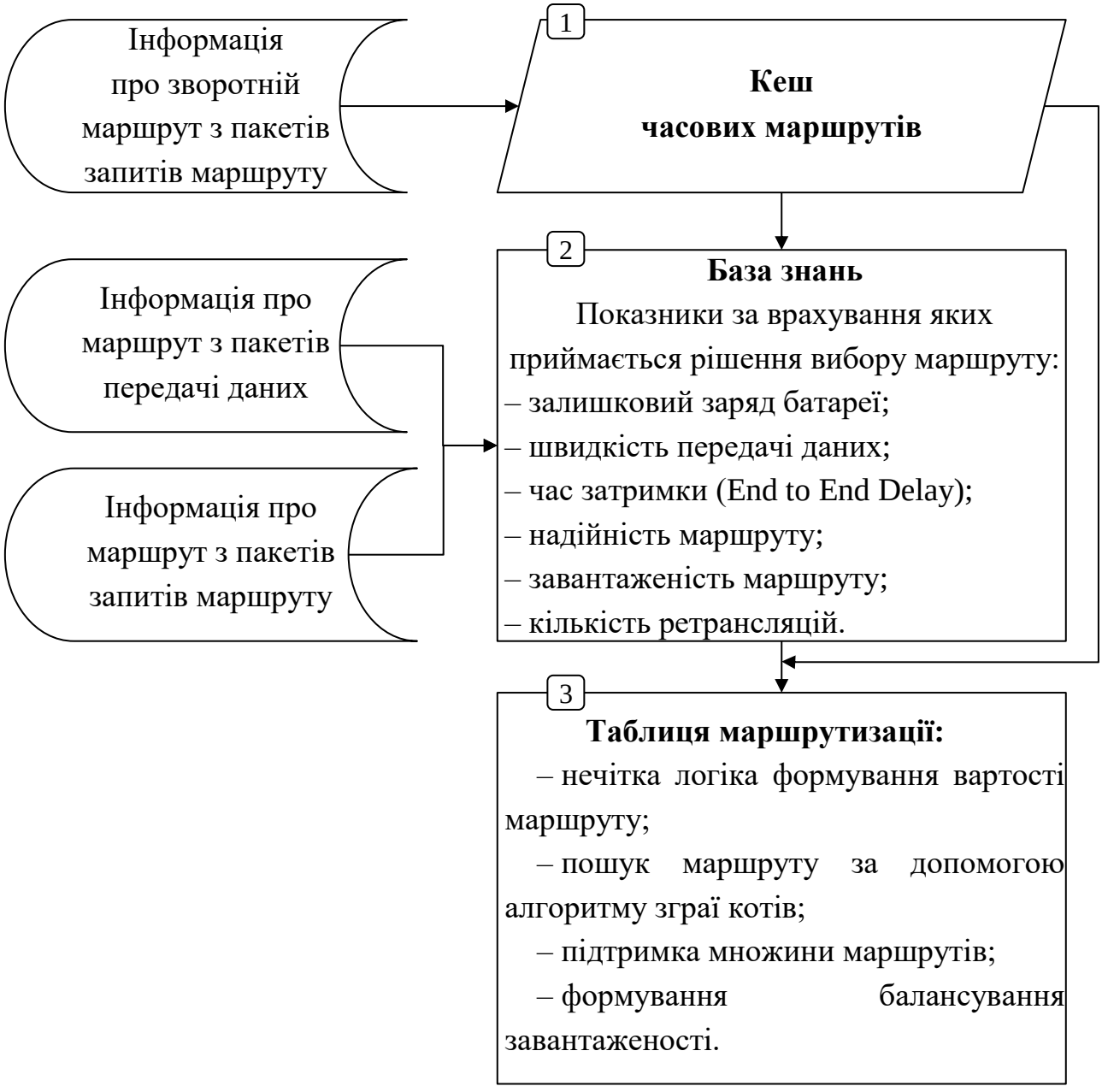


Рис. 3.4 Алгоритм формування таблиці маршрутизації.

База знань накопичує усі досліджені маршрути разом із характеристиками, такими як залишковий заряд батареї вузлів, швидкість передачі даних, час затримки, надійність, рівень завантаженості та кількість ретрансляцій. Наповнення бази здійснюється під час обробки інформації, отриманої з пакетів передачі даних і пакетів запитів маршрутів. На основі накопичених даних формується таблиця маршрутизації, у якій для кожного маршруту обчислюється його вартість із використанням де нечітка логіка. Далі, за допомогою модифікованого алгоритму зграї котів виконується пошук оптимального маршруту, результати якого записуються до таблиці маршрутизації [100-110].

Кількість записів у таблиці маршрутизації обмежується чотирма найкращими маршрутами. У разі перевищення цієї кількості виконується ранжування, після чого залишаються лише чотири маршрути з найвищими показниками ефективності.

Щоб уникнути збереження застарілих маршрутів і запобігти формуванню IP-петель у мережі, вводяться часові параметри: зберігання маршруту 300 секунд; зберігання пакетів у буфері на відправку 30 секунд; час запиту 500 мілісекунд; максимальний час запиту 10 секунд; пасивне очікування відповіді 100 мілісекунд; прийом відповіді із затримкою 1 секунда; підтвердження вузла наступного переходу 250 мілісекунд.

Дев’ятий крок методики полягає у визначенні маршруту для передачі пакету з урахуванням показників якості обслуговування *(QoS).* Система прийняття рішень обирає маршрут із бази даних, який найкраще відповідає поточним умовам мережі.

Запропонований метод маршрутизації сприяє підвищенню рівня інформаційної безпеки за рахунок адаптивного вибору маршрутів передачі даних.

Десятий крок передбачає запис *IP*-пакету до кешу вихідних пакетів, де він очікує своєї черги на відправку після отримання доступу до каналу зв’язку на канальному рівні моделі *OSI.*

3.2. Процедури методу самоорганізації інформаційних мереж в умовах дестабілізуючих впливів.

Більшість сучасних розрахункових задач належать до класу оптимізаційних [60–68], де змінні рішення визначаються таким чином, щоб забезпечити роботу інформаційних мереж у найкращому режимі згідно з обраним критерієм оптимізації. Задачі оптимізації для інформаційних мереж часто мають розривний, недиференційований і мультимодальний характер, що робить класичні градієнтні детерміновані алгоритми [69–73] малоефективними або взагалі непридатними для розв'язання проблем самоорганізації мереж.

Для усунення обмежень традиційних методів було розроблено широкий спектр стохастичних підходів, відомих як метаевристичні алгоритми [66–68]. Одним із ключових напрямів серед них є алгоритми ройового інтелекту [36-38], які імітують поведінку природних колективів – роїв, зграїв чи колоній – для пошуку оптимальних рішень. Такі алгоритми відтворюють колективну взаємодію агентів і їх адаптацію до середовища, що дозволяє ефективно знаходити нові "джерела" оптимальних параметрів.

До найвідоміших представників ройових алгоритмів належать: алгоритм оптимізації рою частинок *(PSO),* алгоритм штучної бджолиної колонії *(ABC),* алгоритм мурашиної колонії *(ACO),* алгоритм зграї вовків *(GWO)* та алгоритм зграї горобців *(SSA)* [71−75].

Однак більшість базових метаевристик не забезпечують належного балансу між дослідженням *(exploration)* і використанням *(exploitation)* простору рішень, що обмежує їх ефективність у складних задачах самоорганізації інформаційних мереж.

Це зумовлює необхідність розроблення удосконалених стратегій, спрямованих на підвищення швидкодії, збіжності та точності метаевристичних методів.

Одним із найперспективніших напрямів розвитку є комбінування алгоритмів, тобто інтеграція базових процедур одного метаевристичного підходу в інший для підвищення ефективності прийняття рішень.

Враховуючи наведене, науково актуальним є створення методу самоорганізації інформаційних мереж за умов комплексного впливу дестабілізуючих факторів із застосуванням засобів штучного інтелекту, який забезпечить підвищення оперативності прийняття рішень щодо керування параметрами самоорганізації з гарантованою достовірністю.

Аналіз праць [68–78] показав спільні обмеження досліджень, а саме:

– відсутність формування ієрархії показників для опису процесу самоорганізації інформаційних мереж;

– не враховано обчислювальні ресурси систем, що здійснюють аналіз процесів самоорганізації;

– бракує механізмів динамічного коригування системи показників у ході оцінювання;

– не враховано типи невизначеності та рівні зашумленості даних, що породжує похибки у відображенні реального стану мереж;

– відсутні інструменти глибокого навчання баз знань, які описують перебіг самоорганізації;

– висока обчислювальна складність розрахунків при моделюванні самоорганізації;

– не враховано апаратні обмеження та доступні обчислювальні ресурси платформи оцінювання;

– відсутні засоби встановлення пріоритетів пошуку рішень за окремими напрямами станів самоорганізації.

Для подальшої деталізації процесу самоорганізації визначаються параметри контролю й керування за рівнями моделі взаємодії відкритих систем, що зведено у табл. 3.1.

Таблиця 3.1 − Орієнтовний взаємозв’язок між параметрами та управляючими змінними за рівнями моделі *OSI*

Рівень *OSI*	Об’єкти управління	Основні параметри оптимізації	Управляючий вплив вузла
Фізичний	Канал в межах зв’язності з сусідніми вузлами	Пропускна здатність, час передачі в каналі, витрати енергії батарей, потужність передачі тощо	Потужність (спрямованість) передачі, вид модуляції, тип корегуючого коду, параметри тощо
Канальний	Канали в межах зв’язності з сусідніми вузлами	Пропускна здатність та час передачі в каналі, витрати енергії батарей, обсяг службової інформації тощо	Алгоритми обміну канального рівня: детерміновані, випадкові, гібридні; розміри пакетів та квитанцій
Мережевий	Один або декілька маршрутів передачі	Обсяг службової інформації, параметри маршруту (час побудови та існування, кількість, пропускна здатність, час доставки, витрати енергії батарей тощо).	Алгоритми обміну мережевого рівня: табличні, зондові, гібридні, хвильові асиметричні, ієрархічні тощо. Алгоритми управління топологією
Транспортний	Інформаційний напрямок зв’язку	Пропускна здатність, час та варіація його передачі в напрямку	Алгоритми управління чергами. Розмір вікна перевантаження, час тайм-ауту тощо
Прикладний	Вузол, вузли-сусіди, зона мережі, вся мережа	Пропускна здатність, час та варіація часу передачі, витрати енергії батарей, безпека передачі	Алгоритми (протоколи) інформаційного обміну прикладного рівня, координація та інтелектуалізація за рівнями OSI

Як показано в таблиці 3.1, поняття самоорганізації інформаційних мереж охоплює переважно параметри перших чотирьох рівнів моделі взаємодії відкритих систем. Тому подальший аналіз у дослідженні зосереджено саме на цих рівнях і відповідних параметрах, що визначають їхню ефективність.

Розроблений комбінований алгоритм включає три основні процедури: дослідження, експлуатацію та перехід між цими фазами. Така структура дозволяє забезпечити гнучке реагування на зміни умов функціонування мережі.

У межах методу використовується комбінований підхід, який поєднує переваги етапів дослідження (глобального пошуку) та експлуатації (локальної оптимізації), що забезпечує стійкість та адаптивність інформаційної мережі до зовнішніх впливів [39-41].

Метод самоорганізації інформаційних мереж в умовах дестабілізуючих факторів передбачає таку послідовність дій:

Дія 1. Введення вихідних даних. На даному етапі вводяться вихідні передані дані, про інформаційну мережу, яка самоорганізується.

Дія 2. Виставлення особин комбінованої зграї на площині пошуку.

Всі перелічені особини, в данному методі яструби та лиски, утворюють популяцію комбінованого алгоритму, яку необхідно змоделювати з математичної точки зору. Виставлення особин комбінованого алгоритму здійснюється з урахуванням невизначеності щодо інформаційної мережі, що самоорганізується та проводиться ініціалізація базової моделі її стану (3.28) [41- 45, 61, 76, 77].

$$X = [\, x_{id} \times \iota_{id} \mid i = \overline{1, N};\ d = \overline{1, m}\,],$$
$$X_i = [\, x_{id} \times \iota_{id} \mid d = \overline{1, m}\,], \qquad (3.28)$$

Основна позиція зграї комбінованого алгоритму ініціалізується на початку виконання алгоритму з рівняння (3.29):

$$x_{i,d} = lb_d + r \cdot \left(ub_d - lb_d \right), \qquad (3.29)$$

Тут X – популяційна матриця особин комбінованого алгоритму, X_i – i-й член особин комбінованого алгоритму (кандидат рішення), $x_{i,d}$ – d-й вимір у

просторі пошуку (змінна рішення), N − кількість особин комбінованого алгоритму, m – кількість змінних рішення, r − випадкове число в інтервалі [0,1], lb_d і є ub_d нижньою та верхньою межею d-их змінних рішеннь.

Оскільки розташування кожної особини комбінованого алгоритму у просторі рішень відповідає окремому кандидатному варіанту, для неї обчислюється значення цільового функціонала. Тому сукупність таких оцінок по всій популяції утворює вектор значень, який задається виразом (3.30).

$$F = [\, F_i \mid i = \overline{1, N} \,] = [\, F(X_i) \mid i = \overline{1, N} \,] \tag{3.30}$$

де F − вектор оціненої цільової функції, F_i − оцінена цільова функція на основі i-го члена зграї комбінованого алгоритму.

Оцінені значення цільової функції відображають якість запропонованих рішень, сформованих особинами комбінованої популяції. Найвище значення функції відповідає найкращому члену зграї, тобто найоптимальнішому рішенню задачі, тоді як найнижче значення визначає найменш ефективне рішення.

Оскільки під час кожної ітерації оновлюється положення особин комбінованого алгоритму в просторі пошуку, необхідно також оновлювати поточного лідера, порівнюючи нові значення цільової функції з попередніми. Наприкінці роботи алгоритму саме позиція найкращої особини, отримана після завершення всіх ітерацій, визначається як остаточне рішення оптимізаційної задачі.

Дія 3. Нумерація особин в зграї комбінованого алгоритму, i, iє [0,S]. На цьому етапі кожній особині зграї комбінованого алгоритму надається порядковий номер.

Дія 4. Визначення початкової швидкості особин зграї комбінованого алгоритму.

Початкова швидкість v_0 кожної особини комбінованої алгоритму визначається наступним виразом:

$$v_0 = \left(v_1, v_2 ... v_S\right), \tag{3.31}$$

В розробленому методі комбінованого алгоритму позиція членів популяції в просторі вирішення проблем оновлюється на основі моделювання стратегії полювання особин комбінованої зграї.

Дія 5. Попереднє оцінювання ділянки пошуку особинами комбінованої зграї. Особини комбінованої зграї відрізняються своїми стратегіями пошуку ресурсів. Для підвищення ефективності алгоритму доцільно виконати впорядкування потенційних джерел даних за рівнем їхньої надійності. Вибір оптимальної області пошуку здійснюється з урахуванням ступеня зашумленості вхідних параметрів, відповідно до підходу, запропонованого в роботі [26].

Дія 6. Класифікація джерел їжі для агентів комбінованої зграї.

Місцезнаходження мінімальної придатності вважаються зайці −для агентів-яструбів, дрібна риба – для агентів-лисок (FS_{ht}), локації з наступних трьох джерел ресурсів птахи (агенти-яструби), ряска (агенти-лиски) (FS_{at}), а решта вважаються звичайною їжею (FS_{nt}):

$$FS_{ht}=FS(\text{sorte_index}(1)), \tag{3.32}$$

$$FS_{at}(1:3)=\text{FS}(\text{sorte_index}(2:4)), \tag{3.33}$$

$$FS_{nt}(1:NP\text{-}4)=\text{FS}(\text{sorte_index}(5: NP)). \tag{3.34}$$

Дія 7. Сортування найкращих особин зграї комбінованого алгоритму. Відбір найкращих особин комбінованої зграї здійснюється за допомогою вдосконаленого генетичного алгоритму, представленого в роботах [25–28]. У процесі пошуку рішень найсильніші особини з найвищими показниками ефективності спрямовують інших членів популяції до перспективних областей простору пошуку. Така координація поведінки агентів забезпечує

різноманітність напрямів дослідження та підвищує глобальну здатність алгоритму знаходити оптимальні рішення.

Дії 1−7, 10−15 є загальними для всіх особин комбінованого алгоритму.

Дія 8. Процедура оптимізації зграї агентів-яструбів .

Дія 8.1 Виконання процедури розвідки алгоритму зграї агентів-яструбів.

Оновлення позиції яструбів описується наступним чином:

$$X\left(t+1\right)=\begin{cases} X_{вип}(t)-r_1\cdot\left|X_{вип}(t)-2r_2X(t)\right|, q\geq 0.5 \\ \left(X_{жерт}(t)-X_m(t)\right)-r_3(LB+r_4(UB-LB)), q<0.5 \end{cases} \quad (3.35)$$

де *X(t)* та *X(t+1)* представляють вектор позиції агентів-яструбів в поточній і наступній ітераціях. *t* представляє поточну кількість ітерацій. $X_{жерт}$ − це позиція жертви, яка також вважається оптимальним рішенням. $X_{вип}(t)$ − вектор позиції випадкової особини зі зграї агентів-яструбів в поточній популяції. r_1, r_2, r_3, r_4 і q є випадковими числами між [0, 1]. *LB* та *UB* − нижня і верхня межі змінних. $X_m(t)$ є середня позиція всіх агентів-яструбів у популяції, яка розраховується наступним чином:

$$X_m(t)=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}X_i\left(t\right), \quad (3.36)$$

де N – чисельність популяції, $X_i\left(t\right)$ – вектор поточного положення *i*-го агента-яструба зі зграї.

8.2 Фаза дослідження для алгоритму зграї агентів-яструбів.

В алгоритмі ключову роль відіграє енергія втечі цілі *E,* яка визначає перехід між етапами глобального пошуку та локальної оптимізації. У процесі моделювання ця енергія поступово зменшується із кожною ітерацією, що відображає зниження активності під час «втечі» та задається рівнянням (3.37).

$$E = 2E_0\left(\frac{T-t}{T}\right), \tag{3.37}$$

де E_0 − випадкове число між [1, 1], що представляє початковий стан енергії здобичі, T – максимальна кількість ітерацій. Коли $|E| \geq 1$, агент-яструб продовжить пошук місцезнаходження ресурсу в цільовій зоні, визначеній як фаза дослідження. У випадку $|E| < 1$, агент-яструб почне полювати і перейде на стадію експлуатації.

На етапі експлуатації використовуються чотири обрані стратегії: м'яка облога, жорстка облога, м'яка облога з поступовими швидкими зануреннями та жорстка облога з поступовими швидкими зануреннями. Ці стратегії імітують процес атаки хижака на здобич; параметр r задає ймовірність того, що здобич уникне нападу, і приймає випадкове значення з інтервалу [0,1].

Якщо $r < 0{,}5$ означає, що здобич успішно пройшла через небезпечну ситуацію, $r \geq 0.5$ означає випадок невдалої втечі. Різні комбінації r-значення та енергії втечі E відповідають різним стратегіям полювання. Коли $|E| < 0.5$, виконується жорстка облога. В іншому випадку ведеться м'яка облога.

8.3 Виконання стратегії м'якої облоги особинами зі зграї агентів-яструбів.

М'яка облога виконується, коли $r \geq 0.5$ і $|E| \geq 0.5$. Положення агента-яструба обирається таким чином:

$$X(t+1) = \Delta X(t) - E\left|JX_{жерт}(t) - X(t)\right|, \tag{3.38}$$

$$\Delta X(t) = X_{жерт}(t) - X(t), \tag{3.39}$$

$$J = 2(1 - r_5), \tag{3.40}$$

де *ΔX(t)* − відстань між позицією агента-яструба та ресурсом. r_5 − це випадкове число між [0, 1], J − випадкова інтенсивність.

8.4 Виконання стратегії жорсткої облоги агентами-яструбами.

Жорстка облога коли $r \geq 0.5$ і $|E| < 0.5$. Математичний опис такої поведінки виглядає наступним чином:

$$X(t+1) = X_{жерт}(t) - E\,|\Delta X(t)|. \tag{3.41}$$

8.5 Виконання стратегії м'якої облоги з поступовими швидкими зануреннями для зграї агентів-яструбів.

Коли $r < 0{,}5$ і $|E| \geq 0.5$, агент-яструб візьме м'яку облогу з поступовими швидкими зануреннями. Математична модель наступна:

$$Y = X_{жерт}\ (t) - E\left|JX_{жерт}(t) - X(t)\right|, \tag{3.42}$$

$$Z = Y + S \times LF(D), \tag{3.43}$$

$$X\left(t+1\right)\begin{cases} Y, \text{якщо } F(Y) < F(X(t)) \\ Z, \text{якщо } F(Z) < F(X(t)) \end{cases}, \tag{3.44}$$

де D − розмірність проблеми, S − випадковий вектор, розмір якого дорівнює $1 \times D$, $F(\cdot)$ − цільова функція.

$$LF\left(x\right) = 0.01 \times \frac{u \times \sigma}{|v|^{\frac{1}{\beta}}},$$

$$\sigma = \left(\frac{\Gamma\left(1+\beta\right) \times \sin\left(\frac{\pi\beta}{2}\right)}{\Gamma\left(1+\beta\right) \times \beta \times 2^{\left(\frac{\beta-1}{2}\right)}} \right)^{1/\beta}, \tag{3.45}$$

де u і v – два випадкових числа між [0, 1], β – константа з фіксованим значення 1,5, Γ(·) – гамма-функція.

8.5 Виконання стратегії жорсткої облоги агентів-яструбів з поступовими швидкими зануреннями

Коли $r < 0{,}5$ і $|E| < 0.5$, агент-яструб виконає жорстку облогу, щоб наблизитися до ресурсу, а потім здійснить раптовий напад.

Математична модель описується наступним чином:

$$Y = X_{жерт}(t) - E\left|JX_{жерт}(t) - X_m(t)\right|, \tag{3.46}$$

$$Z = Y + S \times LF(D), \tag{3.47}$$

$$X(t+1)\begin{cases} Y, \text{якщо } F(Y) < F(X(t)) \\ Z, \text{якщо } F(Z) < F(X(t)) \end{cases}, \tag{3.48}$$

де $X_m(t)$ обчислюється за допомогою рівняння (3.44). Лише краща позиція між Y та Z вибирається як наступна позиція.

Дія 9. Ініціація алгоритму зграї лиски.

У реалізації алгоритму передбачено чотири типи рухів – випадкове переміщення, рух ланцюжком, корекція позиції на підставі інформації від лідерів групи та прямий рух лідера.

З огляду на модель поведінки лисок, колективна популяція організовується в ланцюгову структуру для просування до цілі.

На передньому краї руху розташовується підмножина лисок – лідери, які вказують напрям і координують дії всієї зграї. Тому початкова популяція розбивається на дві групи: лисок-лідерів і лисок-послідовниць.

Лідери обираються із популяції випадковим чином, після чого для кожної підгрупи послідовно виконуються згадані чотири види рухів.

9.1 Випадковий рух агентів-лисок.

На цьому етапі випадкова позиція Q обчислюється за формулою (3.49). Послідовники-лиски переміщуються до цієї позиції з метою дослідження різних ділянок простору пошуку.

$$Q = \text{rand}\,(1, D)\left(UB\ -\ LB\right) + LB, \tag{3.49}$$

де D − розмірність проблеми, LB і UB − нижня і верхня межі змінних. Випадковий рух дає алгоритму більшу ефективність глобального пошуку та посилює здатність алгоритму виходити з локального оптимуму. Нова позиція лиски оновлюється таким чином:

$$X_i(t+1) = X_i(t) + A \times r_6 \times (Q - X_i(t)), \tag{3.50}$$

де $X_i(t+1)$ − позиція i-го послідовника в наступній ітерації t, r_6 – випадкове число в діапазоні [0, 1], а параметр A обчислюється відповідно до рівняння (3.51):

$$A = 1 - \frac{t}{T}\ , \tag{3.51}$$

де t – кількість поточних ітерацій, а T – максимальна кількість ітерацій.

9.2 Ланцюговий рух агентів-лисок.

У алгоритмі рою агентів-лисок для реалізації ланцюгового руху використовується середнє положення двох особин. На основі цього середнього значення обчислюється нова позиція лиски-послідовника, що забезпечує узгоджене пересування всієї групи та підвищує ефективність дослідження простору пошуку:

$$X_i(t+1) = \frac{1}{2} \times (X_{i-1}(t) + X_i(t)), \tag{3.52}$$

де $X_{i-1}(t)$ – позиція *(i−1)*-го послідовника агента-лиски в поточній ітерації *t*.

9.3 Налаштування позиції на основі лідерів груп.

Зазвичай рух зграї очолює один із лідерів, який визначає напрям руху, тоді як усі інші лиски поступово коригують свої позиції, орієнтуючись на лідерів і наближаючись до них.

Водночас важливою задачею є забезпечення оновлення позиції кожної лиски відповідно до вибраного лідера. Для цього використовується співвідношення (3.53), яке задає механізм вибору лідера та оновлення позицій учасників зграї.

$$k = 1 + \left(i \bmod L\right), \tag{3.53}$$

де i − індекс поточного послідовника, L − кількість лідерів, а k − індексний номер лідера.

Наступна позиція послідовника-лиски на основі обраного лідера k обчислюється за допомогою рівняння (3.54).

$$\begin{aligned} X_i\ (t+1) &= LeaderX_k(t) + 2 \times r_7 \times \\ &\times cos(2R\pi) \times (LeaderX_k(t) - X_i(t)) \end{aligned}, \tag{3.54}$$

де $LeaderX_k(t)$ – позиція обраного лідера, r_7 – випадкове число в інтервалі [0, 1], а R позначає випадкове число в інтервалі [−1, 1].

9.4 Лідерський рух агентів-лисок

Зграя повинна орієнтуватися на ділянку з найкращими умовами, тому в окремих випадках лідери змушені залишати поточну оптимальну позицію, щоб дослідити інші ділянки простору пошуку в пошуках кращого рішення.

Процес оновлення позиції лідера описується формулою:

$$\begin{aligned} &LeaderX_i(t+1) = \\ &= \begin{cases} B \times r_8 \times cos(2R\pi) \times (gBest(t) - LeaderX_i(t)) + gBest(t), r_9 < 0.5 \\ B \times r_8 \times cos(2R\pi) \times (gBest(t) - LeaderX_i(t)) - gBest(t), r_9 \geq 0.5 \end{cases}, \end{aligned} \tag{3.55}$$

В рівнянні (3.55) *gBest* − поточна оптимальна позиція, r_8 і r_9 − випадкові числа в інтервалі [0, 1], а R − випадкове число в інтервалі [1, 1]. В r_8 генерує більш значний стохастичний рух, $cos(2R\pi)$ призначений для пошуку найкращої особи з різним радіусом для отримання вищої позиції. Значення B розраховується за допомогою рівняння (3.56).

$$B = 2 - t \times \left(\frac{1}{T} \right), \tag{3.56}$$

де t − кількість поточних ітерацій, а T – максимум ітерацій.

Дія 10. Об'єднання окремих алгоритмів оптимізації в змішаний.

Для поєднання різних алгоритмів природної оптимізації застосовується стратегія ансамблевої мутації. Вона забезпечує створення різноманітних особин у популяції, що підвищує здатність гібридного алгоритму до глобального пошуку оптимальних рішень. Такий підхід формалізується рівнянням, яке описує процес генерування нових індивідуумів з урахуванням різних механізмів мутації.

$$V_{i1} = \begin{cases} X_{R1} + F_1 \times (X_{R2} - X_{R3}), r_{10} < C_1 \\ X_i, r_{10} \geq C_1 \end{cases}, \tag{3.57}$$

$$V_{i2} = \begin{cases} X_{R4} + F_2 \times (X_{R5} - X_{R6}) + F_2 \times (X_{R7} - X_{R8}), r_{11} < C_2 \\ X_i, r_{11} \geq C_2 \end{cases}, \tag{3.58}$$

$$V_{i3} = \begin{cases} X_i + F_3 \times (X_{R9} - X_i) + F_3 \times (X_{R10} - X_{R11}), r_{12} < C_3 \\ X_i, r_{12} \geq C_3 \end{cases}, \tag{3.59}$$

де V_{i1}, V_{i2} і V_{i3} − нові згенеровані мутовані позиції i-го агенту пошуку. $R_1 \sim R_{11}$ − різні цілі показники в діапазоні [1, N]. F_1, F_2 і F_3 − масштабні коефіцієнти зі значеннями 1,0, 0,8 і 1,0 відповідно, $r_{10} \sim r_{12}$ − випадкові числа в

діапазоні [0,1]. Крім того, параметри C_1, C_2 і C_3 дорівнюють 0,1, 0,2 і 0,9, що позначає швидкість кросинговеру.

Після створення мутантних позицій-кандидатів V_{i1}, V_{i2} і V_{i3} буде обрано найкращу позицію V_i з найнижчим значенням придатності, далі кращу позицію буде збережено як нову X_i для наступного інтеграційного обчислення. Ці процеси можна описати за допомогою рівняння (3.60).

$$X_i = \begin{cases} V_i, & \text{якщо} F(V_i) < F(X_i) \\ X_i, & \text{інакше} \end{cases}, \tag{3.60}$$

де $F(\cdot)$ – функція витрат.

Дія 11. Перевірка наявності хижака агентів комбінованої зграї. На цьому етапі агенти здійснюють перевірку середовища на наявність потенційних загроз. Якщо хижаків виявлено, алгоритм переходить до дії 12, а якщо ні – процес продовжується без змін, залишаючись у поточному циклі пошуку.

Дія 12. Втеча та боротьба з хижаками агентів комбінованої зграї. У цьому випадку реалізується стратегія втечі або протидії, яка моделює природну поведінку групових систем.

Результатом є зміна позицій агентів поблизу їх поточного розташування. Такий механізм підвищує ефективність локального пошуку, дозволяючи уточнювати рішення в межах локальних областей простору оптимізації.

Рух агентів здійснюється у межах певної зони навколо кожного з них, радіус якої зменшується з кожною ітерацією, що відповідає переходу від глобального пошуку до локального уточнення.

На початкових етапах алгоритму радіус великий, що сприяє ширшому охопленню простору, а надалі поступово зменшується, концентруючи пошук поблизу найкращих.

Для процесу де імітаційне комп’ютерне моделювання цього явища передбачається околиця навколо кожного агенту комбінованої зграї, який спочатку випадково генерує нову позицію в цій околиці за допомогою (3.61) і

(3.62). Тоді, якщо значення цільової функції покращується, ця нова позиція замінює попередню позицію відповідно до (3.63):

$$x_{i,j}^{P_3} = x_{i,j} + \\ + \left(lb_{local,j}^{t} + \left(ub_{local,j}^{t} - rand \cdot lb_{local,j}^{t} \right) \right), \tag{3.61}$$

$$Local \quad bounds: \begin{cases} lb_{local,j}^{t} = \dfrac{lb_j}{t}, \\ ub_{local,j}^{t} = \dfrac{ub_j}{t}, \end{cases} \tag{3.62}$$

$$X_i = \begin{cases} X_i^{P_3}, F_i^{P_3} \langle F_i; \\ X_i, else, \end{cases} \tag{3.63}$$

де $X_i^{P_3}$ – нова згенерована позиція *i*-го агенту комбінованої зграї, $x_{i,j}^{P_3}$ – *j*-й розмір агенту комбінованої зграї, $F_i^{P_3}$ – значення цільової функції, *t* – ітераційний контур, lb_j та ub_j – нижня та верхня межі *j*-ї змінної. $lb_{local,j}^{t}$ та $ub_{local,j}^{t}$ – локальна нижня та локальна верхня межі, допустимими для *j*-ї змінної, відповідно, для імітації локального пошуку рішень.

Дія 13. Перевірка критерію зупинки. Алгоритм завершиться коли буде виконано максимальну кількість ітерацій. Якщо ні, то поведінка генерації нових місць і перевірки умов буде повторюватися.

Дія 14. Навчання моделі знань агентів комбінованої зграї.

У даному дослідженні для навчання баз знань кожного агенту комбінованої зграї застосовується метод еволюційного навчання штучних нейронних мереж, розроблений у роботах [25–29].

Дія 15. Визначення кількості необхідних обчислювальних ресурсів, інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень.

Реалізація зазначених процедур дозволяє підтримувати інформаційну безпеку мережі в умовах динамічної зміни топології та дії атак.

Для запобігання зацикленню процесів на попередніх етапах (1–14) та підвищення оперативності розрахунків здійснюється моніторинг рівня завантаженості системи.

У разі перевищення заданого порогу обчислювальної складності визначається кількість програмно-апаратних ресурсів, які необхідно додатково задіяти. Розрахунок проводиться за допомогою методу, описаного в роботі [86], що дозволяє забезпечити стабільність і безперервність функціонування системи.

Висновки до розділу 3.

У розділі 3 розроблено метод самоорганізації інформаційних мереж в умовах дестабілізуючих впливів, який базується на використанні результатів комплексної математичної моделі та адаптивної маршрутизації інформаційних потоків. Запропонований метод забезпечує децентралізовану перебудову параметрів і структури мережі з урахуванням зміни умов функціонування, зашумленості даних та обмежених ресурсів вузлів.

Основою методу маршрутизації став алгоритм котячої зграї, який дозволяє реалізувати динамічний багатопараметричний пошук оптимальних шляхів передачі інформації.

Новизна методу полягає у тому, що: враховується тип невизначеності вхідних даних при початковому розміщенні агентів зграї, що дає змогу ефективно використовувати накопичену інформацію про стан мережі; впроваджено адаптивні стратегії пошуку джерел, що підвищують швидкість оцінювання якості маршрутів для різних типів даних; використовується досвід найкращих агентів зграї під час локального та глобального пошуку, що дозволяє уточнювати ділянки простору оптимізації; враховуються доступні обчислювальні ресурси системи, а також визначається потреба у їх

додатковому залученні; змінюється площа пошуку агентами в межах множини можливих маршрутів, що розширює простір оптимізації; найкращі агенти визначаються за допомогою удосконаленого генетичного алгоритму; здійснюється навчання баз знань через корекцію синаптичних ваг нейронної мережі, функцій належності та архітектури елементів; уникається проблема локального екстремуму завдяки процедурі стрибка, що запобігає зацикленню в роботі алгоритму *DSR*.

У дослідженні запропоновано метод самоорганізації інформаційних мереж в умовах дестабілізуючих впливів, який завдяки вдосконаленим і додатковим процедурам забезпечує: урахування типу невизначеності та рівня зашумленості даних; реалізацію адаптивних стратегій самоорганізації; об'єднання різних ройових стратегій пошуку в єдину інтегровану систему, урахування фактору «хижака» при виборі цільових об'єктів; аналіз доступних обчислювальних ресурсів під час самоорганізації; зміну площі пошуку для кожного агента комбінованого алгоритму; регулювання швидкості переміщення агентів у процесі пошуку; визначення пріоритетності напрямків пошуку; початкове розміщення агентів з урахуванням типу невизначеності; точне навчання агентів комбінованого алгоритму; визначення найкращих особин за допомогою удосконаленого генетичного алгоритму; локальний і глобальний пошук з урахуванням рівня зашумленості даних у процесі самоорганізації; навчання баз знань шляхом коригування ваг нейронної мережі, параметрів функцій належності та архітектури її елементів.

У межах даного дослідження оперативність самоорганізації визначається часом адаптації мережі до дестабілізуючих впливів, що кількісно оцінюється середнім часом затримки передачі повідомлень та часом доступу до радіоканалу.

Отримані в розділі 3 результати підтверджують доцільність застосування запропонованого методу самоорганізації для підвищення оперативності адаптації інформаційних мереж.

РОЗДІЛ 4.
РЕЗУЛЬТАТИ ОЦІНКИ ЕФЕКТИВНОСТІ МЕТОДУ САМООРГАНІЗАЦІЇ ІНФОРМАЦІЙНИХ МЕРЕЖ В УМОВАХ ДЕСТАБІЛІЗУЮЧИХ ВПЛИВІВ

4.1. Імітаційна модель інформаційної мережі в умовах дестабілізуючих впливів.

Для оцінювання ефективності запропонованого методу маршрутизації та методу самоорганізації інформаційних мереж, наведених у попередніх розділах дисертаційного дослідження, необхідно здійснити порівняльний аналіз їхніх характеристик із відомими методами за різними показниками ефективності та за різних умов функціонування мереж.

Більшість існуючих підходів до самоорганізації інформаційних мереж орієнтовані на статичні умови роботи та не враховують специфіку динамічних змін у середовищі їх функціонування [95–100]. Водночас сучасні системи управління активно розвиваються у напрямку інтелектуалізації, що потребує значного обсягу службових даних. Ця інформація після обробки використовується системою управління для прийняття рішень у режимі реального часу.

Розроблений у даній роботі метод самоорганізації передбачає наявність бази знань, у якій зберігаються правила “поведінки” вузлів інформаційної мережі залежно від поточної ситуації. Тому оцінювання ефективності методу з точки зору можливості його практичного застосування повинно проводитися з урахуванням особливостей вузлової системи управління, структури інформаційної мережі та характеру її функціонування в динамічних умовах.

Вихідні передані дані для моделювання наступні:

В результаті аналізу практичного застосування інформаційних мереж та характеристик її елементів отримані наступні вихідні данні:

1. Характеристики інформаційних мереж:

– розмірність інформаційної мережі Ξ_{Nd}, де N – кількість вузлів інформаційної мережі, d – площа розміщення елементів інформаційної мережі;

– характеристики вузлів інформаційної мережі, які описані на різних рівнях представлення: фізичному (частота, вид модуляції, потужність передавача тощо), канальному (тип протоколу доступність до каналу; метод організації каналу – частотний, часовий, кодовий; швидкість передачі в каналі тощо); мережевому і транспортному; апаратурному (обсяг буферів, характеристики процесора, ємність батарей тощо); оперативному (співвідношення вузлів за мобільністю: низька, середня і висока;

– характеристики каналів (r_{ij} – швидкість передачі в каналі (i, j); s_{ij} – пропускна спроможність каналу);

– вихідні варіанти топології інформаційної мережі (N – загальна кількість вузлів інформаційної мережі чи її зони, d – площа мережі, k – кількість сусідів i-го вузла, ω – частота зміни топології мережі, яка враховує швидкості переміщення вузлів, інтенсивність відмов радіоканалів і вузлів внаслідок вогневого або радіоелектронного впливу).

2. Параметри інформаційного обміну в мережі:

– вимоги до якості інформаційного обміну: $t^{\xi}_{\text{з доп}}$ – граничне значення часу затримки передачі ξ-го типу трафіку; $S^{\xi}_{\min}$ – ширина смуги пропускання, необхідна для передачі ξ-го типу трафіку; $BER^{\xi}_{\text{доп}}$ – допустима ймовірність втрати пакетів для ξ-го типу трафіка, $SNR^{\xi}_{\text{доп}}$ – допустиме відношення сигнал/шум

– $g^{\xi}_{ij}(t)$ – значення вхідного навантаження між i-м і j-м абонентами у вигляді повідомлень ξ-го типу трафіку.

Для оцінки ефективності запропонованого методу самоорганізації інформаційних мереж, що самоорганізовуються, необхідно провести оцінку кожного i-го наукового результату, що входить до нього за j-м ресурсом мережі $R_i^j = \left\{ R_i^1, R_i^2, R_i^3, R_i^4 \right\}$, що витрачається на одержання управлінських рішень W_i^l відповідно до рівнів моделі *OSI*.

Модель мережі: мережа представляється ненаправленим графом $G = (N, k, \omega, d)$, де N – кількість вузлів, k – кількість вузлів-сусідів для деякого вузла v_i, ω – частота зміни топології мережі; d– площа інформаційної мережі.

У процесі моделювання приймаються такі допущення: під час передачі даних зміни в топології мережі відбуваються з інтенсивністю один раз на три хвилини; службові повідомлення передаються без помилок; оновлення маршрутних таблиць і баз знань вузлової системи управління здійснюється синхронно; розміри як інформаційних, так і службових пакетів є сталими та однаковими для кожного типу повідомлень.

Сутність імітаційного комп'ютерного моделювання полягає у відтворенні процесу самоорганізації інформаційної мережі на кожному рівні моделі *OSI* із використанням ймовірнісних і детермінованих процедур. Ці процедури виконуються циклічно, що забезпечує накопичення статистичних даних та дозволяє отримати узагальнені показники функціонування мережі у вигляді статистичних оцінок.

Метою створення імітаційної моделі (ІМ) є експериментальна перевірка ефективності запропонованого методу самоорганізації інформаційних мереж і визначення оптимальних параметрів його роботи відповідно до обраних критеріїв ефективності. При цьому до ІМ висуваються такі основні вимоги:

– модель повинна адекватно відображати реальні умови функціонування інформаційних мереж та процеси управління ними з урахуванням особливостей розробленого методу (адекватність моделі);

– результати експериментів мають забезпечувати можливість об'єктивного порівняння ефективності запропонованого методу самоорганізації з іншими відомими підходами (корисність моделі);

– отримані передані дані повинні бути достовірними, відтворюваними та мати прийнятний рівень точності.

Відповідно до принципів імітаційного комп'ютерного моделювання, викладених у працях [102–105], процес моделювання інформаційної мережі

подається як послідовність взаємопов’язаних етапів, кожен з яких спрямований на перевірку окремих складових ефективності розробленого методу.

На етапі змістовного опису об’єкта моделювання та створення концептуальної моделі визначається об’єкт імітації, а також формується набір вихідних даних, достатніх для дослідження процесів його функціонування. На цьому етапі встановлюється перелік припущень і обмежень, прийнятних для проведення імітаційного експерименту, а також визначаються цілі моделювання й формуються основні критерії ефективності, за якими здійснюватиметься порівняння різних варіантів архітектури або проектних рішень системи.

Вихідними даними для імітаційного моделювання є характеристики інформаційної мережі та параметри запропонованого методу самоорганізації. До основних характеристик мережі належать: кількість вузлів і радіоканалів, їх технічні параметри, структура та динаміка зміни топології. У процесі моделювання кожен вузол описується набором параметрів, що комплексно характеризують його функціонування. Вхідне навантаження на вузол формується сусідніми вузлами, які генерують повідомлення різного типу (мовні, текстові, відеодані), обсягу, пріоритету та вимог до якості обслуговування *(QoS).*

Функціонування вузла може розглядатися з різних позицій:

– мобільність, швидкість і напрямок переміщення;

– надійність, інтенсивність відмов і відновлень роботи;

– живучість, інтенсивність знищення або виходу з ладу та залишкова ємність джерела живлення.

З урахуванням особливостей розробленого методу самоорганізації процес де багатошляхова маршрутизація в інформаційних мережах моделюється на п’яти рівнях еталонної моделі *OSI* [109–111]:

- Фізичний рівень, моделюються параметри передачі сигналу: ймовірність втрати пакетів, потужність сигналу, ймовірність бітових помилок, співвідношення сигнал/шум.

- Канальний рівень, визначається спосіб розділення каналу (частотний, часовий, кодовий) і тип протоколу доступу (випадковий, з контролем несучої тощо).
- Мережевий рівень, включає метод де багатошляхова маршрутизація, управління топологією та формування маршрутних таблиць.
- Транспортний рівень, моделюються параметри обміну інформацією (кількість повторних передач, час очікування підтверджень), управління чергами й навантаженням.
- Прикладний рівень, задаються вимоги до якості обслуговування, безпечності передачі даних, пріоритети трафіку та його обсяги (за умови непульсуючого потоку даних).

Оскільки мета імітаційного моделювання полягає у вивченні впливу розробленого методу маршрутизації на функціонування інформаційної мережі, показниками якості моделювання обрано параметри вузлів і радіоканалів відповідно до рівнів *OSI.*

До контрольованих параметрів належать:

– обсяг переданої інформації;

– залишкова ємність батарей вузлів маршруту;

– розмір черг у проміжних вузлах і швидкість зміни їх обсягу;

– час затримки передачі пакетів;

– пропускна спроможність вузлів або напрямків передачі даних.

Такий підхід дозволяє адекватно оцінити ефективність роботи методу та його вплив на продуктивність і стабільність інформаційної мережі.

Оскільки реалізація запропонованого методу самоорганізації інформаційних мереж відбувається переважно на мережевому та транспортному рівнях моделі *OSI,* опис зовнішнього середовища в імітаційній моделі зведено до відображення процесів, що реалізуються на інших рівнях *OSI,* з метою оцінювання їх впливу на прийняття рішень системами інтелектуального управління.

Водночас урахувати всі параметри функціонування інформаційної мережі на всіх рівнях *OSI* нині неможливо через обмежену дослідженість їх взаємодії та відсутність повних експериментальних даних. Тому для спрощення моделі, без втрати її адекватності, фізичний рівень вузлів представлено пороговою моделлю радіоканалу.

Згідно з цією моделлю, якщо рівень прийнятого сигналу між двома вузлами *i* та *j* перевищує встановлене граничне значення, вважається, що між вузлами існує стійкий радіоканал *i–j*, який забезпечує можливість інформаційного обміну. У протилежному випадку з'єднання вважається відсутнім, і передані дані між вузлами не функціонують. Такий підхід дозволяє зберегти баланс між точністю моделювання та його обчислювальною ефективністю, забезпечуючи при цьому достовірність оцінювання ефективності розробленого методу.

На канальному рівні для моделювання процесу доступу до радіоканалу пропонується використовувати випадкову величину часу доступу до радіоканалу $t_{дк}$, яка змінюється в певних межах (від $t_{дкmin}$ до $t_{дкmax}$).

На рис. 4.1 подано структурну схему імітаційної моделі інформаційної мережі, яка складається з двох основних компонентів: моделі вузла та моделі радіоканалу. З огляду на специфіку інформаційних мереж як об'єкта дослідження, імітацію їх роботи доцільно виконувати за допомогою транзактного підходу [102–104].

Цей підхід передбачає подання як моделі вузла, так і моделі радіоканалу у вигляді СМО, де елементами виступають блоки, що імітують роботу генераторів повідомлень, черг, приладів та багатоканальних пристроїв обслуговування. Один прогін моделі полягає у створенні повідомлення (транзакту) у вузлі-відправнику, його проходженні мережею через елементи СМО відповідно до протоколів функціонування до вузла-приймача та подальшому видаленні.

Під час цього процесу здійснюється накопичення статистичних даних, необхідних для оцінювання параметрів роботи системи. Кількість прогонів

визначається вимогами до точності та достовірності отриманих результатів моделювання [105–108].

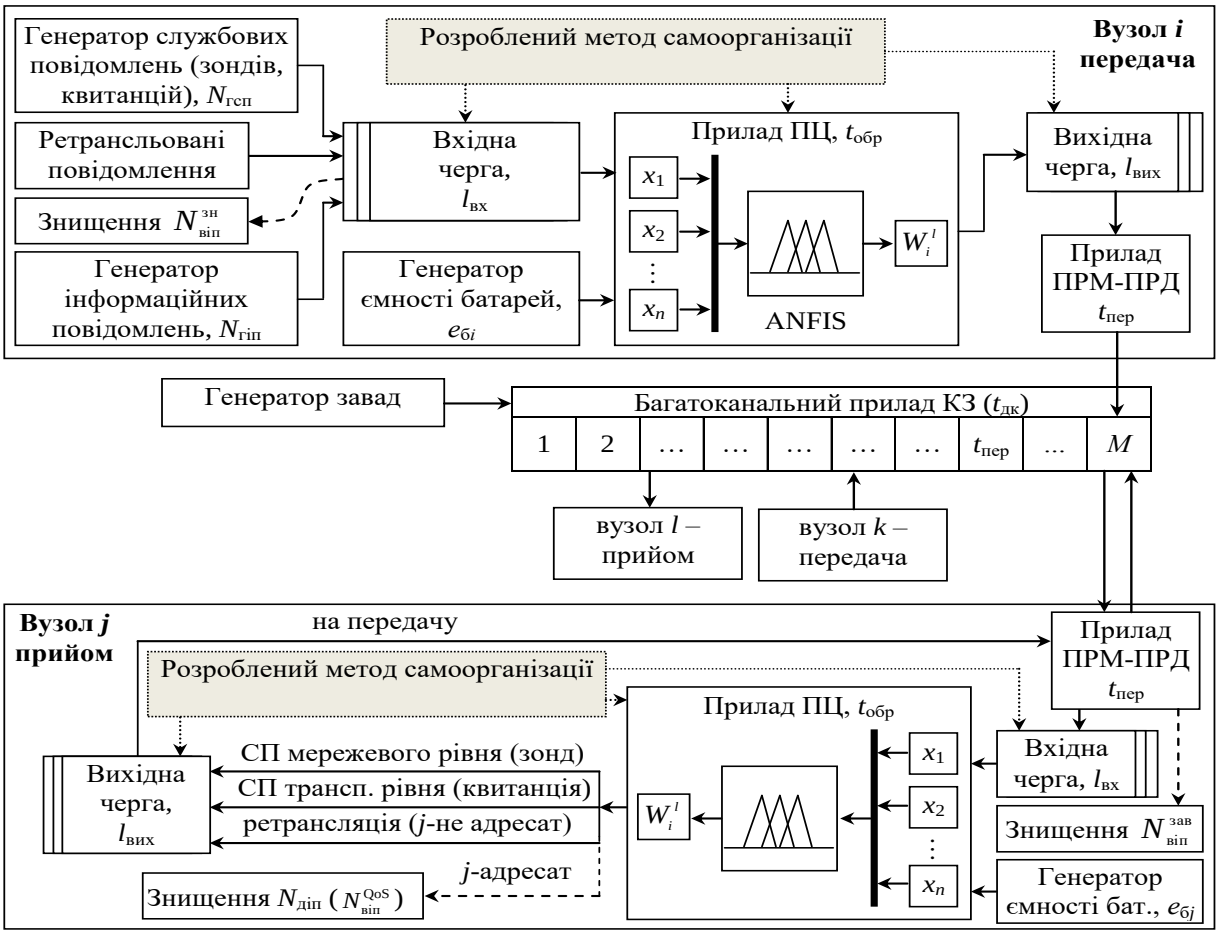


Рис. 4.1. Структурна схема імітаційної моделі з використанням транзактного способу імітації

У якості параметрів блоків, які імітують роботу генераторів повідомлень, виступають інтенсивності повідомлень різного типу: службових повідомлень $\lambda_з$ (зондів чи квитанцій), та інформаційних повідомлень λ_c^{ξ}.

Для спрощення імітаційної моделі було прийнято припущення, що процес генерування повідомлень у вузлах відбувається відповідно до пуассонівського закону розподілу. Це дозволяє адекватно описати випадковий характер надходження повідомлень у мережу при збереженні математичної керованості моделі.

Змінними параметрами для блоків, які моделюють роботу вхідних і вихідних черг, процесора та прийомопередавача, є час затримки, протягом

якого певне повідомлення обробляється відповідним елементом системи. При цьому тривалість де обробка даних повідомлення процесором включає не лише технічний час коли обробка даних, але й час, витрачений на прийняття рішення вузловою базою знань.

Вважається, що база знань інтелектуальної системи управління вузла вже навчена і не потребує додаткового навчання під час роботи, що дозволяє зменшити обчислювальні витрати та підвищити оперативність моделювання.

У якості статистичних даних при моделюванні будуть виступати: розміри вхідної $l_{вх}$ та вихідної $l_{вих}$ черг; час затримки повідомлень під час передачі в інформаційній мережі (обробка даних $t^{\xi}_{\text{обр}}$ на передачі та прийомі, час доступність до каналу $t^{\xi}_{\text{дк}}$ та час передачі в радіоканалі $t^{\xi}_{\text{пер}}$); кількість генерованих $N_{\text{гіп}}$ та доставлених $N_{\text{діп}}$ інформаційних повідомлень; кількість генерованих службових повідомлень $N_{\text{сп}}$; кількість маршрутів між вузлами відправником та адресатом $m^{ab} = \left\{ m_r^{ab} \right\}; r = \overline{1, R}$; ємність батарей вузлів $e_{б_i}, i = \overline{1, N}$, які складають *r*-й маршрут передачі.

Оскільки основне завдання інформаційної мережі полягає для обміну інформації, то в якості критеріїв ефективності вибрано пропускну спроможність $S = N_{\text{діп}}/N_{\text{гіп}}$ та обчислювальну складність розробленого методу самоорганізації інформаційних мереж на процес функціонування інформаційних мереж.

У результаті імітаційного моделювання необхідно знайти наступні функціональні залежності: $S = \varphi\left(X(t)\right)$; $t_з^{\xi} = \varphi\left(X(t)\right)$; $\delta = \varphi\left(X(t)\right)$, де $X(t)$ – множина параметрів, які використовуються при імітаційному моделюванні розробленого методу самоорганізації інформаційних мереж на процес функціонування інформаційних мереж.

Формальний опис об’єкта моделювання. Модель передбачає, що кожен вузол генерує повідомлення відповідно до величини свого вхідного

навантаження. Процес передачі пакета від вузла *i* (вузол-відправник) до вузла *j* (вузол-приймач) подано на рис. 4.1.

У ході передачі через радіоканал повідомлення може бути втрачено (в моделі – знищено) внаслідок впливу внутрішньосистемних завад, таких як обмеження протоколу доступу до каналу або проблема “прихованого термінала”, а також завад, створених зовнішніми чинниками, зокрема діями противника.

Моделювання впливу таких завад здійснюється за допомогою блоку генератора завад, який формує їх випадковим чином згідно з показниковим законом розподілу. Кількість втрачених інформаційних повідомлень через наявність завад підраховується змінною $N_{\text{віп}}^{\text{зав}}$.

Якщо повідомлення прийнято правильно (кількість помилок не перевищує граничного рівня), воно надходить у вихідну чергу вузла *j* і далі обробляється процесором (прилад ПЦ) [70–82].

Залежно від типу прийнятого повідомлення можливі такі дії:

1. Якщо вузол *j* є адресатом і отримано інформаційне повідомлення, перед його видаленням перевіряється якість обслуговування (порівнюються час доставки та кількість помилок із допустимими значеннями). Якщо ці показники перевищують встановлені межі, повідомлення вважається втраченим. Облік таких випадків здійснюється спеціальною змінною. Після прийняття певної кількості повідомлень (визначається розміром вікна перевантаження згідно з розробленим методом управління потоками даних) відправнику формується квитанція, яка потрапляє до вихідної черги вузла *j* і далі передається мережею. У випадку отримання квитанції вузлом *i* повторна передача повідомлення не виконується.

2. Якщо вузол *j* приймає службове повідомлення (СП), то оновлюється база знань про стан мережі, після чого формуються нові службові повідомлення для подальшої розсилки іншим вузлам (вони додаються до вихідної черги для ретрансляції).

3. Якщо вузол *j* не є адресатом, але отримує інформаційне повідомлення, воно передається до вихідної черги для подальшої ретрансляції.

Процес створення імітаційної моделі яке включає математичне моделювання та низку процедур, спрямованих на моделювання процесу самоорганізації інформаційних мереж, а саме: генерацію службових повідомлень (квитанцій, зондів), їхнє розсилання, формування та коригування бази знань про стан мережі у вузлах при отриманні службових повідомлень.

Змінними параметрами моделі є:

– спосіб розсилання службових повідомлень (періодичний або подієвий);

– частота їх генерації;

– глибина розповсюдження;

– метрика вибору методу управління потоками даних (формат службових повідомлень і зондів).

Основними подіями, що враховуються під час моделювання, є:

– генерація пакета (інформаційного чи службового);

– зайняття або звільнення пакетом вхідної чи вихідної черги вузла;

– обробка даних пакета процесором вузла;

– передача пакета прийомопередавачем;

– використання радіоканалу;

– відмова та відновлення каналу зв’язку;

– виникнення та згасання піків вхідного трафіку тощо.

Алгоритм функціонування імітаційної моделі наведено на рис. 4.2.

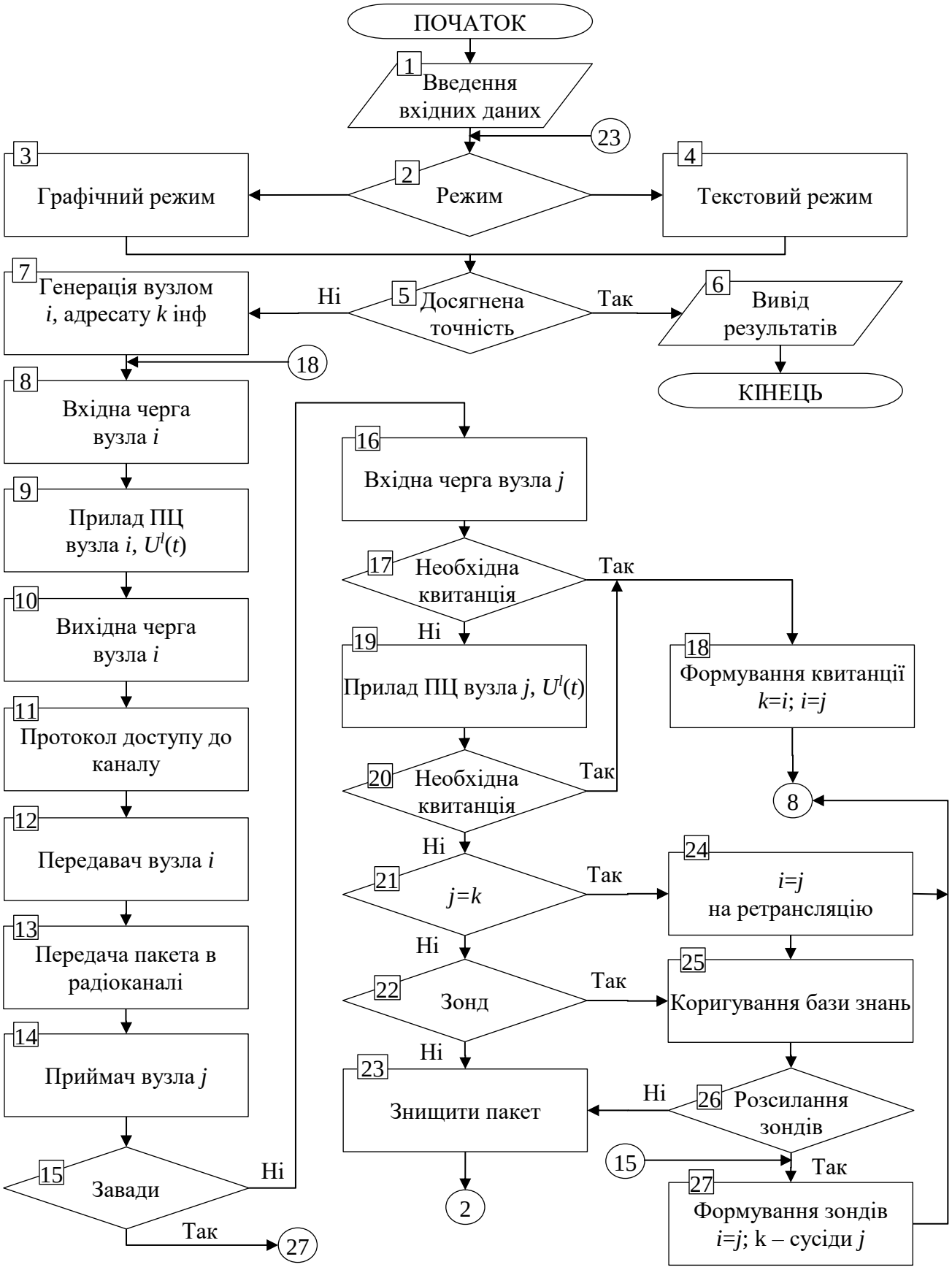


Рис. 4.2. Схема алгоритму функціонування імітаційної моделі інформаційної мережі

Як зазначалося раніше, імітацію роботи інформаційної мережі доцільно виконувати за допомогою транзактного підходу, який передбачає присвоєння кожному згенерованому повідомленню часової координати. У процесі проходження блоків імітаційної моделі це значення змінюється відповідно до логіки роботи системи. Внутрішня синхронізація транзактів, у тому числі розв'язання конфліктних ситуацій, що виникають при одночасному обслуговуванні різних транзактів у кількох блоках, забезпечується через механізми черг і визначені дисципліни їх обслуговування.

Необхідність у зовнішній синхронізації при використанні транзактного способу відсутня. Інформаційні зв'язки між блоками моделі реалізуються через передачу транзактів, які характеризуються такими атрибутами, як порядковий номер повідомлення та його тип. Процесорні пристрої, а також вхідні та вихідні черги використовують ці атрибути у своїх алгоритмах для визначення маршрутів передачі даних та вибору оптимального розміру вікна перевантаження.

Програмна реалізація імітаційної моделі представлена у вигляді сукупності процедур, розроблених мовою *C++* [102], що дозволяє застосовувати її для аналізу та синтезу інтелектуальних методів управління на мережевому і транспортному рівнях моделі *OSI.*

З огляду на особливості створеного науково-методичного апарату управління де маршрутизація, у структуру моделі додано процедури введення та коригування бази знань вузлової інтелектуальної системи управління. Ця база знань містить правила "поведінки" вузла залежно від поточного стану радіомережі.

Для реалізації імітації процесів управління інформаційною мережею запропоновано використовувати середовище комп'ютерної математики *MATLAB + Simulink* [45–48], яке містить широкий набір інструментів для моделювання функціонування інформаційних мереж і проведення статистичного аналізу отриманих результатів.

На рис. 4.3 представлено фрагмент структурної схеми пристрою ПЦ імітаційної моделі, робота якого відображає функціонування розробленого науково-методичного апарату де багатошляхова маршрутизація у процесі роботи базової транспортної мережі (БТМ). Функціональні призначення елементів схеми такі: отримання поточних виміряних значень стану радіомережі $x_1 – x_n$ здійснюється за допомогою блоків *From File 1 – From File n,* кількість яких визначається числом змінних, що характеризують стан радіомережі на різних рівнях *OSI.*

Ключовим елементом запропонованої моделі є блок *ANFIS,* який реалізує функції системи нейро-нечіткого виводу. На вхід цього блоку подаються попередньо отримані параметри, що відображають зміну часу “життя” поточного маршруту передачі $(x_1 – x_n)$. Вихідною змінною у виступає прийняте рішення — продовжувати передачу даних існуючим маршрутом чи здійснити перехід на новий маршрут. Отримане рішення надходить на пристрій ПЦ імітаційної моделі та використовується для керування процесом передачі даних у мережі. Для візуалізації результатів використовується віртуальний регістратор *Scope,* який відображає поточні прогнозовані значення часу існування маршруту.

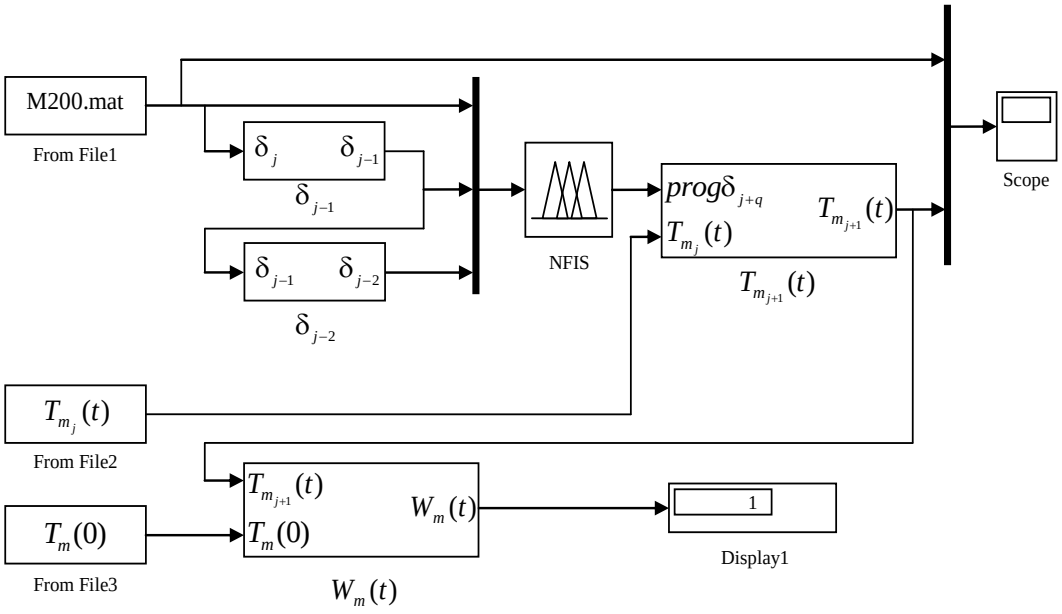


Рис. 4.3 Фрагмент структурної схеми пристрою “Процесор” імітаційної моделі

Для розроблення блоку *ANFIS* було застосовано штучні нечіткі нейронні мережі, що еволюціонують, із використанням різних алгоритмів нечіткого виводу. Основна перевага таких нейро-нечітких систем порівняно з класичними системами нечіткого виводу полягає в тому, що набір правил та параметри функцій належності не задаються вручну експертом. Замість цього їх формування здійснюється автоматично під час навчання нейронної мережі, яке охоплює не лише налаштування синаптичних ваг і параметрів функцій належності, а й оптимізацію архітектури самої мережі.

Запропонована нейро-нечітка система, створена для прогнозування оптимального розміру вікна перевантаження, має здатність самостійно визначати кількість і тип функцій належності для термів вхідних змінних. Вона навчається відтворювати залежність виду $y = f(x_1, x_2, \ldots, x_n)$ на основі методу зворотного поширення помилки, що дозволяє моделі ефективно реалізовувати моделі де нечітка логіка. Це, у свою чергу, забезпечує вузловій системі управління можливість адаптації “поведінки” вузла до змін умов функціонування радіомережі.

Випробування та дослідження властивостей імітаційної моделі.

Придатність ІМ для вирішення завдань, пов’язаних із дослідженням розробленого методу самоорганізації інформаційних мереж, визначається її цільовими властивостями — адекватністю, стійкістю та чутливістю.

Оцінка адекватності моделі.

Адекватність моделі визначається ступенем її відповідності реальній системі або процесу, який вона описує. Формальне обґрунтування адекватності зазвичай проводять із використанням методів де математичне моделювання. Їхня суть полягає у перевірці гіпотези про адекватність моделі за допомогою статистичних критеріїв, серед яких:

– порівняння середніх значень відгуків моделі та системи;

– аналіз дисперсій відхилень результатів моделювання від середнього значення реальної системи;

– оцінка максимального відносного або абсолютного відхилення між моделлю та системою.

Зазвичай процедура перевірки адекватності передбачає порівняння експериментальних даних, отриманих із реальної системи (або її прототипу), з результатами, отриманими в процесі імітаційного моделювання. Якщо ж прототип відсутній, допускається використання набору взаємопов'язаних моделей різного рівня деталізації, де більш детальна модель виступає еталоном для узагальненої.

Результати імітаційного моделювання підтверджують, що запропонований підхід дозволяє знизити негативний вплив завад і втрат пакетів на процес обміну інформацією. Таким чином, розроблений метод самоорганізації може розглядатися як ефективний інструмент підвищення інформаційна безпека за рахунок забезпечення стійкості та доступності мережевих сервісів.

Оскільки на даний момент відсутній реальний прототип інформаційних мереж, оцінку адекватності запропонованої ІМ було проведено шляхом порівняння її результатів із результатами іншої імітаційної моделі, що більш детально описує процеси на фізичному та канальному рівнях моделі *OSI*. Перевірку адекватності виконано за середніми значеннями відгуків моделей, що дозволило підтвердити адекватність побудованої імітаційної моделі [42–44].

У ході дослідження здійснюється перевірка гіпотези про близькість середніх значень кожної *n-ї* компоненти відгуків досліджуваної моделі Y_k відомим середнім значенням n-ї компоненти відгуків моделі-прототипу Y_k. На кожній з моделей проводять $N^*=N$ експериментів, а за отриманими вибірками обчислюються оцінки математичного сподівання та дисперсії відгуків обох моделей з використанням наступних очікувань:

$$\overline{Y}_n = \frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N} Y_{nk}\ ;\ D_n = \frac{1}{N-1}\sum_{k=1}^{N}\left(Y_{nk} - \overline{Y}_n\right)^2\ ; \qquad (4.4)$$

$$\overline{Y}_n^* = \frac{1}{N^*}\sum_{k=1}^{N^*} Y_{nk}^*\ ;\ D_n^* = \frac{1}{N^*-1}\sum_{k=1}^{N^*}\left(Y_{nk}^* - \overline{Y_n^*}\right)^2 . \qquad (4.5)$$

Основою перевірки гіпотези є різниця $E_n = \left(\overline{Y}_n - \overline{Y}_n^*\right)$, оцінкою дисперсії якої буде:

$$D_{pn} = \frac{(N^*-1)D_n + (N-1)D_n^*}{N+N^*-2} . \qquad (4.6)$$

Так як величини D_{pn} та $\overline{Y}_n^* - \overline{Y}_n$ є статистично незалежними, то можемо *t*-статистику:

$$t_n = \left(\overline{Y}_n^* - \overline{Y}_n\right)\sqrt{\frac{N^* N}{D_{pn}\left(N+N^*\right)}} \qquad (4.7)$$

Таким чином, необхідно скористатися таблицею розподілу *t*-статистики [26], прийнявши кількість степенів волі рівною $\gamma = N + N^* - 2$. Зазвичай задаються рівнем залежності $\alpha = 0{,}05$ та за конкретним значенням кількості степенів волі γ за таблицями знаходять критичне значення *t*-статистики $t_{кр}$. Якщо виконується нерівність $t_n \le t_{кр}$, то гіпотеза про близькість середніх значень *n*-ї компоненти відгуків моделей приймається. Тільки при наближеності відгуків за всіма компонентами векторів Y_k^* та Y_k можна говорити про адекватність моделей.

У додатку Б наведено приклад перевірки адекватності імітаційної моделі за середніми значеннями відгуків під час дослідження розробленого науково-методичного апарату де багатошляхова маршрутизація та його впливу на функціонування інформаційної мережі. Отримані результати свідчать про близькість середніх значень усіх компонентів відгуків розглянутих моделей, що підтверджує коректність та адекватність побудованої ІМ.

Оцінка стійкості моделі.

Під час оцінки адекватності проектованої системи зазвичай враховується лише обмежена кількість можливих значень вхідних параметрів, які характеризують як саму систему, так і вплив зовнішнього середовища. Тому для підтвердження достовірності результатів моделювання важливо перевірити стійкість моделі, тобто її здатність зберігати адекватність за різних умов роботи системи, зміни робочого навантаження або модифікації конфігурації мережі. Інакше кажучи, стійкість характеризує рівень нечутливості системи до змін початкових умов.

Перевірка стійкості імітаційної моделі полягає у порівнянні результатів моделювання до та після внесення змін у структуру або параметри моделі. Для кількісної оцінки стійкості можуть застосовуватися методи математичної статистики, що ґрунтуються на перевірці гіпотези щодо властивостей генеральної сукупності, виходячи з аналізу вибірки результатів експериментів.

Єдиної універсальної методики перевірки стійкості моделей не існує. У даному дослідженні для оцінювання стійкості ІМ використано критерій Уілкоксона [26], який дає змогу визначити не лише напрям змін параметрів, а й їхню інтенсивність. Суть методу полягає у порівнянні абсолютних величин відхилень компонентів вектора відгуку моделі в різних напрямках. На практиці всі абсолютні значення відхилень впорядковуються (ранжуються), після чого обчислюються суми їхніх рангів. Якщо зміни параметрів відбуваються випадково, то суми рангів у протилежних напрямках є приблизно рівними. У випадку переважання зрушень в один бік сума рангів у протилежному напрямку буде суттєво меншою, що свідчить про наявність закономірних змін у поведінці моделі.

Для перевірки стійкості моделі необхідно здійснити два вимірювання відгуків ІМ, у результаті яких буде отримано два розподіли відгуків – до $Y_д$ та після $Y_п$ внесення змін в ІМ. Щодо результатів вимірювань вводиться гіпотеза H_0, що при введенні змін у ІМ вектор відгуків змінюватися не буде:

$$H_0: Y_д = Y_п. \quad (4.8)$$

Оскільки на етапі дослідження нічого не відомо щодо впливу змін в ІМ на вектори відгуків $Y_д$ та $Y_п$, то у якості альтернативної гіпотези розглядатимемо двобічну альтернативу $\theta<0$ де $\theta>0$ (де θ – параметр, що характеризує різницю значень компонентів вектору відгуків, у разі її наявності).

Необхідно перевірити гіпотезу H_0 (відхилити її чи ні), що полягає в наступному: відхилення гіпотези будемо трактувати як наявність впливу змін у ІМ на вектор відгуків, а якщо гіпотеза не відхиляється, то вважатимемо, що вплив змін на вектор відгуку не виявлено. Для перевірки нульової гіпотези H_0 при заданому рівні значущості α, для двох незалежних вибірок об'ємами $N_д$ та N_n, необхідно:

– розташувати варіанти обох вибірок $Y_д$ та $Y_п$ у порядку зростання у вигляді варіаційного ряду та знайти $T_{емп}$ – суму порядкових номерів варіант першої вибірки;

– знаходимо за таблицею нижню критичну точку $T_{нижн.кр}(Q, N_д, N_п)$, де $Q=\alpha/2$;

– знаходимо верхню критичну точку за формою:

$$T_{верх.кр}(N_д+N_п+1)\, N_д - T_{нижн.кр}. \quad (4.9)$$

Якщо $T_{нижн.кр} < T_{емп} < T_{верх.кр}$ – нема підстав щодо відхилення нульової гіпотези H_0

У додатку Б подано приклад розрахунку критерію Уілкоксона для результатів дослідження де багатошляхова маршрутизація в мережах спеціального призначення, що самоорганізовуються. З отриманих даних видно, що значення критерію знаходиться в зоні "незначущості", що свідчить про стабільність імітаційної моделі та підтверджує її стійкий стан.

Оцінка чутливості моделі. Якщо зміна вхідних параметрів або зовнішніх впливів не призводить до помітних змін вихідних показників моделі, така

модель втрачає практичну цінність, оскільки виявляється нечутливою до варіацій робочих умов. Тому важливим етапом є оцінка чутливості моделі до змін параметрів робочого навантаження та внутрішніх характеристик системи. Такий аналіз проводиться окремо для кожного параметра.

Під час перевірки чутливості визначається діапазон зміни вихідної величини *Y* при варіюванні кожної компоненти вектору параметрів *X*. В залежності від отриманих результатів формується стратегія подальших експериментів на імітаційній моделі. Якщо навіть за значної амплітуди зміни параметра *X* вихідна реакція *Y* змінюється незначно, це свідчить, що точність відображення цього параметра у моделі не є критичною, і його можна розглядати як допоміжний. Навпаки, якщо зміни *X* істотно впливають на *Y*, параметр слід ураховувати в моделі з максимально можливою точністю.

Для проведення оцінки чутливості в роботі застосовано спеціальну процедуру визначення області зміни показника якості моделі [32]. Вона дає змогу кількісно оцінити, на скільки відсотків може змінюватися відгук моделі при збільшенні окремого параметра на заданий відсоток. Такий підхід дозволяє визначити найвпливовіші параметри системи та підвищити достовірність результатів моделювання.

Вважається, що кожна *q*-а компонента вектору *X* відхиляється від значення в його центральній точці в обидві сторони на довжину вибраного інтервалу його зміни ($min\, X_q$, $max\, X_q$). Решта компонентів вектору *X* залишаються незмінними і відповідають центральній точці. При вказаних значеннях вектору *X* проводиться пара модельних експериментів і обчислюються відгуки моделі ($min\, Y_q$, $max\, Y_q$) де $min\, Y_q$ та $max\, Y_q$ означають відповідно вектори відгуку ІМ, отримані при мінімальному та максимальному значеннях *q*-ї компоненти вектору *X*.

Далі обчислюється приріст *q*-ї компоненти векторів *X* та *Y* з виразів:

$$\Delta X_q^0 = \frac{\left(\max X_q - \min X_q\right)\cdot 2}{\max X_q - \min X_q} 100\%, \qquad (4.10)$$

$$\Delta Y_n = \frac{(\max Y_n - \min Y_n)\cdot 2}{\max Y_n - \min Y_n} 100\% \qquad (4.11)$$

При цьому, оцінку всього вектору відгуку *Y* найчастіше здійснюють за виконанням рівності $\Delta Y_q^0 = \max\{\Delta Y_n\}$.

Чутливість ІМ за *q*-ю компонентою вектору *X* визначається парою значень $\left(\Delta X_q^0, \Delta Y_q^0\right)$, яка показує, на скільки відсотків може змінитися відгук ІМ при зростанні *q*-ї компоненти параметрів на ΔX_q^0 відсотків.

У додатку В наводиться приклад перевірки чутливості ІМ у ході дослідження розробленого методу самоорганізації інформаційних мереж на процес функціонування БТМ, яка полягала у впливі зміни компонент вектору вхідних параметрів *X*=(ω, g) на зміну компонент вектору *Y*=(*S*, $t_з$, δ). У результаті обчислень показано, що найбільша чутливість ІМ при зміні ω досягається за відгуком δ (ймовірність бітової помилки трафіка, який передається в інформаційні мережі), а найбільша чутливість ІМ при зміні g досягається за відгуком $t_з$ (імпульсна характеристика стану каналу).

Таким чином, проведені експерименти показали високу ефективність розробленої моделі та підтвердили її придатність для дослідження синтезованого методу самоорганізації інформаційних мереж.

4.2. Оцінка ефективності методу маршрутизації в інформаційних мережах.

Оцінювання ефективності запропонованого методу де багатошляхова маршрутизація в інформаційних мережах, наведенного в третьому розділі [37], виконано шляхом порівняння з відомими методами маршрутизації, які застосовуються в інформаційних мережах. На сьогодні групою *IETE* для стандартизації рекомендовано два основні методи – *DSR* та *AODV*. Основні

характеристики цих методів, що використовувалися для порівняльного аналізу, наведено в таблиці 4.1 [32, 36, 38].

Методи *AODV* та *DSR* передбачають, що підтвердження наявності маршруту може бути надіслане будь-яким проміжним вузлом *i*, якщо у його таблиці багатошляхова маршрутизація або кеш-пам'яті зберігається маршрут до вузла-призначення *d*.Відмінною особливістю розробленого методу *MDSR* є використання множини метрик для оцінювання стану маршруту, що дозволяє здійснювати більш точний вибір шляху передачі інформації. На відміну від класичних підходів, *MDSR* передбачає ранжування критеріїв за рівнем їхньої важливості для оцінювання якості інформаційного напрямку, а також визначення типу маршрутизації, кількості маршрутів і способів зондування мережі.

У базових протоколах *DSR* та *AODV* використовується стандартна схема зондування, яка зумовлює певну інерційність у процесі виявлення нових маршрутів – особливо у великих мережах, де збільшується обсяг службового трафіку. Метод *MDSR,* навпаки, дає змогу адаптивно вибирати спосіб розсилання зондів залежно від поточного стану напрямку зв'язку, типу трафіку та умов функціонування мережі, що підвищує ефективність де багатошляхова маршрутизація та зменшує навантаження службових повідомлень.

Початковими даними для моделювання є: N=30, обмін інформацією (побудова маршрутів передачі даних) відбувається між 5, 10 та 15 випадково вибраними парами вузлів, розмір пакета $l_{\text{п}}$=512 байтів, протокол доступність до каналу *IEEE* 802.11, динаміка зміни топології мережі буде визначатися кількістю топологічних зв'язків між вузлами на інформаційному напрямку, які змінилися за одиницю часу ω = 0...10 зв'язків/с, розмір черги у вузлі рівний 64 пакетам, час очікування пакета в черзі $t_{\text{оч}} < 30$ с, швидкість передачі в каналі радіозв'язку $r_{\text{к}}$=1 Мбіт/с, тип трафіку – передані дані ξ=3.

Вихідними результатами моделюваннння є: пропускна спроможність мережі *S*, середній час затримки передача інформаційних повідомлень $t_{\text{з}}$ та ефективність використання службової інформації $\delta=N_{\text{пер}}/N_{\text{діп}}$.

Порівняння результатів оцінки ефективності досліджуваних методів маршрутизації (розроблений *MDSR*, *DSR* та *AODV*) представлені на рис. 4.4-4.5.

На рис 4.4 представлені залежності пропускної спроможності, часу затримки передачі повідомлень та ефективності використання службової інформації від величини зміни топології мережі при фіксованому вхідному навантаженні g=2 та g=5 потоків і кількості абонентів у мережі N=30.

Загалом видно, що збільшення швидкості зміни топології мережі приводить до зменшення пропускної спроможності мережі, зростання часу доставки повідомлень і зростання об'єму службового трафіка $V_{ст}$.

Табл. 4.1

Характеристики методів маршрутизації

№ з/п	Характеристика	Метод		
		AODV	DSR	MDSR
1	Часова складність – $t_{пр}$: побудова маршруту, його підтримання (відмова каналу)	$O(2d)$ $O(2d)$	$O(2d)$ $O(2d)$	$O(2d)$ $O(2d)$
2	Зв'язна складність – $N_{сп}$ побудова маршруту, його підтримання (відмова каналу)	$O(2N)$ $O(2N)$	$O(2N)$ $O(2N)$	$O(2N)$ $O(2k)$
3	Кількість та об'єм МТ – $V_{мт}$	1, $O(N \times N_i)$	$O(N \times d)$ кеш	$O(N \times d)$ кеш
4	Зациклення маршрутів	Ні	Ні	Ні
5	Метрика пошуку маршруту	Кількість ретрансляцій		Тип трафіка, об'єм інформації, залишкова ємність батарей, розмір черг в проміжних вузлах, мобільність мережі, вимоги до безпеки інформації, кількість адресатів
6	Тип маршрутизації	Одномаршрутна		Багатомаршрутна
7	Врахування типу трафіка	Ні		Так
8	Можливість підтримання діючих маршрутів	Ні	Ні	Ні

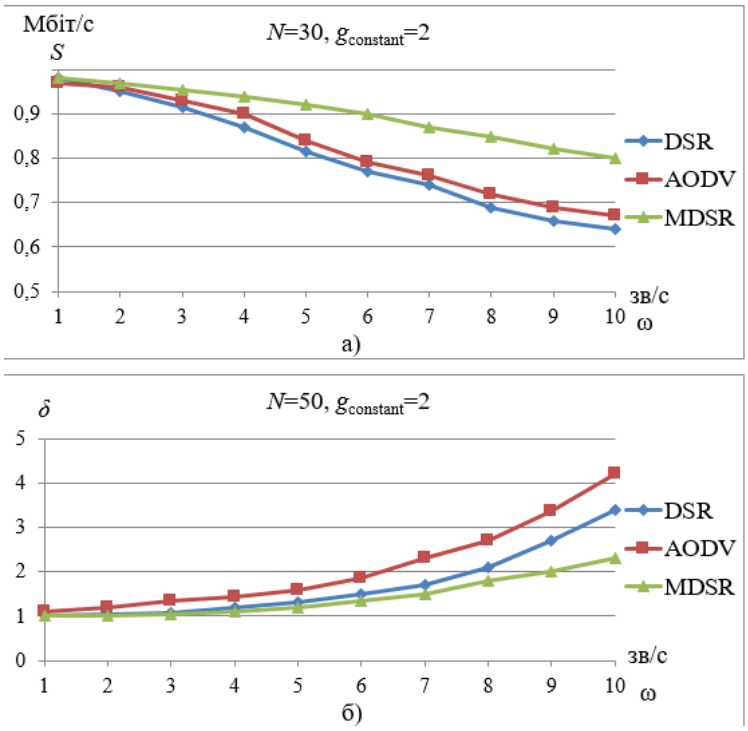


Рис. 4.4 Залежності S, $t_з$ та δ від величини зміни топології мережі при різних значеннях фіксованого навантаження g

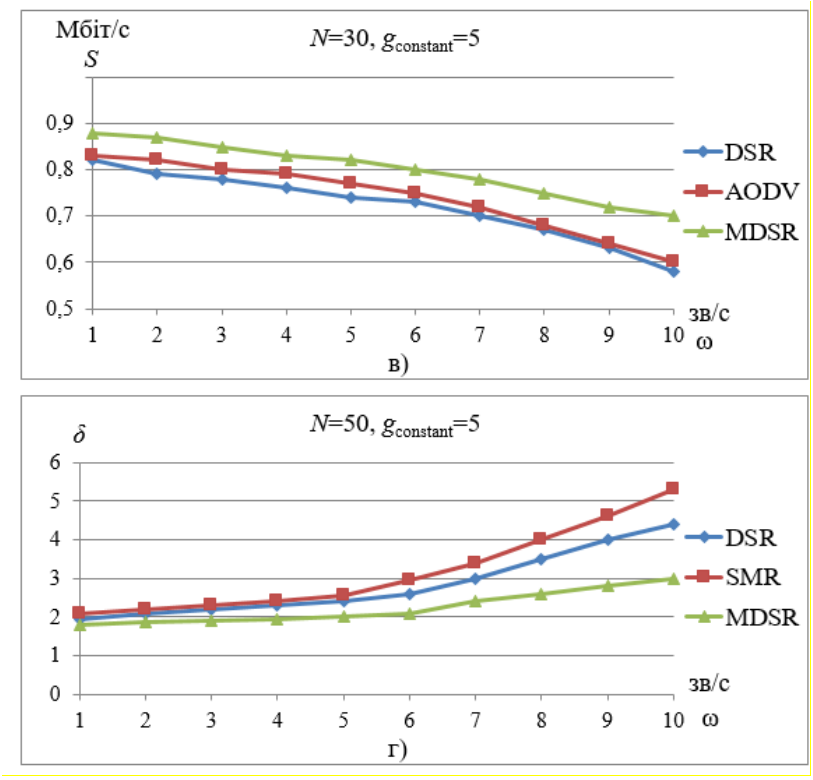


Рис. 4.5 Порівняння базових протоколів маршрутизації DSR і AODV з удосконаленим підходом MDSR

За умов незначної частоти змін топології мережі пропускна спроможність усіх розглянутих методів маршрутизації практично збігається. Проте зі збільшенням інтенсивності змін топології запропонований метод маршрутизації інформаційних мереж демонструє помітно вищу пропускну здатність. Це пояснюється його здатністю точніше оцінювати поточний стан мережі й прогнозувати стан маршрутів на основі накопичених даних і навчання бази знань (рис. 4.4а, 4.4в). При повільній зміні топології час затримки передачі повідомлень для всіх досліджуваних методів відрізняється незначно (рис. 4.4б, 4.4г). Однак зі зростанням динаміки зміни структури мережі часова затримка t_x у розробленому методі зменшується завдяки прогнозуванню стану маршрутів і попередньому навчанню бази даних, що дозволяє мінімізувати час. Для перевірки працездатності запропонованого методу маршрутизації було проведено імітаційне комп'ютерне моделювання його роботи в середовищі *MatLab* 2024 із використанням пакета розширення *Fuzzy Logic Toolbox*. Результати де математичне моделювання та візуалізація процесів представлені на рисунках 4.5 – 4.10.

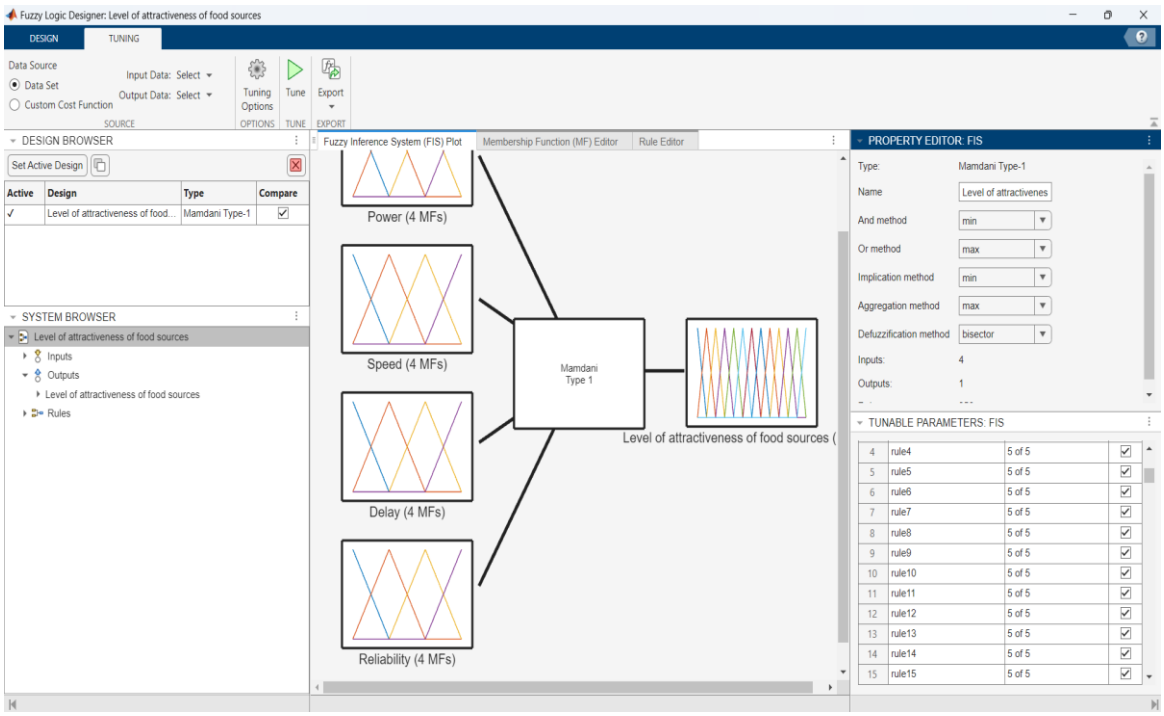


Рис. 4.5 Вигляд функцій належності вхідних даних для оцінки методу маршрутизації в програмному середовищі *MatLab* 2024 (пакет розширення *Fuzzy Logic Toolbox*)

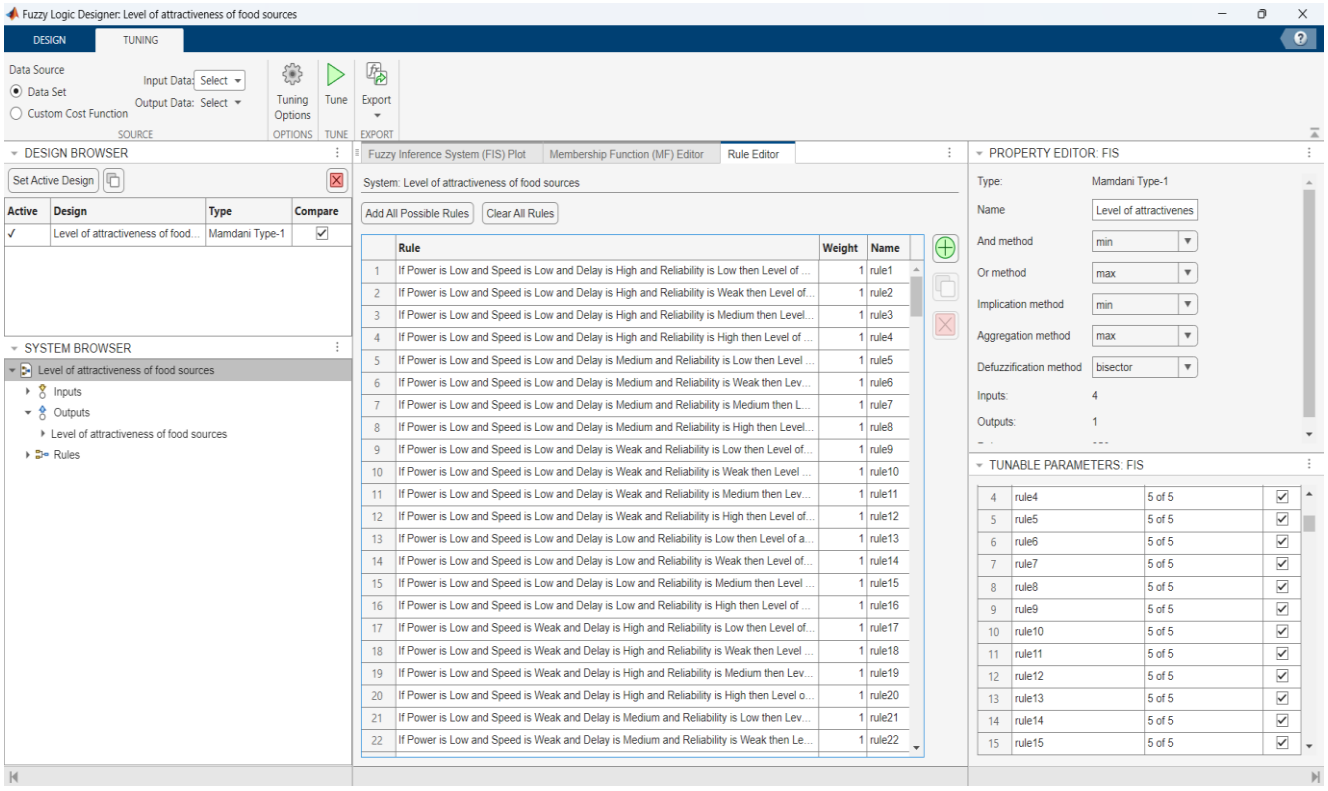


Рис. 4.6 Вигляд правил для побудови функцій належності вхідних даних для оцінки методу маршрутизації в програмному середовищі *MatLab*

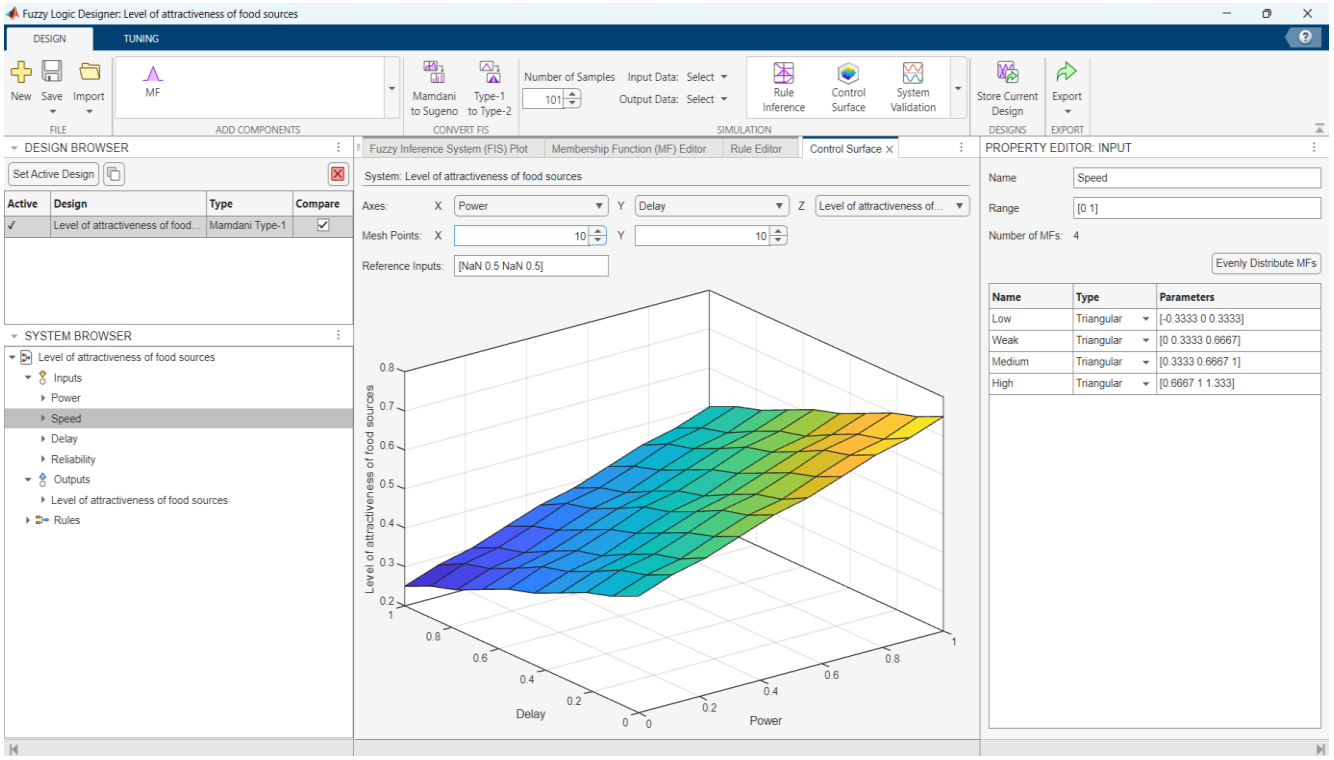


Рис. 4.7 Залежність рівня заряду від часу затримки та рівня привабливості джерел харчування для оцінки методу маршрутизації

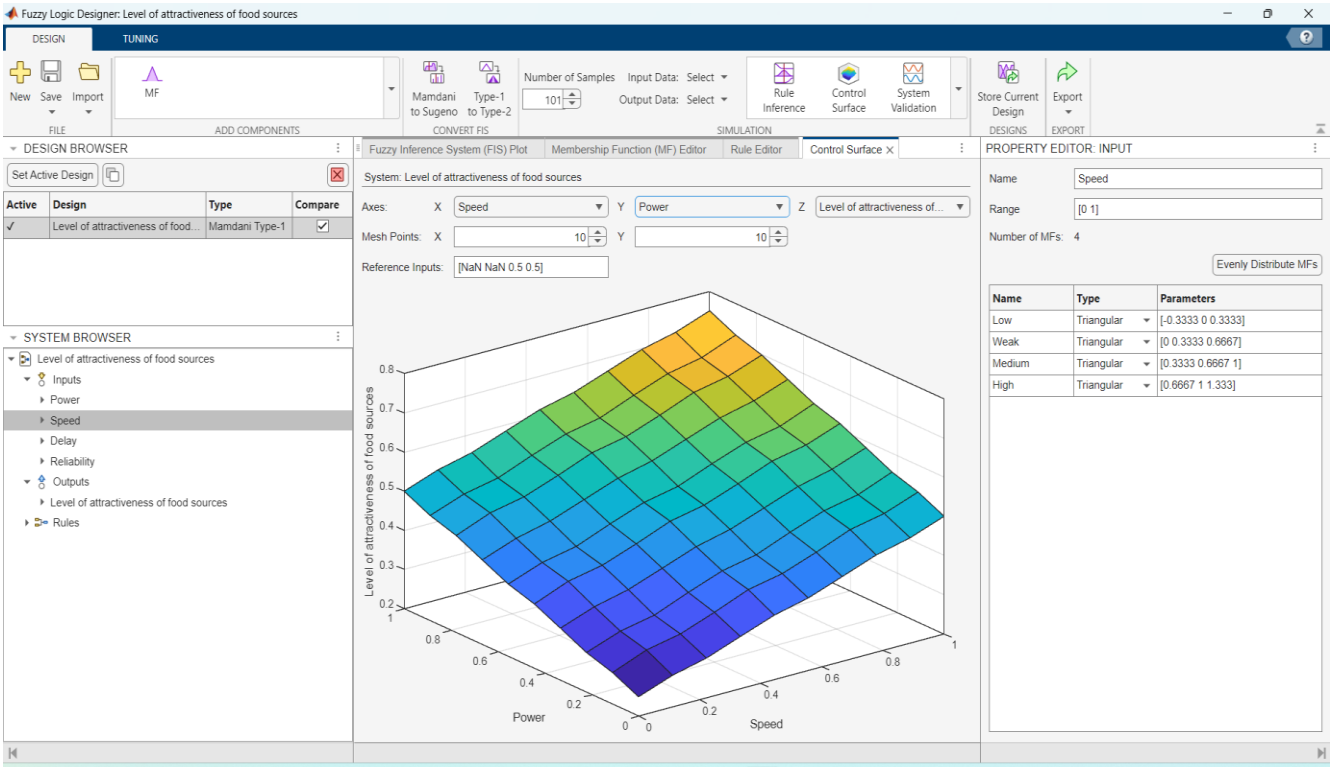


Рис. 4.8 Залежність швидкості передачі від заряду батареї та рівня привабливості джерел харчування для оцінки методу маршрутизації

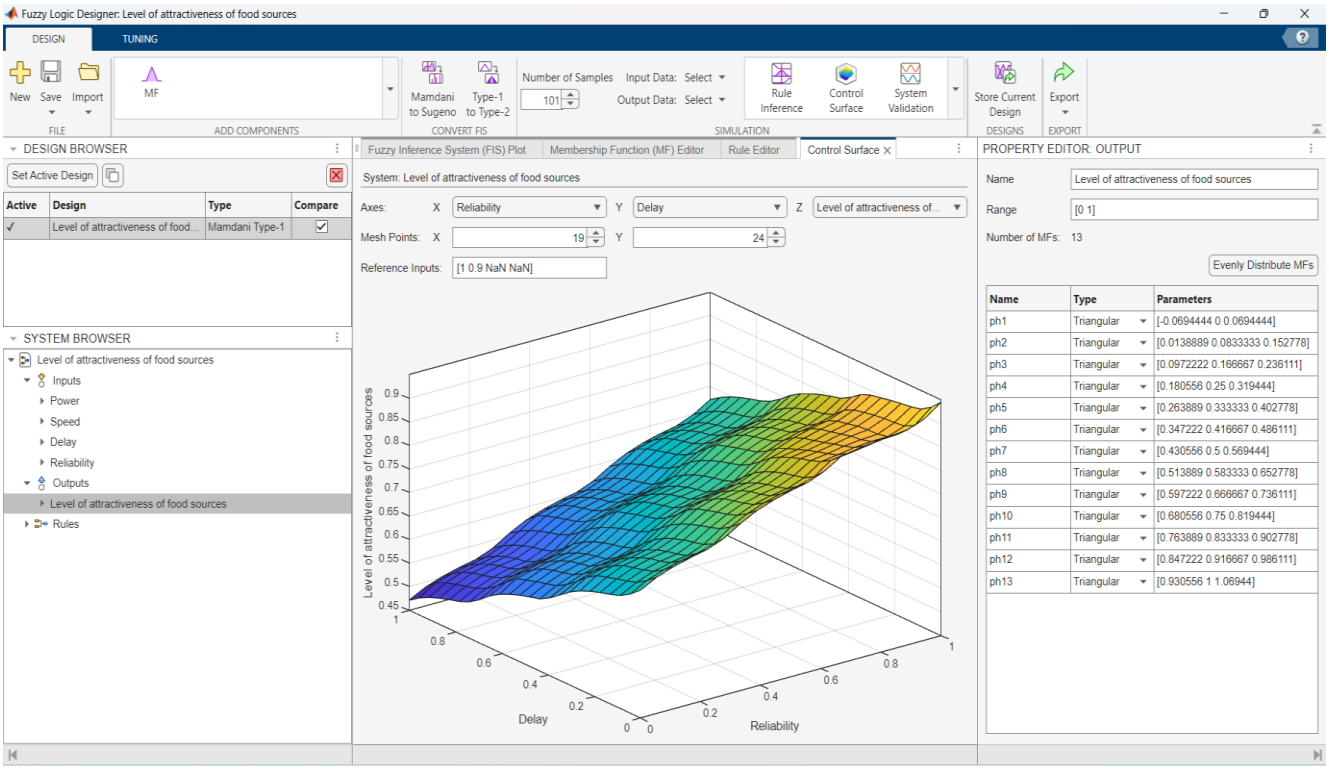


Рис. 4.9 Залежність надійності від затримки та рівня привабливості джерел харчування для оцінки методу маршрутизації

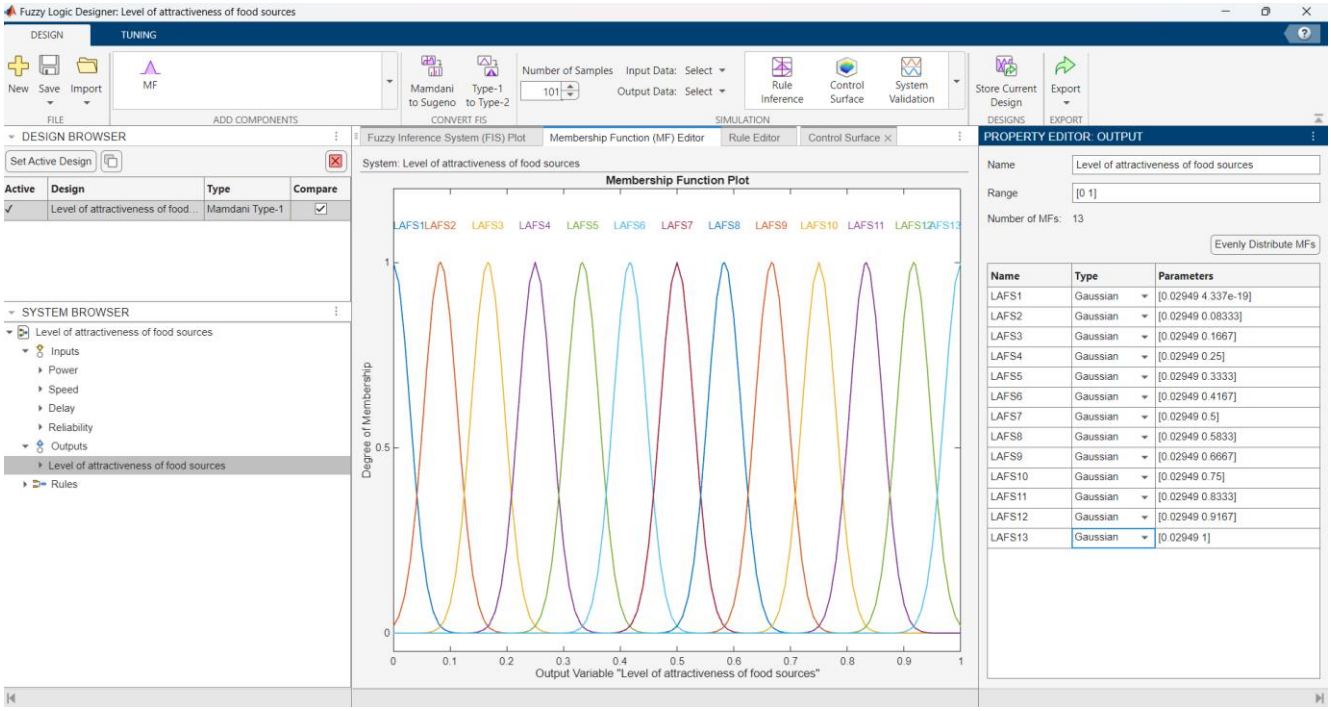


Рис. 4.10 Зовнішній вигляд вихідних даних (функції належності рівня привабливості джерел харчування) для оцінки методу маршрутизації

Проведений аналіз відомих методів маршрутизації показав, що серед усіх розглянутих підходів лише розроблений метод повною мірою відповідає встановленим вимогам *{Bq}* до методів маршрутизації в інформаційних мережах.

У цілому, використання запропонованого методу дозволяє досягти суттєвого підвищення ефективності функціонування мережі. Зокрема, результати моделювання свідчать, що:

– пропускна здатність мережі збільшується на 12–20 %;

– час затримки передачі пакетів скорочується в середньому на 20–25 %;

– оперативність встановлення маршрутів підвищується на 14–19 %.

Отримані результати підтверджують, що розроблений метод забезпечує системну оптимізацію процесів маршрутизації, гарантує передачу інформації з необхідною якістю обслуговування *(QoS)* та підвищує загальну стійкість і швидкодію інформаційних мереж, особливо в умовах динамічної зміни їхньої топології.

4.3. Оцінка ефективності методу самоорганізації інформаційних мереж в умовах дестабілізуючих впливів.

Оцінювання ефективності розробленого методу самоорганізації інформаційних мереж в умовах дестабілізуючих впливів здійснювалося в умовах, максимально наближених до реальних, із врахуванням апаратних і функціональних обмежень вузлів системи. Вихідні умови моделювання: усі елементи інформаційної мережі підтримують єдині протоколи інформаційного обміну; вузли мають обмежену дальність радіозв'язку та швидкість обміну даними; кожен вузол функціонує автономно, але взаємодіє з іншими елементами мережі в межах кооперативної системи управління; усі пристрої оснащено інерціальною навігаційною системою *(INS),* приймачем *GPS*-сигналів, а також антенною системою *MIMO* 8×8, що забезпечує просторове кодування.

Основні технічні параметри антен *MIMO* вузлів мережі: вихідна потужність передавача: 8–20 Вт; коефіцієнт підсилення сигналу: 6–9 дБ з функцією *EIRP (Effective Isotropic Radiated Power);* швидкість передавання даних: до 100 Мбіт/с. Характеристики наземних абонентів: тип антени: 2×2 *MIMO;* вихідна потужність передавача: 1 мВт – 1 Вт (до 5 Вт у режимі *TX Beamforming);* смуга пропускання: 1,25 / 2,5 / 5 / 20 МГц; швидкість передачі даних: до 40 Мбіт/с; робочі частоти: 1350–1440 МГц, 2200–2500 МГц, 4400–4940 МГц.

Для забезпечення адаптивності процесів самоорганізації на мережевому рівні використано вдосконалений протокол маршрутизації на основі *DSR* [16], який модифіковано з урахуванням особливостей функціонування вузлів комбінованої зграї.

Основні характеристики антенних систем *MIMO* – мобільних базових станцій, мобільних користувачів та вузлових елементів повітряної мережі – узагальнено в таблиці 4.2 де:

P_{out} – вихідна потужність, яку випромінює антена, Вт;

G – коефіцієнт підсилення, дБ;

η – ККД, який є відношенням потужності, що випромінює антена, до потужності, яка подається на антену, %;

P – вид поляризації, яка є орієнтацією векторе електричного поля електромагнітної хвилі, яку випромінює антена;

D – коефіцієнт направленої дії, дБ;

B – ширина променю діаграми направленості B , що є кутовою шириною основного пелюстка діаграми направленості антени, (°).

Табл. 4.2

Параметри антени *MIMO* відповідно до типу вузла інформаційної мережі

Тип вузла	P_{out}, W	G, дБ	η, %	P	D, дБ	B, (°)
Мобільний користувач	0,1–1	0–10	50–90	Лінійна	0–10	15–30
Мобільна базова станція	0,5–5	10–20	70–95	Кругова	10–20	30–60
Комунікаційна аероплатформа (БпЛА)	1–10	20–30	80–98	Еліптична	20–30	60–120

Мобільність вузлів у процесі імітаційного моделювання відтворювалася з використанням запропонованої моделі мобільності [68–70], побудованої на основі алгоритму градієнтного спуску з *моментумом (Gradient Descent with Momentum).* Цей підхід є розширенням класичного градієнтного спуску та дозволяє зменшити інерційність руху вузлів, підвищити стабільність траєкторій і прискорити збіжність до цільових координат, що забезпечує реалістичність відтворення динаміки руху елементів мережі в просторі. На відміну від традиційних стохастичних моделей використання алгоритму з моментумом дозволяє враховувати інерцію руху, математичне моделювання моделювання, попередні напрями переміщення та гальмування вузлів у місцях з підвищеною щільністю комунікацій. Характеристики мобільності вузлів змінюються залежно від типу носія комунікаційного обладнання і наведені у таблиці 4.3, де подано діапазони швидкостей, прискорень, часу пауз та напрямків руху для кожного типу вузлів.

.

Табл.4.3

Характеристики мобільності вузлів інформаційної мережі

Тип вузла	Мінімальна швидкість, м/с	Максимальна швидкість, м/с	Прискорення, м/с^2	Час паузи, чи зависання, с
Мобільна базова станція	0	10	0,5	10–20
Мобільний користувач	0	2	1	5–15
Комунікаційна аероплатформа	10	45	1,5	5–10

Енергія вузла буде характеризуватися такими параметрами: початкова енергія; потужність передачі; потужність прийому; витрата потужності в режимі очікування. Параметри енергії вузла змінюються залежно від типу вузла, як видно з таблиці 4.4.

Табл.4.4

Енергетичні параметри комунікаційних вузлів

Тип вузла	Початкова енергія, Дж	Потужність передачі, Вт	Потужність прийому, Вт	Потужність в режимі очікування, Вт
Мобільний користувач	1000	0,1–1	0,05	0,01
Мобільна базова станція	2000	0,5–5	0,1	0,02
Комунікаційна аероплатформа (БпЛА)	3000	1–10	0,2	0,04

Радіодоступність вузла моделюється за допомогою логнормальної моделі затінення [80–90] *(Lognormal Shadowing Model),* яка є однією з найпоширеніших для опису умов розповсюдження радіосигналів у бездротових мережах. Ця модель враховує випадкові коливання потужності сигналу, спричинені затіненням різними перешкодами в середовищі поширення. Радіодоступність вузла визначається такими параметрами: дальність передачі –

характеризує типову відстань, на якій можлива стійка передача сигналу між мобільним користувачем, базовою станцією або іншим вузлом мережі. Для мобільного користувача цей діапазон становить від 100 до 400 м; експоненціальна втрата шляху – описує швидкість зменшення потужності сигналу зі збільшенням відстані. Чим більше значення показника загасання, тим швидше слабшає сигнал при віддаленні від передавача; відхилення затінення – показує стандартне відхилення втрат сигналу, викликаних впливом перешкод, коефіцієнт спрямованості – відображає здатність антени концентрувати енергію випромінювання у певному напрямку.

Підвищення стабільності роботи мережі свідчить про покращення показників інформаційної безпеки.

Параметри радіодоступності вузла змінюються в залежності від типу вузла та характеристик каналу зв'язку, що наведено в таблиці 4.5.

Трафік у вузлах моделюється з використанням моделі постійної бітової швидкості *(Constant Bit Rate, CBR)* [85], яка формує стабільний потік періодичних пакетів даних, що забезпечує сталість навантаження в процесі моделювання.

Табл. 4.5

Параметри радіодоступності комунікаційних вузлів інформаційної мережі

Тип вузла	Дальність передачі, м	Експонента втрати шляху	Відхилення затінення, дБ	Коефіцієнт спрямованості
Мобільний користувач	100–400	3	6	2
Мобільна базова станція	400–800	3,5	8	4
Комунікаційна аероплатформа	800–1600	4	10	8

У якості протоколу канального доступу вузла використовується *IEEE 802.11,* який належить до стандартів безпроводових локальних мереж і забезпечує організацію обміну даними між вузлами в межах радіодоступу. Протокол визначається такими основними параметрами: пропускна здатність

каналу; метод модуляції; швидкість кодування; поріг чутливості – визначає мінімальний рівень сигналу.

Параметри протоколу канального доступу залежать від типу вузла та типу зв'язку, який використовується, і наведені в таблиці 4.6.

Табл.4.6

Сигнальні параметри комунікаційних вузлів інформаційної мережі

Тип вузла	Смуга пропускання каналу, МГц	Метод модуляції	Швидкість кодування	Поріг чутливості, дБм
Мобільний користувач	1,25; 2,5; 5	*BPSK, QPSK, 16-QAM*	1/2, 2/3, 3/4	-82, -79, -77
Базова станція	5, 10 ,20	*QPSK, 16-QAM, 64-QAM*	1/2, 2/3, 3/4	-77, -74, -72
БпЛА	10, 20 ,40	*16-QAM, 64-QAM, 256-QAM*	1/2, 2/3, 3/4	-72, -69, -66

Завдання що вирішувалося при проведенні порівняння – визначення раціональної топології інформаційної мережі та множини маршрутів передачі (табл. 4.7–4.9).

Табл 4.7

Ефективність алгоритмів оптимізації при вирішенні топології інформаційної мережі та множини маршрутів передачі

Назва алгоритму	T_s	Оптимальні змінні		L	Оптимальна вартість
		T_h	R		
Алгоритм популяційної оптимізації	0.7280271	0.3845792	40.312284	200	5882.8955
Метод ройової оптимізації	0.7480269	0.3845797	40.312282	200	5882.9013
Алгоритм популяційного пошуку з динамічними стрибками	0.7690308	0.384581	40.312476	199.99732	5882.9077
Метод колоніальної оптимізації	1.1950157	0.64038	60.549321	48.031984	7759.8234
Алгоритм мурашиної оптимізації	0.7780271	0.3845792	40.312284	200	5882.9013
Запропонований метод самоорганізації	0.7794994	0.385819	40.386517	200	5909.3749
Алгоритм популяційного пошуку з ієрархією агентів	0.911517	0.4510723	46.230782	133.83941	6270.8621
Алгоритм колективного пошуку з агресивною стратегією	0.8344267	0.4164052	43.217775	163.90679	6003.8497
Алгоритм масової популяційної динаміки	0.7784599	0.3858127	40.320627	199.96442	5890.2105
Генетичний алгоритм	1.5622593	0.4813024	47.695987	124.64823	10,807.366
Алгоритм популяційної оптимізації з локальним та глобальним пошуком	1.1300127	1.1576349	44.110061	190.7876	11,984.417
Алгоритм інвазивної популяційної оптимізації	1.55006	0.6231249	63.139483	49.78495	9998.6395
Алгоритм світлової привабливості агентів	1.406417	0.7832762	58.253368	73.964478	10,920.286

Табл. 4.8

Статистичні результати при вирішення топології інформаційної мережі та множини маршрутів передачі

Назва алгоритму	Середнє	Найкраще	Найгірше	Стандартне	Медіанне	Ранг
Алгоритм популяційної оптимізації	5882.8955	5882.8955	5882.8955	1.87E-12	5882.8955	1
Метод ройової оптимізації	5891.226	5882.9013	5965.0365	22.218932	5882.9017	3
Алгоритм популяційного пошуку з динамічними стрибками	6219.5386	5882.9077	7046.3206	352.35848	6047.6955	5
Метод колоніальної оптимізації	12,409.586	7759.8234	19,991.769	3127.065	11,403.338	9
Алгоритм мурашиної оптимізації	5882.9013	5882.9013	5882.9013	3.68E-06	5882.9013	2
Запропонований метод самоорганізації	6271.132	5909.3749	6948.3792	333.1584	6143.6153	6
Алгоритм популяційного пошуку з ієрархією агентів	7998.6372	6270.8621	12,805.388	1681.8974	7579.6333	8
Алгоритм колективного пошуку з агресивною стратегією	6518.1019	6003.8497	7050.4059	320.31898	6572.19	7
Алгоритм масової популяційної динаміки	6012.3675	5890.2105	6670.9945	239.38549	5898.5494	4
Генетичний алгоритм	28,273.334	10,807.366	60,311.64	13,795.65	24,975.491	12
Алгоритм популяційної оптимізації з локальним та глобальним пошуком	25,427.766	10,920.286	45,530.922	10,828.815	22,551.255	11

Табл. 4.9

Ефективність алгоритмів оптимізації при вирішення топології інформаційної мережі та множини маршрутів передачі

Назва алгоритму	*h*	Оптимальні змінні		*b*	Оптимальна вартість
		l	*t*		
Алгоритм популяційної оптимізації	0.2057296	3.4704887	9.0366239	0.2057296	1.7246798
Метод ройової оптимізації	0.2057296	3.4704888	9.0366238	0.2057296	1.7248523
Алгоритм популяційного пошуку з динамічними стрибками	0.205056	3.4850976	9.0365299	0.2057339	1.7257923
Метод колоніальної оптимізації	0.1977725	3.5270192	9.8188942	0.2163579	1.9455461
Алгоритм мурашиної оптимізації	0.2057296	3.4704887	9.0366239	0.2057296	1.7248523
Запропонований метод самоорганізації	0.2043787	3.4924081	9.0609	0.2061055	1.7327713
Алгоритм популяційного пошуку з ієрархією агентів	0.2127738	3.3465331	8.9813136	0.2191754	1.8098061
Алгоритм колективного пошуку з агресивною стратегією	0.2059617	3.465488	9.0437236	0.2060167	1.7279454
Алгоритм масової популяційної динаміки	0.2056085	3.4732685	9.0362859	0.2057905	1.7254435
Генетичний алгоритм	0.3021777	4.3080233	7.0649912	0.3989007	2.86852
Алгоритм популяційної оптимізації з локальним та глобальним пошуком	0.2220901	6.5032092	7.9154768	0.2925869	2.6371953

Як видно з табл. 4.7−4.9 підвищення оперативності прийняття рішень досягається на рівня 12−17 % за рахунок використання додаткових процедур.

Висновки до розділу 4

Проведено оцінку ефективності запропонованих у дослідженні наукових результатів, а саме методу маршрутизації в інформаційних мережах і методу самоорганізації інформаційних мереж, із використанням імітаційного моделювання. Особливістю застосованої моделі є використання системи нейро-нечіткого виводу, реалізованої засобами *MATLAB + Simulink,* що дозволило імітувати процес прийняття рішень у задачах самоорганізації інформаційних мереж з урахуванням їх динаміки та впливу зовнішніх факторів. Ефективність розробленого методу самоорганізації інформаційних мереж оцінювалася шляхом порівняння його з існуючими підходами за критеріями обчислювальної складності та пропускної здатності мережі.

Отримані результати дозволили сформулювати наступний висновок.

Підвищення оперативності прийняття рішень у процесі самоорганізації інформаційних мереж забезпечується завдяки:

– навчанню не лише синаптичних ваг штучної нейронної мережі, але й виду та параметрів функцій належності;

– адаптивному навчанню архітектури нейронних мереж з урахуванням поточного стану мережі;

– використанню зворотного маршруту, який формується під час пошуку шляху до вузла призначення, що дозволяє скоротити час на повторний пошук і зменшити затримки при двонаправлених з’єднаннях;

– застосуванню модифікованого алгоритму зграї котів для оптимізації процесу вибору маршруту.

Показано, що оперативність самоорганізації інформаційної мережі визначається часом адаптації до дестабілізуючих впливів, який кількісно оцінюється через середній час затримки передачі повідомлень та час доступу до

радіоканалу. Запропонований метод забезпечує зменшення зазначених показників порівняно з відомими підходами, що підтверджує досягнення поставленої мети дослідження.

Застосування розробленого методу самоорганізації інформаційних мереж дозволяє зменшити обсяг службового трафіка в середньому на 15–18%, підвищити пропускну здатність на 12–20%, а також збільшити оперативність прийняття рішень на рівні 12–17% завдяки впровадженню додаткових адаптивних процедур і механізмів навчання.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено наукове завдання підвищення оперативності функціонування інформаційних мереж в умовах дестабілізуючих впливів за рахунок розробки інтелектуальних методів маршрутизації та самоорганізації, які враховують динаміку мережі, наявність невизначеностей і обмеженість обчислювальних ресурсів.

Аналіз сучасного стану та перспектив розвитку інформаційних мереж виконано шляхом узагальнення існуючих підходів до маршрутизації та самоорганізації в умовах динамічної топології та зашумленого радіоканалу. Це дозволило виявити обмеження відомих методів, пов’язані з низькою оперативністю адаптації та зростанням службового трафіку при дестабілізуючих впливах.

На основі проведеного аналізу розроблено комплексну модель функціонування інформаційних мереж, яка дозволяє формалізувати стан мережі з урахуванням ключових параметрів її роботи та дестабілізуючих впливів. Запропонована модель забезпечує перехід від окремих характеристик функціонування мережі до узагальненої оцінки її стану та створює математичне підґрунтя для прийняття керуючих рішень.

У межах дослідження удосконалено метод маршрутизації інформаційних потоків між вузлами інформаційної мережі, що дозволяє адаптивно обирати маршрути передачі даних залежно від поточного стану мережі та умов її функціонування. Запропоновані рішення сприяють підвищенню пропускної здатності та зменшенню втрат при зміні топології та зростанні рівня завад.

Розроблено метод самоорганізації інформаційних мереж в умовах дестабілізуючих впливів, який забезпечує децентралізовану перебудову параметрів і структури мережі без централізованого керування. Метод орієнтований на підвищення оперативності адаптації мережі до змін умов функціонування та підвищення стабільності її роботи.

Оперативність самоорганізації оцінювалася через часові характеристики функціонування мережі, зокрема середній час затримки передавання повідомлень і час доступу до радіоканалу.

Ефективність запропонованого методу підтверджено шляхом імітаційного моделювання, у межах якого проведено порівняльний аналіз із базовими методами маршрутизації.

Наукова новизна дослідження полягає у підвищенні оперативності процесу самоорганізації інформаційних мереж в умовах впливу дестабілізуючих факторів.

Наукові результати базуються на таких основних положеннях:

1) запропоновано комплексну модель функціонування інформаційних мереж. Переваги зазначеної моделі обумовлені врахуванням більшої кількості дестабілізуючих факторів, у порівнянні з відомими, для моделювання процесу самоорганізації інформаційних мереж. Модель враховує у комплексі навмисні завади адитивного та мультиплікативного характеру, дестабілізуючі фактори, що обумовлені наявністю кібератак;

2) розроблено метод самоорганізації інформаційних мереж в умовах дестабілізуючих впливів. В запропонованому методі враховується тип невизначеності та зашумленості даних, реалізовуються адаптивні стратегії самоорганізації; враховуються наявні обчислювальні ресурси системи при здійсненні самоорганізації інформаційних мереж та ін;

2) удосконалено метод маршрутизації в інформаційних мережах, що дозволяє підвищити оперативність самоорганізації інформаційних мереж, за рахунок вибору маршруту передачі інформації від вузла відправника до вузла отримувача. В основу запропонованого методу покладено алгоритм «котячої зграї». В запропонованому методі враховується тип невизначеності та зашумленості даних, реалізовуються адаптивні стратегії самоорганізації; враховуються наявні обчислювальні ресурси системи при здійсненні самоорганізації інформаційних мереж та ін;

Подальшого розвитку набули підходи до оцінювання стану інформаційних мереж в умовах дестабілізуючих впливів за рахунок урахування зашумленості даних і динамічної зміни топології, що реалізовано на основі комплексної математичної моделі функціонування мережі. Запропонована модель забезпечує узгоджений аналіз сукупності показників ефективності в процесі самоорганізації та дозволяє оцінювати оперативність і стійкість роботи мережі в умовах змінного середовища. У межах дослідження також удосконалено методи адаптивної маршрутизації, орієнтовані на підвищення пропускної здатності та стабільності функціонування мережі без використання централізованого керування, що підтверджено результатами імітаційного моделювання. Розроблений підхід до імітаційного моделювання процесів самоорганізації забезпечує кількісну оцінку впливу дестабілізуючих чинників на часові та якісні характеристики передавання даних.

Результати дослідження можуть бути використані промисловими і науково-дослідними організаціями для проєктування та розробки прийомопередавачів інформаційних мереж, а також систем управління ними, під час створення інформаційних мереж, що самоорганізовуються. У дисертаційній роботі розв’язано актуальну науково-прикладну задачу забезпечення інформаційної безпеки інформаційних мереж в умовах дестабілізуючих впливів.

Сукупність отриманих в дисертації теоретичних та практичних результатів дозволяє зробити висновок про те, що поставлена мета дослідження щодо підвищення оперативності самоорганізації інформаційних мереж – досягнута.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Гаркуша С. В. Огляд та класифікація протоколів маршрутизації в mesh-мережах стандарту *IEEE* 802.11 / С. В. Гаркуша. // Збірник наукових праць ВІТІ НТУУ „КПІ”. – 2012. – №1. – С. 14–28.

2. *RAMSES: A new reference architecture for self-adaptive middleware in Wireless Sensor Networks / Jesús M.T.Portocarrero, Flavia C. Delicato, Paulo F. Pires Bruno Costa, Wei Li, Weisheng Si, Albert Y. Zomaya // Ad Hoc Networks.* – 2017. – *Volume* 55. – С. 3–27. DOI: 10.1016/j.adhoc.2016.11.004.

3. *Report Concerning Space Data System Standards. Wireless Network Communications Overview For Space Mission Operations. Informational Report Ccsds 880.0-G-3 – Washington, DC, USA: National Aeronautics and Space Administration, May* 2017. – 185 с. – *(Consultative Committee for Space Data Systems).*

4. *Evolution Towards 5G Multi-tier Cellular Wireless Networks: An Interference Management Perspective / E.Hossain, M. Rasti, H. Tabassum, A. Abdelnasser. // IEEE 802.11 Wireless Communications. Volume* 21, *Issue* 3. – *June* 2014. – С. 118 – 127. DOI: 10.1109/MWC.2014.6845056.

5. *Siva Ram Murthy C. Hoc wireless networks: architectures and protocols / C. Siva Ram Murthy, B. S. Manoj. – New Jersey: Prentice Hall Professional Technical Reference,* 2004. – 814 с. – (ISBN 0-13-147023-X).

6. *Quality of service provisioning in ad hoc wireless networks: a survey of issues and solutions / T. Bheemarjuna Reddy, I. Karthigeyan, B. S. Manoj, C. Siva Ram Murthy. // Ad Hoc Networks Volume* 4. *Issue* 1. – 2006. – С. 83–124. DOI: 10.1016/j.adhoc.2004.04.008.

7. *Rajabhushanam C. Survey of Wireless MANET Application in Battlefield Operations / C. Rajabhushanam, A. Kathirvel. // International Journal of Advanced Computer Sciences and Applications. Volume* 2 *– January* 2011. – №1. – С. 50–58.

8. *Mobile Ad-Hoc Networks Applications and Its Challenges / N. Raza, M. Qasim Akbar, O. Ashraf, M. Irfan. // Communications and Network. Volume 8.* – 2016. – №3. – С. 131–136. DOI: 10.4236/cn.2016.83013.

9. *Location-Based Routing Protocols for Wireless Sensor Networks: A Survey / A. Kumar, H. Y. Shwe, K. J. Wong, P. H. J. Chong. // Wireless Sensor Network. Volume* 9 – 2017. – С. 25–72. DOI: 10.4236/wsn.2017.91003.

10. *Sarangapani J. Wireless Ad Hoc and Sensor Networks Protocols Perfomance and Control / Jagannathan Sarangapani. – Boca Raton: CRC Press,* 2007. – 515 с. – (13: 978-0-8247-2675-1).

11. *Coll-Perales B. Context-Based Opportunistic Forwarding in Multi-hop Cellular Networks using Mobile Relays / B. Coll-Perales, J. Gozalvez, V. Friderikos. // HP-MOSys '13: Proceedings of the 2nd ACM workshop on High performance mobile opportunistic systems.* – 2013. – С. 23–30. DOI: 10.1145/2507908.2507914.

12. *Poularakis K. SDN-enabled Tactical Ad Hoc Networks: Extending Programmable Control to the Edge / K. Poularakis, G. Iosifidis, L. Tassiulas. //* 802.11 *Communications Magazine. Volume* 56. – *July* 2018. – №7. – С. 132–138. DOI: 10.1109/MCOM.2018.1700387.

13. *A connectivity-aware intersection-based routing in VANETs / C.Chen, Y. Jin, Q. Pei, N. Zhang. // EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking.* – 2014. – №42(2014). – С. 1–16. DOI: 10.1186/1687-1499-2014-42.

14. *Md Shahzamal, Lightweight Mobile Ad-hoc Network Routing Protocols for Smartphones, Networking and Internet Architecture (cs.NI). Multiagent Systems (cs.MA). / Md Shahzamal: arXiv:1804.02139 [cs.NI], Cornell University,* 6 *Apr* 2018 // Електронна бібліотека *Cornell University Library URI: https://arxiv.org.*

15. *Machine to Machine (M2M) Communications in Virtualized Vehicular Ad Hoc Networks / M.Li, F. R. Yu, P. Si, E. Sun, Y. Zhang. // arXiv preprint arXiv:*1611.04017. – 2016. – С. 1–8. DOI: 10.1145/1235.

16. *Torrieri D. Performance Comparisons of Geographic Routing Protocols in Mobile Ad Hoc Networks / D. Torrieri, S. Talarico, M. C. Valenti. //* IEEE

802.11*Transactions on Communications.* – 2015. – №63(11). – С. 4276–4286. DOI: 10.1109/TCOMM.2015.2477337.

17. *Patrick C. Addressing wireless challenges / Patrick Cairns: net.work. March 2008. URL: http://www.netdotwork.co.za/article.aspx?pklarticleid=5044.*

18. *Praveen Kumar Rao K. A Survey on IEEE 802.11Standards for Mobile Ad Hoc Networks / K. Praveen Kumar Rao, D. K. Kalaiarasi. // IOSR Journal of Engineering (IOSRJEN), Volume* 05. – 2015. – №2. – С. 55–64.

19. *Johnson D. B. DSR: The Dynamic Source Routing Protocol for Multi-Hop Wireless Ad Hoc Networks / D. B. Johnson, D. Maltz, J. Broch. // Ad Hoc Networking*. – 2001. – С. 1–25.

20. *Gozalvez J. Experimental evaluation of multihop cellular networks using mobile relays / J. Gozalvez, B. Coll-Perales. // IEEE Communications Magazine, Volume:* 51. – *July* 2013. – №7. – С. 122–129. DOI: 10.1109/MCOM.2013.6553688.

21. *Moltchanov D. Routing protocols for ad hoc networks / Moltchanov D.: Ad hoc networks, TUT,* 2009 // Фахове інтернет видання URL: http://www.cs.tut.fi/kurssit/TLT-2756/.

22. *T. Bheemarjuna Reddy Quality of service provisioning in ad hoc wireless networks: a survey of issues and solutions / T. Bheemarjuna Reddy, I. Karthigeyan, B.S. Manoj, C. Siva Ram Murthy: Volume* 4, *Issue* 1, *January* 2006, *Ad Hoc Networks, pp.* 83-124, // Фахове видання URL: https://www.iith.ac.in/~tbr/journals/6.pdf.

23. *Noman Islam A study of research trends and issues in wireless ad hoc networks / Noman Islam, Zubair A. Shaikh: Networking and Internet Architecture (cs.NI). ArXiv:*1711.08405 *[cs.NI]. Cornell University.* 1 *Nov* 2017. // Електронна бібліотека *Cornell University Library URI: https://arxiv.org.*

24. *Trung Kien Vu On-Demand Routing Algorithm with Mobility Prediction in the Mobile Ad-hoc Networks / Trung Kien Vu, Sungoh Kwon: School of Electrical Engineering University of Ulsan Ulsan. Korea. arXiv:*1609.08141v1 *[cs.NI]. Cornell University.* 26 *Sep* 2016. // Електронна бібліотека Cornell University Library URI: https://arxiv.org.

25. *Hayder Mohammed Ali Simulation and analysis of vehicular ad-hoc networks in urban and rural areas / Hayder Mohammed Ali: Master's thesis for the degree of Master of Science in Technology submitted for inspection, Vaasa, 20th of December,* 2013.

26. *S. Mohapatraa Performance analysis of AODV, DSR, OLSR and DSDV Routing Protocols using NS2 Simulator / S. Mohapatraa, P. Kanungo: Procedia Engineering* 30, 2012, С 69–76.

27. Налапко О. Л. *Analysis of technical characteristics of the network with possibility to self-organization* / О. Л. Налапко, А. В. Шишацький. // Сучасні інформаційні системи. – Харків, 2018. – №4, Том 2. – С. 78–86.

28. *Fan Bai. A SURVEY OF MOBILITY MODELS Chapter 1/ Fan Bai, Ahmed Helmy // Wireless Adhoc Networks, University of Southern California, U.S.A,* 2004.

29. *Mohammed, B. A., Zhuk, O., Vozniak, R., Borysov, I., Petrozhalko, V., Davydov, I., Borysov, O., Yefymenko, O., Protas, N., & Kashkevich, S. Improvement of the solution search method based on the cuckoo algorithm. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies.* 2023, *Vol.* 2, *No.* 4 (122), *pp.* 23–30. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.277608

30. *Mamoori, G. A., Sova, O., Zhuk, O., Repilo, I., Melnyk, B., Sus, S., Bondarchuk, M., Kashkevich, S., Moroz, M., & Klyuchak, O. The development of solution search method using improved jumping frog algorithm. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies.* 2023, *Vol.* 4, *No.* 3 (124), *pp.* 45–53. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.285292

31. *Shyshatskyi, A., Romanov, O., Shknai, O., Babenko, V., Koshlan, O., Pluhina, T., Biletska, A., Stasiuk, T., & Kashkevich, S. Development of a solution search method using the improved emperor penguin algorithm. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies.* 2023, *Vol.* 6, *No.* 4 (126), *pp.* 6–13. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.291008

32. *Tamer, K. A., Sova, O., Shaposhnikova, O., Yashchenok, V., Stanovska, I., Shostak, S., Rudenko, O., Petruk, S., Matsyi, O., & Kashkevich, S. Development of a*

solution search method using a combined bio-inspired algorithm. EasternEuropean Journal of Enterprise Technologies. 2024, *Vol.* 1, *No*. 4 (127), pp. 6–13. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.298205

33. Шишацький А. В., Жук О. В., Неронов С.М., Протас Н. М., Кашкевич С. О. Сукупність методик підвищення оперативності прийняття рішень з використанням метаевристичних алгоритмів. Монографія. С91 *Moderní aspekty vědy: XL. Díl mezinárodní kolektivní monografie / Mezinárodní Ekonomický Institut s.r.o. Česká republika: Mezinárodní Ekonomický Institut s.r.o.,* 2024. pp. 529 – 557. URL: http://perspectives.pp.ua/public/site/mono/mono-40.pdf.

34. Шишацький А. В., Маций О. Б., Ященок В. Ж., Троцько О. О. Кашкевич С. О. Сукупність методик підвищення оперативності прийняття рішень з використанням комбінованих метаевристичних алгоритмів. Монографія. С91 *Moderní aspekty vědy: XL. Díl mezinárodní kolektivní monografie / Mezinárodní Ekonomický Institut s.r.o.. Česká republika: Mezinárodní Ekonomický Institut s.r.o.,* 2024. pp. 558 – 594. URL: http://perspectives.pp.ua/public/site/mono/mono-40.pdf.

35. *Kashkevich, S., Dmytriieva, O., Trotsko, O., Shknai, O., Shyshatskyi, A.. Mathematical model of information conflict of information networks. ScienceRise,* 2024, No. 1, pp. 3–13. doi: http://doi.org/10.21303/2313-8416.2024.003395.

36. Кашкевич С. О., Дмитрієва О. І., Єфименко О. В., Плєхова Г.А., Шишацький А. В. Методи оцінки стану складних динамічних об’єктівз використанням біоінспірованих алгоритмів. С91 *Moderní aspekty vědy: XLIV. Díl mezinárodní kolektivní monografie / Mezinárodní Ekonomický Institut s.r.o.. Česká republika: Mezinárodní Ekonomický Institut s.r.o.,* 2024. С.138–177. https://doi.org/10.52058/44-2024.

37. Кашкевич С. О., Дмитрієва О. І., Троцько О.О., Шкнай О. В., Шишацький А. В. Метод самоорганізації інформаційних мереж в умовах дестабілізуючих впливів. *The development of technical, agricultural and applied sciences as the main factor in improving life: collective monograph / Trembitska O., Zhuravel S., Stoliar S., Bilotserkivska L. – etc. – International Science Group. –*

Boston : Primedia eLaunch, 2024. С. 192–218. DOI – 10.46299/ISG.2024.MONO.TECH.210.

38. *Shyshatskyi, A., Dmytriieva, O., Lytvynenko, O., Borysov, I., Vakulenko, Y., Mukashev, T., Mordovtsev, O.,Kashkevich, S., Lyashenko, A., Velychko, V. Development of a method for assessing the state of dynamic objects using a combined swarm algorithm. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies,* 2024, Vol. 3, No. 4 (129), pp. 44–54. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.304131

39. *Svitlana Kashkevich, Olexander Litvinenko, Andrii Shyshatskyi, Serhii Salnyk, Vira Velychko. The method of self-organization of information networksin the conditions of the complex influence of destabilizing factors.* Сучасні інформаційні системи. 2024. Т. 8, № 3. С. 59–79. doi: https://doi.org/10.20998/2522-9052.2024.3.07.

40. Кашкевич С. О., Дмитрієва О. І., Плехова Г. А., Протас Н. М., Неронов С. М., Шишацький А. В. Науково-методичний підхід з підвищення оперативності обробки різнотипних даних з використанням метаевристичних алгоритмів. C91 Moderní aspekty vědy: XLVI. Díl mezinárodní kolektivní monografie / Mezinárodní Ekonomický Institut s.r.o.. Česká republika: Mezinárodní Ekonomický Institut s.r.o., 2024. С. 510–543. https://doi.org/10.52058/46-2024.

41. *Olexander Litvinenko, Svitlana Kashkevich, Andrii Shyshatskyi, Oksana Dmytriieva, Serhii Neronov, Ganna Plekhova. The method of self-organization of information networks in the conditions of destabilizing influences . Information and control systems: modelling and optimizations: collective monograph.* 2024, *Kharkiv: TECHNOLOGY CENTER PC, pp.* 3–34. https://doi.org/10.15587/978-617-8360-04-7.ch1.

42. *Svitlana Kashkevich, Andrii Shyshatskyi, Oksana Dmytriieva, Yevhen Zhyvylo, Ganna Plekhova, Serhii Neronov. The development of management methods based on bio-inspired algorithms. Information and control systems: modelling and optimizations: collective monograph.* 2024, *Kharkiv: TECHNOLOGY CENTER PC, pp.* 35–69. https://doi.org/10.15587/978-617-8360-04-7.ch2.

43. *Svitlana Kashkevich, Nina Kuchuk, Oleksii Kuvshynov, Ganna Plekhova, Oleksandr Yefymenko, Andrii Veretnov. The development of methods for evaluating the state of complex technical systems using artificial intelligence theory. Information and control systems: modelling and optimizations: collective monograph.* 2024, *Kharkiv: TECHNOLOGY CENTER PC, pp.* 70–101. https://doi.org/10.15587/978-617-8360-04-7.ch3 .

44. *Svitlana Kashkevich, Heorhii Kuchuk, Ganna Plekhova, Viacheslav Davydov, Oleksandr Yefymenko, Yurii Beketov. The development of methods of learning artificial neural networks of intelligent decision-making support systems. Information and control systems: modelling and optimizations: collective monograph.* 2024, *Kharkiv: TECHNOLOGY CENTER PC, pp.* 102–136. https://doi.org/10.15587/978-617-8360-04-7.ch4 .

45. *Svitlana Kashkevich, Illia Dmytriiev, Inna Shevchenko, Oleksandr Lytvynenko, Lyubov Shabanova-Kushnarenko, Nataliia Apenko. Scientific-method apparatus for improving the efficiency of information processing using artificial intelligence. Information and control systems: modelling and optimizations: collective monograph.* 2024, *Kharkiv: TECHNOLOGY CENTER PC*, pp. 137–167. https://doi.org/10.15587/978-617-8360-04-7.ch5 .

46. Одарущенко О. Б., Шишацький А. В., Пилипчук І. Ю., Мягких Г. Г., Кашкевич С. О. Обґрунтування методів інтелектуального аналізу даних для вирішення задачі прийняття рішень в умовах невизначеності впливу обстановки. *Theoretical and practical scientific achievements: research and results of their implementation: proceedings of the IV International scientific and theoretical conference (Pisa, Italian Republic, April* 7, 2023). 2023. pp. 93 – 97.

47. Шишацький А. В., Литвиненко О. І., Жук О. В., Артюх С. Г., Кашкевич С.О. Розробка методики підвищення оперативності прийняття рішень в організаційно-технічних системах. XIII Міжнародна науково-практична конференція *"Development trends and improvement of old methods",* 12 – 15 грудня 2023, Варшава, Польща. С. 422 – 431.

48. Кашкевич С. О., Дмитрієва О. І., Шкнай О. В., Троцько О. О., Шишацький А. В. Математична модель інформаційного конфлікту інформаційних мереж. *XVII International Scientific and Practical Conference. April* 30 – *May* 03, 2024, *London, Great Britain. pp.* 412−422.

49. Кашкевич С. О., Дмитрієва О. І., Шкнай О. В., Троцько О. О., Шишацький А. В. Розробка методу маршрутизації в інформаційних мережах з використанням алгоритму зграї котів. *XXI* Міжнародна науково-практична конференція *"Innovative solutions in public communications and international relations"*, 28 – 31 травня 2024 р., Софія, Болгарія. С. 347-356.

50. Кашкевич С. О., Дмитрієва О. І., Шкнай О. В., Троцько О. О., Шишацький А. В. Принципи побудови інформаційних мереж з можливістю до самоорганізації. XXII Міжнародна науково-практична конференція *«Actual problems in education and introduction of new technologies»*, 04-07 червня 2024 р., Стокгольм, Швеція. С. 342-352.

51. А. Аль-Амморі, Р. М. Іщенко, А. Є. Клочан, О. П. Шкурко, Х. А. Аль-Амморі. Інформаційні технології стохастичної моделі надійності комп'ютеризованих систем для захисту інформації. Зв'язок. 2024, № 4, С. 10–18. DOI: 10.31673/2412-9070.2024.041018.

52. Кашкевич С. О., Дмитрієва О. І., Троцько О.О., Шкнай О. В., Шишацький А. В. Метод самоорганізації інформаційних мереж в умовах дестабілізуючих впливів. *The development of technical, agricultural and applied sciences as the main factor in improving life: collective monograph / Trembitska O., Zhuravel S., Stoliar S., Bilotserkivska L. – etc. – International Science Group. – Boston : Primedia eLaunch,* 2024. С. 192–218. DOI – 10.46299/ISG.2024.MONO.TECH.210.

53. Башкиров О. М. Розвиток інтегрованих систем зв'язку та передачі даних для потреб Збройних Сил / О. М. Башкиров, О. М. Костина, А. В. Шишацький. // Озброєння та військова техніка. – 2015. – №1. – С. 35–39. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/ovt_2015_1_7.

54. Сова О. Я. Інтелектуальна модель забезпечення радіозв'язності вузлів мобільних радіомереж класу *MANET* / О. Я. Сова. // Системи озброєння і військова техніка. – 2015. – №2. – С. 134–151. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/soivt_2015_2_37.

55. *Marino P. P. Chapter I: Modeling / Pablo Pavon Marino // Optimization of computer networks : modeling and algorithms : ahands-on approach / Pablo Pavon Marino. – Chichester, United Kingdom: John Wiley & Sons, Ltd,* 2016. – С. 15–22.

56. *Mitsuo G. Communication Network Models / G. Mitsuo, R. Cheng, L. Lin // Network Models and Optimization Multiobjective Genetic Algorithm Approach / G. Mitsuo, R. Cheng, L. Lin. – London: Springer-Verlag London Limited,* 2008. – С. 229–295. DOI https://doi.org/10.1007/978-1-84800-181-7_4.

57. *N. Kuchuk, A. S. Mohammed, A. Shyshatskyi, O. Nalapko. The method of improving the efficiency of routes selection in networks of connection with the possibility of self-organization", International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering,* 2019. *Vol.* 8. No. 1, pp. 1–6, DOI: https://doi.org/10.30534/ijatcse/2019/0181.22019.

58. Аль-Амморі А. Н. Комп'ютерні та інформаційні технології планування експериментів. Аль-Амморі А. Н., Дехтяр М.М.,Абдусалам Х.І.С. //Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць: Системи управління, навігації та зв'язку. Том 4 № 70 (2022) С. 51-56.

59. *Ali Al-Ammouri. Development of a mathematical model of reliable structures of information-control systems / Ali Al-Ammouri, Iryna Lebid, Marina Dekhtiar, Ievgenii Lebid, Hasan Al-Ammori // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies.* – 2022. – Vol. 5/9, Issue (119).– P. 68–78. DOI: https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.265953.

60. *Dudnyk, V., Sinenko, Yu., Matsyk, M., Demchenko, Ye., Zhyvotovskyi, R., Repilo, Iu., Zabolotnyi, O., Simonenko, A., Pozdniakov, P., Shyshatskyi, A* (2020). *"Development of a method for training artificial neural networks for intelligent decision support systems". Eastern-European Journal of Enterprise Technologies.*

Vol. 3, No. 2 (105), pp. 37–47. DOI: https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.203301.

61. *Sova, O., Shyshatskyi, A., Salnikova, O., Zhuk, O., Trotsko, O., & Hrokholskyi, Y. (2021). "Development of a method for assessment and forecasting of the radio electronic environment". EUREKA: Physics and Engineering, Vol.* (4), pp. 30-40. https://doi.org/10.21303/2461-4262.2021.001940.

62. *Pievtsov, H., Turinskyi, O., Zhyvotovskyi, R., Sova, O., Zvieriev, O., Lanetskii , B., and Shyshatskyi , A. (2020). "Development of an advanced method of finding solutions for neuro-fuzzy expert systems of analysis of the radioelectronic situation". EUREKA: Physics and Engineering, Vol.* (4), pp. 78−89. https://doi.org/10.21303/2461-4262.2020.001353.

63. *Zuiev, P., Zhyvotovskyi, R., Zvieriev, O., Hatsenko, S., Kuprii, V., Nakonechnyi, O., Adamenko, M., Shyshatskyi, A., Neroznak, Y. and Velychko, V(2020). "Development of complex methodology of processing heterogeneous data in intelligent decision support systems", Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, Vol*. 4, No.9 (106), pp.14–23. DOI: https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.208554.

64. *Nina Kuchuk, Amin Salih Mohammed, Andrii Shyshatskyi and Oleksii Nalapko(2019). "The Method of Improving the Efficiency of Routes Selection in Networks of Connection with the Possibility of Self-Organization". International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering. No. 1.2., Vol.* 8. pp. 1–6. DOI: 10.30534/ijatcse/2019/0181.22019.

65. *Shyshatskyi, A., Zvieriev, O., Salnikova, O., Demchenko, Ye., Trotsko, O. and Neroznak, Ye(2020). "Complex Methods of Processing Different Data in Intellectual Systems for Decision Support System". International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering. Vol.* 9, No. 4, pp. 5583–5590 DOI: https://doi.org/10.30534/ijatcse/2020/206942020.

66. *C. Pozna, R. -E. Precup, E. Horváth and E. M. Petriu(2022). "Hybrid Particle Filter–Particle Swarm Optimization Algorithm and Application to Fuzzy*

Controlled Servo Systems," IEEE Transactions on Fuzzy Systems, Vol. 30, No. 10, pp. 4286−4297, Oct. 2022, https://doi.org/10.1109/TFUZZ.2022.3146986.

67. *Yang X.S. and Deb. S (2014). "Cuckoo search: recent advances and applications". Neural Computing and Applications. Vol.* 24, pp. 169–174. https://doi.org/10.1007/s00521-013-1367-1.

68. *Mirjalili, S (2015). "The ant lion optimizer". Advances in Engineering Software. Vol.* 83, pp. 80–98. https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2015.01.010.

69. *James J .Q. Yu. and Victor O. K. Li (2015) "A social spider algorithm for global optimization". Applied Soft Computing. Vol*. 30, pp. 614–627. https://doi.org/10.1016/j.asoc.2015.02.014.

70. *Mirjalili, S, Mirjalili, S.M, Lewis, A (2014) "Grey Wolf Optimizer". Advances in Engineering Software. Vol.* 69, pp. 46–61. https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2013.12.007.

71. *Koval, V., Nechyporuk, O., Shyshatskyi, A., Nalapko, O., Shknai, O., Zhyvylo, Y., Yerko, V., Kreminskyi, B., Kovbasiuk, O., Bychkov, A. (2023). Improvement of the optimization method based on the cat pack algorithm. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, Vol*. 1, No.9 (121), pp. 41–48. doi: https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.273786.

72. *Nuaekaew, K., Artrit, P., Pholdee, N. and Bureerat, S (2017) "Optimal reactive power dispatch problem using a two-archive multi-objective grey wolf optimizer". Expert Systems with Applications. Vol.* 87, pp. 79–89. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2017.06.009.

73. *Koval M., Sova O., Shyshatskyi A., Orlov O., Artabaiev Yu., Shknai O., Veretnov A., Koshlan O., Zhyvylo Ye., Zhyvylo I. Improvement of complex resource management of special-purpose communication systems (2022). Eastern-european journal of enterprise technologies, Vol*. 5, No. 9 (119), pp. 34−44. DOI: 10.15587/1729-4061.2022.266009.

74. *Ali, M., El-Hameed, M.A. and Farahat M.A. (2017) "Effective parameters' identification for polymer electrolyte membrane fuel cell models using grey wolf*

optimizer". Renewable Energy. Vo. 111, pp. 455–462. https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.04.036.

75. *Zhang, S. and Zhou, Y (2017). "Template matching using grey wolf optimizer with lateral inhibition". Optik. Vol.* 130, pp. 1229–1243. https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2016.11.173.

76. *Khouni, S. E., Menacer, T(2024). "Nizar optimization algorithm: a novel metaheuristic algorithm for global optimization and engineering applications". The Journal of Supercomputing. Vol*. 80, pp. 3229–3281. https://doi.org/10.1007/s11227-023-05579-4.

77. *Braik, M.S (2021). "Chameleon swarm algorithm: a bio-inspired optimizer for solving engineering design problems". Expert Systems with Applications. Vol. 17*4, 114685. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.114685.

78. *Thamer, K. A., Sova, O., Shaposhnikova, O., Yashchenok, V., Stanovska, I., Shostak, S., Rudenko, O., Petruk, S., Matsyi, O., & Kashkevich, S. (2024). "Development of a solution search method using a combined bio-inspired algorithm". Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, Vol.* 1, No. 4 (127), pp. 6–13. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.298205.

79. *Yapici, H and Cetinkaya, N (2019) "A new meta-heuristic optimizer: Pathfinder algorithm". Applied Soft Computing.* Vol. 78, pp. 545–568. https://doi.org/10.1016/j.asoc.2019.03.012.

80. *Duan, H. and Qiao, P (2014). "Pigeon-inspired optimization: a new swarm intelligence optimizer for air robot path planning". International Journal of Intelligent Computing and Cybernetics. Vol.* 7, Iss. 1, pp.24–37. https://doi.org/10.1108/IJICC-02-2014-0005.

81. *Shyshatskyi, A., Romanov, O., Shknai, O., Babenko, V., Koshlan, O., Pluhina, T., Biletska, A., Stasiuk, T., Kashkevich, S., & Kryvosheiev, V. (2023). "Development of a solution search method using the improved emperor penguin algorithm". Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, Vol.* 6, No. 4 (126), pp. 6–13. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.291008.

82. *Gomes, G.F, da Cunha, S.S. and Ancelotti A.C (2019). "A sunflower optimization (SFO) algorithm applied to damage identification on laminated composite plates". Engineering with Computers. Vol.* 35, Iss. 2: pp.619–626. https://doi.org/10.1007/s00366-018-0620-8.

83. *Mehrabian, A.R, Lucas, C (2006). "A novel numerical optimization algorithm inspired from weed colonization". Ecological Informatics. Vol.* 1, Iss. 4, pp. 355–366. https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2006.07.003.

84. *Qi X, Zhu, Y, Chen, H, et al (2013). "An idea based on plant root growth for numerical optimization". Intelligent Computing Theories and Technology. Berlin, Heidelberg*, pp. 571–578. https://doi.org/10.1007/978-3-642-39482-9_66.

85. *Bezuhlyi, V., Oliynyk, V., Romanenko I., Zhuk, O., Kuzavkov, V., Borysov, O., Korobchenko, S., Ostapchuk, E., Davydenko, T., & Shyshatskyi, A. (2021). "Development of object state estimation method in intelligent decision support systems". Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, Vol*. 5, No. 3 (113), pp. 54–64. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.239854.

86. *Mahdi Q. A., Shyshatskyi A., Prokopenko Y., Ivakhnenko T.., Kupriyenko D.., Golian V., Lazuta R., Kravchenko S.., Protas N. & Momit A.(2021). "Development of estimation and forecasting method in intelligent decision support systems". Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, Vol*. 3, No. 9(111), pp. 51–62. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.232718.

87. *Oleg Sova, Hryhorii Radzivilov, Andrii Shyshatskyi, Dmytro Shevchenko, Bohdan Molodetskyi, Vitalii Stryhun, Yurii Yivzhenko, Yevhen Stepanenko, Nadiia Protas, & Oleksii Nalapko. (2022). Development of the method of increasing the efficiency of information transfer in the special purpose networks. Eastern-european Journal of Enterprise Technologies, Vol*. 3, No. 4 (117)), pp. 6–14. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.259727.

88. *Zhang, H, Zhu, Y, and Chen ,H (2014). "Root growth model: a novel approach to numerical function optimization and simulation of plant root system". Soft Computing, Vol.* 18, Iss. 3, pp. 521–537. https://doi.org/10.1007/s00500-013-1073-z.

89. *Labbi, Y, Attous, D.B., Gabbar, H.A et al (2016) "A new rooted tree optimization algorithm for economic dispatch with valve-point effect". International Journal of Electrical Power & Energy Systems. Vol.* 79, pp. 298–311. https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2016.01.028.

90. *Murase ,H (2000) "Finite element inverse analysis using a photosynthetic algorithm". Computers and Electronics in Agriculture. Vol.* 29, Iss.1–2, pp.115–123. https://doi.org/10.1016/S0168-1699(00)00139-3.

91. *Zhao S, Zhang T, Ma S et al (2022) "Dandelion optimizer: a nature−inspired metaheuristic algorithm for engineering applications". Engineering Applications of Artificial Intelligence. Vol.* 114, 105075. https://doi.org/10.1016/j.engappai.2022.105075.

92. *Paliwal, N., Srivastava, L. and Pandit, M(2022). "Application of grey wolf optimization algorithm for load frequency control in multi-source single area power system". Evolutionary Intelligence. Vol.* 15, pp. 563–584. https://doi.org/10.1007/s12065-020-00530-5.

93. *Bansal J.C., Sharma H., Jadon S.S. and Clerc, M(2014). "Spider Monkey Optimization algorithm for numerical optimization." Memetic Computing. Vol.* 6, pp. 31–47. https://doi.org/10.1007/s12293-013-0128-0

94. *Yeromina, N., Kurban, V., Mykus, S., Peredrii, O., Voloshchenko, O., Kosenko, V., Kuzavkov, V., Babeliuk, O., Derevianko, M. and. Kovalov, H(2021). "The Creation of the Database for Mobile Robots Navigation under the Conditions of Flexible Change of Flight Assignment". International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering. Vol* 11, No. 05., pp. 37 –41. https://doi.org/10.46338/ijetae0521_05.

95. *Alan D. Maccarone, John N. Brzorad and Heather M. Stone (2008) "Characteristics And Energetics Of Great Egret And Snowy Egret Foraging Flights," Waterbirds. Vol.* 31, No. 4, pp. 541– 549.

96. *Ramaji, I. J. and Memari, A. M(2018). "Interpretation of structural analytical models from the coordination view in building information models". Automation in Construction. No.* 90. pp. 117–133. DOI:

97. *Chan, H. K., Sun, X. and Chung, S.-H(2019) "When should fuzzy analytic hierarchy process be used instead of analytic hierarchy process?" Decision Support Systems. pp*. 1–37. DOI: https://doi.org/10.1016/j.dss.2019.113114.

98. *Osman, A. M. S(2019). "A novel big data analytics framework for smart cities". Future Generation Computer Systems. Vol*. 91., pp. 620–633. DOI:

99. *Nechyporuk, O., Sova, O., Shyshatskyi, A., Kravchenko, S., Nalapko, O., Shknai, O., Klimovych, S., Kravchenko, O., Kovbasiuk, O. and Bychkov, A(2023)." Development of a method of complex analysis and multidimensional forecasting of the state of intelligence objects". Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, Vol*. 2, No. 4 (122), pp. 31–41. doi: https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.276168.

100. *Poliarus , O., Krepych , S., & Spivak , I. (2023). "Hybrid approach for data filtering and machine learning inside content management system". Advanced Information Systems*, 7(4), 70–74. https://doi.org/10.20998/2522-9052.2023.4.09

101. *Balochian, S and Baloochian, H (2019). "Social mimic optimization algorithm and engineering applications". Expert Systems with Applications. Vol.* 134, pp. 178–191. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2019.05.035.

102. *Hayyolalam, V, Kazem, A.A.P (2020). "Black widow optimization algorithm: a novel meta-heuristic approach for solving engineering optimization problems". Engineering Applications of Artificial Intelligence. Vol*. 87, 103249. https://doi.org/10.1016/j.engappai.2019.103249.

103. *Abualigah, L, Yousri D, Abd Elaziz M et al (2021). "Aquila optimizer: a novel meta-heuristic optimization algorithm". Computers & Industrial EngineeringVol.* 157, 107250. https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107250.

104. *Hodlevskyi, M., & Burlakov, G. (2023). "Information technology of quality improvement planning of process subsets of the spice model". Advanced Information Systems, Vol.* 7, No. 4, pp. 52–59. https://doi.org/10.20998/2522-9052.2023.4.06

105. *Askari, Q, Younas, I and Saeed, M (2020) "Political optimizer: A novel socio-inspired meta-heuristic for global optimization". Knowledge-Based Systems.*

106. *Mohamed, A.W, Hadi A.A and Mohamed A.K (2020) "Gaining-sharing knowledge based algorithm for solving optimization problems: a novel nature-inspired algorithm". International Journal of Machine Learning and Cybernetics. Vol*. 11, Iss. 7, pp. 1501–1529. https://doi.org/10.1007/s13042-019-01053-x.

107. *Gödri, I., Kardos, C., Pfeiffer, A. and Váncza, J(2019). "Data analytics-based decision support workflow for high-mix low-volume production systems". CIRP Annals. Vol.* 68. No.1. pp. 471–474. DOI:

108. *Oleg Sova, Hryhorii Radzivilov, Andrii Shyshatskyi, Pavel Shvets, Valentyna Tkachenko, Serhii Nevhad, Oleksandr Zhuk, Serhii Kravchenko, Bohdan Molodetskyi, & Hennadii Miahkykh. (2022). "Development of a method to improve the reliability of assessing the condition of the monitoring object in special-purpose information systems". Eastern-european Journal of Enterprise Technologies, Vol*. 2, *No.* 3 (116), *pp.* 6–14. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.254122.

109. *Khudov, H., Khizhnyak , I., Glukhov, S.., Shamrai, N., & Pavlii , V. (2024). The method for objects detection on satellite imagery based on the firefly algorithm. Advanced Information Systems, Vol.* 8, *No*. 1, *pp.* 5–11. https://doi.org/10.20998/2522-9052.2024.1.01.

110. *Perkins C.E. Performance Comparison of Two On-Demand Routing Protocols for Ad Hoc Networks / C.E. Perkins, E.M. Royer, S.M. Das // IEEE Personal Computer*. – 2001. V. 8. – No 2. – P. 16 – 28.

111. *PARRoT: Predictive Ad-hoc Routing Fueled by Reinforcement Learning and Trajectory Knowledge / B.Sliwa, C. Schuler, M. Patchou, C. Wietfeld. // Accepted for presentation in:* 2021 *IEEE 93rd Vehicular Technology Conference (VTC-Spring)*. – 2020. – С. 1–7. *Corpus ID:* 228084082.

Додаток А.

Акти впровадження результатів дисертаційного дослідження

УКРАЇНА

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ
АВТОМОБІЛЬНО-ДОРОЖНІЙ УНІВЕРСИТЕТ

61002, вул. Ярослава Мудрого, 25, м. Харків, тел. (057) 700-38-66, факс (057) 700-38-65, E-mail: admin@khadi.kharkov.ua

17.04.2024 № 499/29
На № _____

ЗАТВЕРДЖУЮ
Проректор з наукової роботи
_____ Ілля ДМИТРІЄВ
«15» _____ 2024 року

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ
результатів дисертаційного дослідження в навчальний процес
Харківського національного автомобільно-дорожнього університету

Ми, що нижче підписалися, склали даний акт про те, що результати дисертаційної роботи Кашкевич Світлани Олександрівни «Метод самоорганізації інформаційних мереж в умовах дестабілізуючих впливів» використовуються у навчальному процесі Харківського національного автомобільно-дорожнього університету, механічного факультету на кафедрі комп'ютерних систем.

1. Модель функціонування інформаційних мереж в умовах дестабілізуючих впливів. Дана модель дозволяє описати вплив дестабілізуючих чинників на функціонування інформаційних мереж в умовах дестабілізуючих впливів.

2. Метод визначення топології інформаційних мереж в умовах дестабілізуючих впливів з використанням метаевристичного підходу. Даний метод дозволяє визначити гарантовану топологію топології інформаційних мереж в умовах дестабілізуючих впливів з використанням метаевристичного підходу, в частині забезпечення заданої пропускної спроможності.

3. Метод комплексного управління мережевими ресурсами інформаційних мереж в умовах дестабілізуючих впливів. Даний метод дозволяє визначити гарантоване використання інформаційних мереж в умовах дестабілізуючих впливів з використанням штучного інтелекту, в частині забезпечення заданої пропускної спроможності.

Декан механічного факультету — Олександр ЄФИМЕНКО

Завідувач кафедри комп'ютерних систем — Віталіна БАБЕНКО

УКРАЇНА

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ
АВТОМОБІЛЬНО-ДОРОЖНІЙ УНІВЕРСИТЕТ

61002, вул. Ярослава Мудрого, 25, м. Харків, тел. (057) 700-38-66, факс (057) 700-38-65, E-mail: admin@khadi.kharkov.ua

08.07.24 № 1110/01
На № _____

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ
результатів дисертаційного дослідження
в держбюджетну науково-дослідну роботу

Ми, що нижче підписалися, склали даний акт про те, що результати дисертаційної роботи Кашкевич Світлани Олександрівни «Метод самоорганізації інформаційних мереж в умовах дестабілізуючих впливів» використані у проміжному звіті держбюджетної науково-дослідної роботи «Дослідження інноваційних підходів застосування інформаційних технологій в сфері цифровізації транспортних систем», а саме:

1. Методи самоорганізації інформаційних мереж в умовах дестабілізуючих впливів. Запропоновані методи дозволяють підвищити оперативність структурної та параметричної самоорганізації інформаційних мереж за рахунок використання удосконалених ройових алгоритмів.

2. Методи обробки різнотипних даних в інформаційних мереж в умовах дестабілізуючих впливів. Запропонована сукупність методів обробки різнотипних даних підвищити оперативність обробки структурованих так і не структурованих даних за рахунок використання удосконалених метаевристичних алгоритмів.

Завідувач кафедри комп'ютерних систем **Віталіна БАБЕНКО**

Проректор з наукової роботи **Ілля ДМИТРІЄВ**

ЗАТВЕРДЖУЮ
Генеральний директор ТОВ “ВАТ Олімп”
Геннадій КОГАН
“06” червня 2024 року

АКТ
про реалізацію наукових досліджень
КАШКЕВИЧ Світлани Олександрівни

Комісія у складі: голови комісії – головного інженера ТОВ “ВАТ Олімп” Павла ТИМЧЕНКА, та членів комісії: начальника ВГК ТОВ “ВАТ Олімп” Сергія НЕСТЕРУКА, головного конструктора ТОВ “ВАТ Олімп” Валерія ПЕТРУНІНА, встановила, що наукові результати, що розроблені особисто Світланою КАШКЕВИЧ, а саме:

1. Комплексна модель функціонування інформаційних мереж. Запропонована модель дозволяє описати антагоністичний конфлікт інформаційних мереж та дестабілізуючих чинників на рівнях взаємодії моделі відкритих систем.

2. Метод маршрутизації в інформаційних мережах. Метод дозволяє підвищити оперативність встановлення з’єднань та передачі інформації в інформаційних мережах за рахунок використання удосконаленого біоінспірованого алгоритму.

3. Комплексний метод самоорганізації інформаційних мереж. Даний метод дозволяє підвищити оперативність самоорганізації інформаційних мереж в умовах комплексного впливу дестабілізуючих чинників при забезпеченні заданих показників їх ефективності функціонування. В основу зазначеного методу покладені удосконалені метаевристичні алгоритми.

Зазначені результати впроваджені під час створення складової частини інформаційної системи спеціального призначення.

Зазначений акт не є підставою для фінансових розрахунків.

Голова комісії:

Головний інженер ТОВ “ВАТ Олімп” Павло ТИМЧЕНКО

Члени комісії:

Начальник ВГК ТОВ “ВАТ Олімп” Сергій НЕСТЕРУК

Головний конструктор ТОВ “ВАТ Олімп” Валерій ПЕТРУНІН

ЗАТВЕРДЖУЮ
Директор ТОВ “ФЛАЙ-ГРУП УКРАЇНА”
Владислав МАЗЯРУК
“_____” 2024 р..

АКТ
про реалізацію наукових досліджень
КАШКЕВИЧ Світлани Олександрівни

Комісія у складі: голови комісії – головного інженера ТОВ “ФЛАЙ-ГРУП УКРАЇНА” Ремішевського А. Б., та членів комісії: інженера ТОВ “ФЛАЙ-ГРУП УКРАЇНА” Плетньова В. В., інженера ТОВ “ФЛАЙ-ГРУП УКРАЇНА” Манжоса Д. Є., встановила, що наукові результати, що розроблені особисто Світланою КАШКЕВИЧ, а саме:

1. Комплексна модель функціонування інформаційних мереж. Запропонована модель дозволяє описати антагоністичний конфлікт інформаційних мереж та дестабілізуючих чинників на рівнях взаємодії моделі відкритих систем.

2. Метод маршрутизації в інформаційних мережах. Метод дозволяє підвищити оперативність встановлення з’єднань та передачі інформації в інформаційних мережах за рахунок використання удосконаленого біоінспірованого алгоритму.

3. Комплексний метод самоорганізації інформаційних мереж. Даний метод дозволяє підвищити оперативність самоорганізації інформаційних мереж в умовах комплексного впливу дестабілізуючих чинників при забезпеченні заданих показників їх ефективності функціонування. В основу зазначеного методу покладені удосконалені метаевристичні алгоритми.

Зазначені результати впроваджені під час створення інформаційної системи обробки різнотипних даних.

Зазначений акт не є підставою для фінансових розрахунків.

Голова комісії:

головний інженер
ТОВ “ФЛАЙ-ГРУП УКРАЇНА” Анатолій РЕМІШЕВСЬКИЙ

Члени комісії:

інженер ТОВ “ФЛАЙ-ГРУП УКРАЇНА” Валентин ПЛЕТНЬОВ

інженер ТОВ “ФЛАЙ-ГРУП УКРАЇНА” Дмитро МАНЖОС

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
Проректор з навчальної роботи
_____ Анатолій ПОЛУХІН
«__» _____ 2024 року

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ
результатів дисертаційного дослідження в навчальний процес
Національного авіаційного університету

Ми, що нижче підписалися, декан факультету комп'ютерних наук та технологій, к.т.н., доцент Фесенко А.О., завідувач кафедри інтелектуальних кібернетичних систем, д.т.н., професор Нечипорук О.П. склали даний акт про те, що результати дисертаційної роботи Кашкевич Світлани Олександрівни "Метод самоорганізації інформаційних мереж в умовах дестабілізуючих впливів" використовуються у навчальному процесі Національного авіаційного університету, факультету комп'ютерних наук та технологій на кафедрі комп'ютеризованих систем управління.

Вид результату, що впроваджується	**Форма впровадження**	**Ефект від впровадження**
1. Модель функціонування інформаційних мереж в умовах дестабілізуючих чинників. 2. Метод визначення топології інформаційних мереж в умовах дестабілізуючих впливів з використанням матаевристичного підходу. 3. Метод комплексного управління мережевими ресурсами інформаційних мереж в умовах дестабілізуючих впливів	У навчальних програмах дисциплін: – "Методи захисту інформаційних систем спеціального призначення" для спеціальності 123 Комп'ютерна інженерія ОПП "Системне програмування" № РМ-4-123-2/23-3.3, що затверджена 22.09.2023 р.; – "Методи захисту інформаційних систем спеціального призначення", для спеціальності 126 Інформаційні системи та технології ОПП "Інтелектуальні системи та технології" № НМ-4-126/23-3.4, що затверджена 14.09.2023 р. У кваліфікаційних роботах.	Підвищення якості навчання. Інтенсифікація навчального процесу.

Декан факультету комп'ютерних наук та технологій — Андрій ФЕСЕНКО

Завідувач кафедри інтелектуальних кібернетичних систем — Олена НЕЧИПОРУК

Додаток Б

Приклад перевірки адекватності імітаційної моделі інформаційної мережі

Як зазначалося в підрозділі 4.2, через відсутність існуючого прототипу інформаційної мережі перевірку адекватності ІМ будемо проводити шляхом порівняння двох ІМ, які відрізняються степенем деталізації процесу передачі даних в інформаційні мережі. Застосування *t*-статистики для порівняння результатів ІМ ґрунтується на припущенні про наближену нормальність розподілу узагальнених показників ефективності. Як показано в роботах [30-31,39], для ІМ інформаційних мереж при багаторазовому відтворенні сценаріїв функціонування розподіли таких показників, як пропускна здатність та затримка передачі, наближаються до нормального. З огляду на малий обсяг вибірок у даному дослідженні, пряма перевірка нормальності розподілу не проводилась.

Всього було здійснено п’ять експериментів (*k* 1,5) на кожній з моделей. Перевірка адекватності здійснювалася шляхом оцінки середніх значень відгуків моделі-прототипу $Y_k^* = (S_k^*, t_{зk}^*, \delta_k^*)$ та досліджуваної моделі $Y_k = (S_k, t_{зk}, \delta_k)$ при однакових параметрах системи $X_k^* = X_k$. Результати експериментів наведені в табл. Б.1.

Табл. Б.1

Результати експериментів моделей

Позначення відгуку ІМ	Значення складових вибірки при					Середнє значення відгуку	Оцінка дисперсії відгуку $D_n \vee D_n^*$	Дисперсія різниці $D_{рn}$	Значення статистики t_n
	k=1	*k*=2	*k*=3	*k*=4	*k*=5				
S, Мбіт/с	0,9	0,88	0,88	0,9	0,91	0,894	0,00018	0,000165	1,695
S*, Мбіт/с	0,88	0,88	0,86	0,89	0,89	0,88	0,00015		
$t_з$, с	0,43	0,41	0,43	0,42	0,42	0,422	0,0007	0,0004	0,632
$t_з^*$, с	0,42	0,44	0,43	0,42	0,44	0,43	0,0001		
δ	1,1	1,2	1,1	1,2	1,1	1,14	0,003	0,001	1,789
δ*	1,2	1,3	1,2	1,1	1,3	1,22	0,007		

З використанням виразів (Б.1) оцінимо значення оцінок математичного сподівання та дисперсії відгуків ІМ і запишемо їх в табл. Б.1:

$$\overline{Y}_n = \frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N} Y_{nk};\ D_n = \frac{1}{N-1}\sum_{k=1}^{N}\left(Y_{nk} - \overline{Y}_n\right)^2;$$

$$\overline{Y}_n^* = \frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N^*} Y_{nk}^*;\ D_n^* = \frac{1}{N^*-1}\sum_{k=1}^{N^*}\left(Y_{nk}^* - \overline{Y}_n^*\right)^2, \qquad (Б.1)$$

де $N^*=N=5$ – кількість експериментів, яка була здійснена для кожної з моделей.

За виразом:

$$D_{pn} = \frac{(N^*-1)D_n + (N-1)D_n^*}{N+N^*-2}, \qquad (Б.2)$$

визначаємо оцінку D_{pn} дисперсії різниці $\left(\overline{Y}_n^* - \overline{Y}_n\right)$ для кожної n-ї компоненти відгуків моделей, а результати записуємо в табл. Д.1. Так як величини D_{pn} та $\left(\overline{Y}_n^* - \overline{Y}_n\right)$ є статистично незалежними, то можемо використати t-статистику:

$$t_n = \left(\overline{Y}_n^* - \overline{Y}_n\right)\sqrt{\frac{N^*N}{D_{\text{pn}}\left(N+N^*\right)}} \qquad (Б.3)$$

Використовуючи вираз (В.3) знайдемо три значення t-статистики (вибравши кількість ступенів волі рівним $\gamma=N+N^*-2=5+5-2=8$) і занесемо їх в табл. В.1. Скористаємося таблицею розподілу t-статистики, задавшись $\alpha=0.05$ та $\gamma=8$, для визначення критичного значення t-статистики ($t_{\text{кр}}=1.85$). Порівнюючи кожне із значень t-статистики в табл. Д.1 з $t_{\text{кр}}$:

$$(t_1=1.695)<(1.85=t_{\text{kp}});$$
$$(t_2=0.695)<(1.85=t_{\text{kp}}); \qquad (Б.4)$$
$$(t_3=1.789)<(1.85=t_{\text{kp}}),$$

можна прийняти гіпотезу про наближеність середніх значень за кожною компонентою відгуків імітаційних моделей, які відрізняються степенем деталізації процесу передачі даних в інформаційні мережі, що свідчить про їх адекватність.

Додаток В

Приклад перевірки стійкості імітаційної моделі інформаційної мережі

Дослідження проводилися при оцінці методу маршрутизації інформаційних мереж, що самоорганізовуються. У ході дослідження було здійснено два вимірювання пропускної спроможності інформаційного напрямку інформаційної мережі S у залежності від кількості ретрансляційних інтервалів на маршруті передачі між вузлами відправником та адресатом. Тривалість інтервалу моделювання становила T 500 с, у ході якого з кроком t 50 с здійснювався контроль показника пропускної спроможності інформаційного напрямку інформаційної мережі.

У результаті вимірювань було отримано два розподіли відгуку ІМ, елементи яких відповідали значенням пропускної спроможності інформаційного напрямку до $Y_д$ та після $Y_п$ змін в ІМ. При цьому, зміни в ІМ полягали в тому, що перше вимірювання відбувалося при фіксованих значеннях топологічних змін ω=2 зв/с та вхідного навантаження g=2 п/с, друге вимірювання проводилося при фіксованих значеннях 5 зв/с та g=5 п/с.

Щодо результатів вимірювань була введена гіпотеза H_0, що при збільшенні значень ω та g пропускна спроможність інформаційного напрямку змінюватися не буде:

$$H_0: Y_д = Y_п \qquad \text{(В.1)}$$

Оскільки на етапі дослідження нічого не відомо щодо впливу ω та g на пропускну спроможність інформаційного напрямку інформаційної мережі, то розглядатимемо двобічну альтернативу $\theta<0$ та $\theta>0$ (де θ – параметр, що характеризує різницю значень пропускної спроможності у разі її наявності).

Необхідно перевірити гіпотезу H_0 (відхилити її чи ні), що полягає в наступному: відхилення гіпотези будемо трактувати як наявність впливу параметрів ω та g на пропускну спроможність інформаційного напрямку, а якщо гіпотеза не відхиляється, то вважатимемо, що вплив ω та g на пропускну спроможність інформаційного напрямку не виявлено.

Перевірка стійкості ІМ здійснювалася з використанням критерію Уілкоксона, який застосовується для співставлення показників, що були виміряні при двох різних умовах на одній і тій же досліджуваній вибірці. Критерій дозволяє встановити не тільки напрямок зміни параметрів, але й інтенсивність таких змін. Вибіркові значення $Y_д$ та $Y_п$, а також розрахунок рангів зсуву зображено в табл. В.1. За нетиповий зсув було прийняте “зростання значення”. Як видно з таблиці, значення $T_{емп}$=4.

У табл. В.2 наведено значення $T_{кр}$ при n=10, з урахуванням якого на рис. В.1 зображено вісь значимості. Як видно з рисунку, отримане емпіричне значення $T_{емп}$ знаходиться в зоні значимості. З цього можна зробити висновок, що прийнята вище гіпотеза H_0 щодо відсутності впливу параметрів ω та g на пропускну спроможність інформаційного напрямку однозначно відхиляється. При цьому, з урахуванням від’ємних значень зсуву ($t_{після} – t_{до}$), які наведені в табл. В.1, можна зробити висновок про те, що збільшення значень ω та g спричиняє зменшення пропускної спроможності інформаційного напрямку.

Табл. В.1

Розрахунок *T*-критерію Вілкоксона

N	$Y_д$	$Y_п$	Зсув ($t_{після} – t_{до}$)	Абсолютне значення зсуву	Ранговий номер зсуву
1	0.8	0.58	-0.22	0.22	10
2	0.75	0.55	-0.2	0.2	9
3	0.65	0.6	-0.05	0.05	2.5
4	0.7	0.6	-0.1	0.01	6
5	0.58	0.53	-0.05	0.05	2.5
6	0.6	0.53	-0.07	0.07	5
7	0.55	0.61	0.6	0.06	4
8	0.63	0.6	-0.03	0.03	1
9	0.68	0.54	-0.14	0.14	7.5
10	0.71	0.57	-0.14	0.14	7.5
Сума рангів нетипових зсувів:					4

Табл. В.2

Критичні значення $T_{кр}$ при n=10

n	$T_{кр}$	
	0.01	0.05
10	5	10

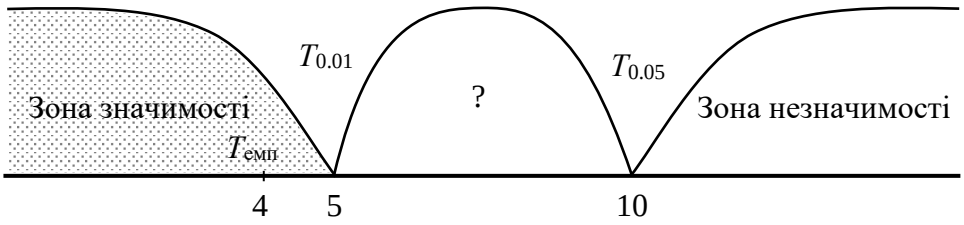


Рис. В.1. Вісь значимості

З отриманих результатів, наведених в табл. В.1, вважатимемо, що імітаційна модель знаходиться в стійкому стані.

Додаток Г

Приклад перевірки чутливості імітаційної моделі інформаційної мережі

У ході перевірки чутливості встановлюється діапазон зміни відгуку ІМ $Y=(S, t_з, \delta)$ при зміні кожної компоненти вектору параметрів $X=(\omega, g)$. У залежності від діапазону зміни відгуків Y визначається стратегія планування експериментів на ІМ. Якщо при значній амплітуді зміни деякої компоненти вектору параметрів моделі X відгук Y змінюється незначно, то це означає, що точність відображення цієї компоненти в ІМ не відіграє суттєвої ролі і в плануванні імітаційного експерименту ця компонента не буде використовуватися в якості основної. В іншому випадку таку компоненту слід представляти в моделі з максимальною точністю.

Кожна q-а компонента вектору X відхиляється від значення в його центральній точці в обидві сторони на довжину вибраного інтервалу його зміни ($\min X_q$, $\max X_q$). Решта компонентів вектору X залишаються незмінними і відповідають центральній точці. При вказаних значеннях вектору X проводиться пара модельних експериментів і обчислюються відгуки моделі ($\min Y_q$, $\max Y_q$), де $\min Y_q$ та $\max Y_q$ означають відповідно вектори відгуку ІМ, отримані при мінімальному та максимальному значеннях q-ї компоненти вектору X. Далі обчислюється приріст q-ї компоненти вектору X за виразом

$$\Delta X_q^0 = \frac{\left(\max X_q - \min X_q\right)\cdot 2}{\max X_q - \min X_q} 100\%, \qquad (Г.1)$$

який і буде приростом вектору параметрів X при зміні тільки однієї компоненти q. Так само знаходимо приріст n -ї компоненти вектору відгуку Y.

$$\Delta Y_n = \frac{\left(\max Y_n - \min Y_n\right)\cdot 2}{\max Y_n - \min Y_n} 100\%. \qquad (Г.2)$$

Для оцінки зміни всього вектору відгуку Y найчастіше вибирають $\Delta Y_q^0 = \max\{\Delta Y_n\}$, де ΔY_n обчислюється з виразу Ґ.2.

Таким чином, чутливість ІМ за q-ю компонентою вектору X визначається парою значень $\left(\Delta X_q^0, \Delta Y_q^0\right)$, яка показує, на скільки відсотків може змінитися відгук ІМ при зростанні q-ї компоненти параметрів на X_q^0 відсотків.

Оцінка чутливості ІМ для дослідження процесу передачі інформації в інформаційній мережі класу MANET проводилася в ході дослідження методу маршрутизації в інформаційних мережах з використанням наступних вихідних даних. Було здійснено допущення, що середня точка вектору параметрів X відповідає інтенсивностям надходження потоків даних g=3 п/с та динаміці зміни топології інформаційної мережі ω=3 зв/с. Тривалість інтервалу моделювання становила T=500 с.

У табл. Г.1 наведені значення компонент вектору відгуків Y=(S, $t_з$, δ) при відповідних значеннях вектору параметрів моделі X=(ω, g). Діапазон зміни інтенсивностей потоків даних був вибраний від g=1 п/с до g=5 п/с . Діапазон зміни динаміки зміни топології інформаційної мережі був вибраний від ω=1 зв/с до ω=5 зв/с. Було проведено чотири варіанти імітаційних Y експериментів.

Табл. Г.1

Результати розрахунків щодо перевірки чутливості імітаційної моделі

Номер варіанта	ω, зв/с	g, п/с	S, Мбіт/с	$t_з$, с	δ	Δω, %	Δg, %	ΔS, %	Δt, %	Δδ, %	$\Delta\overline{Y}$, %
1	2	3	0.7	0.5	1	85.7	50	30.3	57	75	75
2	5	5	0.95	0.9	2.2						
3	3	1	0.88	0.4	1.2	28.6	100	30.1	75	50	75
4	4	3	0.65	0.88	2						

Прирости компонент векторів ω та g обчислювалися за виразом (Г.1), а для компонент вектору відгуків Y – за виразом (Г.2). За результатами розрахунків, які наведені в табл. Г.1 можна зробити наступні висновки:

– найбільша чутливість ІМ при зміні досягається за відгуком (коефіцієнт використання службового трафіка, який передається в інформаційній мережі);

– найбільша чутливість ІМ при зміні g досягається за відгуком $t_з$ (час затримки повідомлень, які передаються в інформаційній мережі);

– оскільки максимальна чутливість моделі до обох параметрів однакова (75%), то можна зробити висновок про те, що ІМ однаково чутлива до зміни як параметра ω, так і параметра g. Хоча, як видно з таблиці, 75%-ва зміна компонент вектору Y досягається у результаті 85,7%-ї зміни параметра та 100%-ї зміни параметра g.

Наведені вище результати дозволяють зробити висновок про достатню чутливість розробленої ІМ.

Додаток Д

Правила формування загальної метрики

1 if (Power is Low) and (Speed is Low) and (Delay is High) and (Reliability is Low) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS1)

2 if (Power is Low) and (Speed is Low) and (Delay is High) and (Reliability is Weak) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS2)

3 if (Power is Low) and (Speed is Low) and (Delay is High) and (Reliability is Medium) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS3)

4 if (Power is Low) and (Speed is Low) and (Delay is High) and (Reliability is High) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS4)

5 if (Power is Low) and (Speed is Low) and (Delay is Medium) and (Reliability is Low) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS2)

6 if (Power is Low) and (Speed is Low) and (Delay is Medium) and (Reliability is Weak) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS3)

7 if (Power is Low) and (Speed is Low) and (Delay is Medium) and (Reliability is Medium) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS4)

8 if (Power is Low) and (Speed is Low) and (Delay is Medium) and (Reliability is High) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS5)

9 if (Power is Low) and (Speed is Low) and (Delay is Weak) and (Reliability is Low) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS3)

10 if (Power is Low) and (Speed is Low) and (Delay is Weak) and (Reliability is Weak) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS4)

11 if (Power is Low) and (Speed is Low) and (Delay is Weak) and (Reliability is Medium) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS5)

12 if (Power is Low) and (Speed is Low) and (Delay is Weak) and (Reliability is High) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS6)

13 if (Power is Low) and (Speed is Low) and (Delay is Low) and (Reliability is Low) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS4)

14 if (Power is Low) and (Speed is Low) and (Delay is Low) and (Reliability is Weak) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS5)

15 if (Power is Low) and (Speed is Low) and (Delay is Low) and (Reliability is Medium) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS6)

16 if (Power is Low) and (Speed is Low) and (Delay is Low) and (Reliability is High) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS7)

17 if (Power is Low) and (Speed is Weak) and (Delay is High) and (Reliability is Low) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS2)

18 if (Power is Low) and (Speed is Weak) and (Delay is High) and (Reliability is Weak) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS3)

19 if (Power is Low) and (Speed is Weak) and (Delay is High) and (Reliability is Medium) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS4)

20 if (Power is Low) and (Speed is Weak) and (Delay is High) and (Reliability is High) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS5)

21 if (Power is Low) and (Speed is Weak) and (Delay is Medium) and (Reliability is Low) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS3)

22 if (Power is Low) and (Speed is Weak) and (Delay is Medium) and (Reliability is Weak) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS4)

23 if (Power is Low) and (Speed is Weak) and (Delay is Medium) and (Reliability is Medium) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS5)

24 if (Power is Low) and (Speed is Weak) and (Delay is Medium) and (Reliability is High) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS6)

25 if (Power is Low) and (Speed is Weak) and (Delay is Weak) and (Reliability is Low) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS4)

26 if (Power is Low) and (Speed is Weak) and (Delay is Weak) and (Reliability is Weak) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS5)

27 if (Power is Low) and (Speed is Weak) and (Delay is Weak) and (Reliability is Medium) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS6)

28 if (Power is Low) and (Speed is Weak) and (Delay is Weak) and (Reliability is High) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS7)

29 if (Power is Low) and (Speed is Weak) and (Delay is Low) and (Reliability is Low) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS5)

30 if (Power is Low) and (Speed is Weak) and (Delay is Low) and (Reliability is Weak) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS6)

31 if (Power is Low) and (Speed is Weak) and (Delay is Low) and (Reliability is Medium) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS7)

32 if (Power is Low) and (Speed is Weak) and (Delay is Low) and (Reliability is High) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS8)

33 if (Power is Low) and (Speed is Medium) and (Delay is High) and (Reliability is Low) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS3)

34 if (Power is Low) and (Speed is Medium) and (Delay is High) and (Reliability is Weak) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS4)

35 if (Power is Low) and (Speed is Medium) and (Delay is High) and (Reliability is Medium) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS5)

36 if (Power is Low) and (Speed is Medium) and (Delay is High) and (Reliability is High) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS5)

37 if (Power is Low) and (Speed is Medium) and (Delay is Medium) and (Reliability is Low) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS4)

38 if (Power is Low) and (Speed is Medium) and (Delay is Medium) and (Reliability is Weak) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS5)

39 if (Power is Low) and (Speed is Medium) and (Delay is Medium) and (Reliability is Medium) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS6)

40 if (Power is Low) and (Speed is Medium) and (Delay is Medium) and (Reliability is High) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS7)

41 if (Power is Low) and (Speed is Medium) and (Delay is Weak) and (Reliability is Low) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS5)

42 if (Power is Low) and (Speed is Medium) and (Delay is Weak) and (Reliability is Weak) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS6)

43 if (Power is Low) and (Speed is Medium) and (Delay is Weak) and (Reliability is Medium) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS7)

44 if (Power is Low) and (Speed is Medium) and (Delay is Weak) and (Reliability is High) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS8)

45 if (Power is Low) and (Speed is Medium) and (Delay is Low) and (Reliability is Low) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS6)

46 if (Power is Low) and (Speed is Medium) and (Delay is Low) and (Reliability is Weak) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS8)

47 if (Power is Low) and (Speed is Medium) and (Delay is Low) and (Reliability is Medium) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS8)

48 if (Power is Low) and (Speed is Medium) and (Delay is Low) and (Reliability is High) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS9)

49 if (Power is Low) and (Speed is High) and (Delay is High) and (Reliability is Low) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS4)

50 if (Power is Low) and (Speed is High) and (Delay is High) and (Reliability is Weak) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS5)

51 if (Power is Low) and (Speed is High) and (Delay is High) and (Reliability is Medium) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS6)

52 if (Power is Low) and (Speed is High) and (Delay is High) and (Reliability is High) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS7)

53 if (Power is Low) and (Speed is High) and (Delay is Medium) and (Reliability is Low) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS5)

54 if (Power is Low) and (Speed is High) and (Delay is Medium) and (Reliability is Weak) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS7)

55 if (Power is Low) and (Speed is High) and (Delay is Medium) and (Reliability is Medium) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS7)

56 if (Power is Low) and (Speed is High) and (Delay is Medium) and (Reliability is High) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS8)

57 if (Power is Low) and (Speed is High) and (Delay is Weak) and (Reliability is Low) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS6)

58 if (Power is Low) and (Speed is High) and (Delay is Weak) and (Reliability is Weak) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS7)

59 if (Power is Low) and (Speed is High) and (Delay is Weak) and (Reliability is Medium) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS8)

60 if (Power is Low) and (Speed is High) and (Delay is Weak) and (Reliability is High) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS9)

61 if (Power is Low) and (Speed is High) and (Delay is Low) and (Reliability is Low) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS7)

62 if (Power is Low) and (Speed is High) and (Delay is Low) and (Reliability is Weak) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS8)

63 if (Power is Low) and (Speed is High) and (Delay is Low) and (Reliability is Medium) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS9)

64 if (Power is Low) and (Speed is High) and (Delay is Low) and (Reliability is High) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS10)

65 if (Power is Weak) and (Speed is Low) and (Delay is High) and (Reliability is Low) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS2)

66 if (Power is Weak) and (Speed is Low) and (Delay is High) and (Reliability is Weak) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS3)

67 if (Power is Weak) and (Speed is Low) and (Delay is High) and (Reliability is Medium) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS4)

68 if (Power is Weak) and (Speed is Low) and (Delay is High) and (Reliability is High) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS5)

69 if (Power is Weak) and (Speed is Low) and (Delay is Medium) and (Reliability is Low) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS3)

70 if (Power is Weak) and (Speed is Low) and (Delay is Medium) and (Reliability is Weak) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS4)

71 if (Power is Weak) and (Speed is Low) and (Delay is Medium) and (Reliability is Medium) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS5)

72 if (Power is Weak) and (Speed is Low) and (Delay is Medium) and (Reliability is High) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS6)

73 if (Power is Weak) and (Speed is Low) and (Delay is Weak) and (Reliability is Low) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS4)

74 if (Power is Weak) and (Speed is Low) and (Delay is Weak) and (Reliability is Weak) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS5)

75 if (Power is Weak) and (Speed is Low) and (Delay is Weak) and (Reliability is Medium) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS6)

76 if (Power is Weak) and (Speed is Low) and (Delay is Weak) and (Reliability is High) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS7)

77 if (Power is Weak) and (Speed is Low) and (Delay is Low) and (Reliability is Low) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS5)

78 if (Power is Weak) and (Speed is Low) and (Delay is Low) and (Reliability is Weak) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS6)

79 if (Power is Weak) and (Speed is Low) and (Delay is Low) and (Reliability is Medium) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS7)

80 if (Power is Weak) and (Speed is Low) and (Delay is Low) and (Reliability is High) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS8)

81 if (Power is Weak) and (Speed is Weak) and (Delay is High) and (Reliability is Low) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS3)

82 if (Power is Weak) and (Speed is Weak) and (Delay is High) and (Reliability is Weak) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS4)

83 if (Power is Weak) and (Speed is Weak) and (Delay is High) and (Reliability is Medium) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS5)

84 if (Power is Weak) and (Speed is Weak) and (Delay is High) and (Reliability is High) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS6)

85 if (Power is Weak) and (Speed is Weak) and (Delay is Medium) and (Reliability is Low) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS4)

86 if (Power is Weak) and (Speed is Weak) and (Delay is Medium) and (Reliability is Weak) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS5)

87 if (Power is Weak) and (Speed is Weak) and (Delay is Medium) and (Reliability is Medium) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS6)

88 if (Power is Weak) and (Speed is Weak) and (Delay is Medium) and (Reliability is High) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS7)

89 if (Power is Weak) and (Speed is Weak) and (Delay is Weak) and (Reliability is Low) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS5)

90 if (Power is Weak) and (Speed is Weak) and (Delay is Weak) and (Reliability is Weak) then ((Level of attractiveness of food sources is LAFS6)

91 if (Power is Weak) and (Speed is Weak) and (Delay is Weak) and (Reliability is Medium) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS7)

92 if (Power is Weak) and (Speed is Weak) and (Delay is Weak) and (Reliability is High) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS8)

93 if (Power is Weak) and (Speed is Weak) and (Delay is Low) and (Reliability is Low) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS6)

94 if (Power is Weak) and (Speed is Weak) and (Delay is Low) and (Reliability is Weak) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS7)

95 if (Power is Weak) and (Speed is Weak) and (Delay is Low) and (Reliability is Medium) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS8)

96 if (Power is Weak) and (Speed is Weak) and (Delay is Low) and (Reliability is High) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS9)

97 if (Power is Weak) and (Speed is Medium) and (Delay is High) and (Reliability is Low) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS4)

98 if (Power is Weak) and (Speed is Medium) and (Delay is High) and (Reliability is Weak) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS5)

99 if (Power is Weak) and (Speed is Medium) and (Delay is High) and (Reliability is Medium) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS6)

100 if (Power is Weak) and (Speed is Medium) and (Delay is High) and (Reliability is High) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS7)

101 if (Power is Weak) and (Speed is Medium) and (Delay is Medium) and (Reliability is Low) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS5)

102 if (Power is Weak) and (Speed is Medium) and (Delay is Medium) and (Reliability is Weak) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS6)

103 if (Power is Weak) and (Speed is Medium) and (Delay is Medium) and (Reliability is Medium) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS7)

104 if (Power is Weak) and (Speed is Medium) and (Delay is Medium) and (Reliability is High) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS8)

105 if (Power is Weak) and (Speed is Medium) and (Delay is Weak) and (Reliability is Low) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS6)

106 if (Power is Weak) and (Speed is Medium) and (Delay is Weak) and (Reliability is Weak) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS7)

107 if (Power is Weak) and (Speed is Medium) and (Delay is Weak) and (Reliability is Medium) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS8)

108 if (Power is Weak) and (Speed is Medium) and (Delay is Weak) and (Reliability is High) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS9)

109 if (Power is Weak) and (Speed is Medium) and (Delay is Low) and (Reliability is Low) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS7)

110 if (Power is Weak) and (Speed is Medium) and (Delay is Low) and (Reliability is Weak) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS8)

111 if (Power is Weak) and (Speed is Medium) and (Delay is Low) and (Reliability is Medium) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS9)

112 if (Power is Weak) and (Speed is Medium) and (Delay is Low) and (Reliability is High) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS10)

113 if (Power is Weak) and (Speed is High) and (Delay is High) and (Reliability is Low) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS5)

114 if (Power is Weak) and (Speed is High) and (Delay is High) and (Reliability is Weak) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS6)

115 if (Power is Weak) and (Speed is High) and (Delay is High) and (Reliability is Medium) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS7)

116 if (Power is Weak) and (Speed is High) and (Delay is High) and (Reliability is High) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS8)

117 if (Power is Weak) and (Speed is High) and (Delay is Medium) and (Reliability is Low) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS6)

118 if (Power is Weak) and (Speed is High) and (Delay is Medium) and (Reliability is Weak) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS7)

119 if (Power is Weak) and (Speed is High) and (Delay is Medium) and (Reliability is Medium) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS8)

120 if (Power is Weak) and (Speed is High) and (Delay is Medium) and (Reliability is High) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS9)

121 if (Power is Weak) and (Speed is High) and (Delay is Weak) and (Reliability is Low) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS7)

122 if (Power is Weak) and (Speed is High) and (Delay is Weak) and (Reliability is Weak) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS8)

123 if (Power is Weak) and (Speed is High) and (Delay is Weak) and (Reliability is Medium) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS9)

124 if (Power is Weak) and (Speed is High) and (Delay is Weak) and (Reliability is High) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS10)

125 if (Power is Weak) and (Speed is High) and (Delay is Low) and (Reliability is Low) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS8)

126 if (Power is Weak) and (Speed is High) and (Delay is Low) and (Reliability is Weak) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS9)

127 if (Power is Weak) and (Speed is High) and (Delay is Low) and (Reliability is Medium) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS10)

128 if (Power is Weak) and (Speed is High) and (Delay is Low) and (Reliability is High) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS11)

129 if (Power is Medium) and (Speed is Low) and (Delay is High) and (Reliability is Low) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS3)

130 if (Power is Medium) and (Speed is Low) and (Delay is High) and (Reliability is Weak) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS4)

131 if (Power is Medium) and (Speed is Low) and (Delay is High) and (Reliability is Medium) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS5)

132 if (Power is Medium) and (Speed is Low) and (Delay is High) and (Reliability is High) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS6)

133 if (Power is Medium) and (Speed is Low) and (Delay is Medium) and (Reliability is Low) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS4)

134 if (Power is Medium) and (Speed is Low) and (Delay is Medium) and (Reliability is Weak) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS5)

135 if (Power is Medium) and (Speed is Low) and (Delay is Medium) and (Reliability is Medium) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS6)

136 if (Power is Medium) and (Speed is Low) and (Delay is Medium) and (Reliability is High) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS7)

137 if (Power is Medium) and (Speed is Low) and (Delay is Weak) and (Reliability is Low) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS5)

138 if (Power is Medium) and (Speed is Low) and (Delay is Weak) and (Reliability is Weak) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS6)

139 if (Power is Medium) and (Speed is Low) and (Delay is Weak) and (Reliability is Medium) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS7)

140 if (Power is Medium) and (Speed is Low) and (Delay is Weak) and (Reliability is High) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS8)

141 if (Power is Medium) and (Speed is Low) and (Delay is Low) and (Reliability is Low) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS6)

142 if (Power is Medium) and (Speed is Low) and (Delay is Low) and (Reliability is Weak) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS7)

143 if (Power is Medium) and (Speed is Low) and (Delay is Low) and (Reliability is Medium) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS8)

144 if (Power is Medium) and (Speed is Low) and (Delay is Low) and (Reliability is High) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS9)

145 if (Power is Medium) and (Speed is Weak) and (Delay is High) and (Reliability is Low) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS4)

146 if (Power is Medium) and (Speed is Weak) and (Delay is High) and (Reliability is Weak) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS5)

147 if (Power is Medium) and (Speed is Weak) and (Delay is High) and (Reliability is Medium) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS6)

148 if (Power is Medium) and (Speed is Weak) and (Delay is High) and (Reliability is High) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS7)

149 if (Power is Medium) and (Speed is Weak) and (Delay is Medium) and (Reliability is Low) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS5)

150 if (Power is Medium) and (Speed is Weak) and (Delay is Medium) and (Reliability is Weak) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS6)

151 if (Power is Medium) and (Speed is Weak) and (Delay is Medium) and (Reliability is Medium) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS7)

152 if (Power is Medium) and (Speed is Weak) and (Delay is Medium) and (Reliability is High) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS8)

153 if (Power is Medium) and (Speed is Weak) and (Delay is Weak) and (Reliability is Low) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS6)

154 if (Power is Medium) and (Speed is Weak) and (Delay is Weak) and (Reliability is Weak) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS7)

155 if (Power is Medium) and (Speed is Weak) and (Delay is Weak) and (Reliability is Medium) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS8)

156 if (Power is Medium) and (Speed is Weak) and (Delay is Weak) and (Reliability is High) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS9)

157 if (Power is Medium) and (Speed is Weak) and (Delay is Low) and (Reliability is Low) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS7)

158 if (Power is Medium) and (Speed is Weak) and (Delay is Low) and (Reliability is Weak) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS8)

159 if (Power is Medium) and (Speed is Weak) and (Delay is Low) and (Reliability is Medium) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS9)

160 if (Power is Medium) and (Speed is Weak) and (Delay is Low) and (Reliability is High) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS10)

161 if (Power is Medium) and (Speed is Medium) and (Delay is High) and (Reliability is Low) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS5)

162 if (Power is Medium) and (Speed is Medium) and (Delay is High) and (Reliability is Weak) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS6)

163 if (Power is Medium) and (Speed is Medium) and (Delay is High) and (Reliability is Medium) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS7)

164 if (Power is Medium) and (Speed is Medium) and (Delay is High) and (Reliability is High) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS8)

165 if (Power is Medium) and (Speed is Medium) and (Delay is Medium) and (Reliability is Low) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS6)

166 if (Power is Medium) and (Speed is Medium) and (Delay is Medium) and (Reliability is Weak) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS7)

167 if (Power is Medium) and (Speed is Medium) and (Delay is Medium) and (Reliability is Medium) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS8)

168 if (Power is Medium) and (Speed is Medium) and (Delay is Medium) and (Reliability is High) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS9)

169 if (Power is Medium) and (Speed is Medium) and (Delay is Weak) and (Reliability is Low) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS7)

170 if (Power is Medium) and (Speed is Medium) and (Delay is Weak) and (Reliability is Weak) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS8)

171 if (Power is Medium) and (Speed is Medium) and (Delay is Weak) and (Reliability is Medium) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS9)

172 if (Power is Medium) and (Speed is Medium) and (Delay is Weak) and (Reliability is High) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS10)

173 if (Power is Medium) and (Speed is Medium) and (Delay is Low) and (Reliability is Low) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS8)

174 if (Power is Medium) and (Speed is Medium) and (Delay is Low) and (Reliability is Weak) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS9)

175 if (Power is Medium) and (Speed is Medium) and (Delay is Low) and (Reliability is Medium) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS10)

176 if (Power is Medium) and (Speed is Medium) and (Delay is Low) and (Reliability is High) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS11)

177 if (Power is Medium) and (Speed is High) and (Delay is High) and (Reliability is Low) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS6)

178 if (Power is Medium) and (Speed is High) and (Delay is High) and (Reliability is Weak) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS7)

179 if (Power is Medium) and (Speed is High) and (Delay is High) and (Reliability is Medium) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS8)

180 if (Power is Medium) and (Speed is High) and (Delay is High) and (Reliability is High) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS9)

181 if (Power is Medium) and (Speed is High) and (Delay is Medium) and (Reliability is Low) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS7)

182 if (Power is Medium) and (Speed is High) and (Delay is Medium) and (Reliability is Weak) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS8)

183 if (Power is Medium) and (Speed is High) and (Delay is Medium) and (Reliability is Medium) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS9)

184 if (Power is Medium) and (Speed is High) and (Delay is Medium) and (Reliability is High) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS10)

185 if (Power is Medium) and (Speed is High) and (Delay is Weak) and (Reliability is Low) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS8)

186 if (Power is Medium) and (Speed is High) and (Delay is Weak) and (Reliability is Weak) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS9)

187 if (Power is Medium) and (Speed is High) and (Delay is Weak) and (Reliability is Medium) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS10)

188 if (Power is Medium) and (Speed is High) and (Delay is Weak) and (Reliability is High) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS11)

189 if (Power is Medium) and (Speed is High) and (Delay is Low) and (Reliability is Low) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS9)

190 if (Power is Medium) and (Speed is High) and (Delay is Low) and (Reliability is Weak) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS10)

191 if (Power is Medium) and (Speed is High) and (Delay is Low) and (Reliability is Medium) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS11)

192 if (Power is Medium) and (Speed is High) and (Delay is Low) and (Reliability is High) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS12)

193 if (Power is High) and (Speed is Low) and (Delay is High) and (Reliability is Low) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS4)

194 if (Power is High) and (Speed is Low) and (Delay is High) and (Reliability is Weak) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS5)

195 if (Power is High) and (Speed is Low) and (Delay is High) and (Reliability is Medium) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS6)

196 if (Power is High) and (Speed is Low) and (Delay is High) and (Reliability is High) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS7)

197 if (Power is High) and (Speed is Low) and (Delay is Medium) and (Reliability is Low) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS5)

198 if (Power is High) and (Speed is Low) and (Delay is Medium) and (Reliability is Weak) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS6)

199 if (Power is High) and (Speed is Low) and (Delay is Medium) and (Reliability is Medium) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS7)

200 if (Power is High) and (Speed is Low) and (Delay is Medium) and (Reliability is High) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS8)

201 if (Power is High) and (Speed is Low) and (Delay is Weak) and (Reliability is Low) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS6)

202 if (Power is High) and (Speed is Low) and (Delay is Weak) and (Reliability is Weak) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS7)

203 if (Power is High) and (Speed is Low) and (Delay is Weak) and (Reliability is Medium) (Level of attractiveness of food sources is LAFS8)

204 if (Power is High) and (Speed is Low) and (Delay is Weak) and (Reliability is High) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS9)

205 if (Power is High) and (Speed is Low) and (Delay is Low) and (Reliability is Low) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS7)

206 if (Power is High) and (Speed is Low) and (Delay is Low) and (Reliability is Weak) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS8)

207 if (Power is High) and (Speed is Low) and (Delay is Low) and (Reliability is Medium) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS9)

208 if (Power is High) and (Speed is Low) and (Delay is Low) and (Reliability is High) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS10)

209 if (Power is High) and (Speed is Weak) and (Delay is High) and (Reliability is Low) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS5)

210 if (Power is High) and (Speed is Weak) and (Delay is High) and (Reliability is Weak) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS6)

211 if (Power is High) and (Speed is Weak) and (Delay is High) and (Reliability is Medium) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS7)

212 if (Power is High) and (Speed is Weak) and (Delay is High) and (Reliability is High) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS8)

213 if (Power is High) and (Speed is Weak) and (Delay is Medium) and (Reliability is Low) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS6)

214 if (Power is High) and (Speed is Weak) and (Delay is Medium) and (Reliability is Weak) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS7)

215 if (Power is High) and (Speed is Weak) and (Delay is Medium) and (Reliability is Medium) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS8)

216 if (Power is High) and (Speed is Weak) and (Delay is Medium) and (Reliability is High) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS9)

217 if (Power is High) and (Speed is Weak) and (Delay is Weak) and (Reliability is Low) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS7)

218 if (Power is High) and (Speed is Weak) and (Delay is Weak) and (Reliability is Weak) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS8)

219 if (Power is High) and (Speed is Weak) and (Delay is Weak) and (Reliability is Medium) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS9)

220 if (Power is High) and (Speed is Weak) and (Delay is Weak) and (Reliability is High) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS10)

221 if (Power is High) and (Speed is Weak) and (Delay is Low) and (Reliability is Low) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS8)

222 if (Power is High) and (Speed is Weak) and (Delay is Low) and (Reliability is Weak) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS9)

223 if (Power is High) and (Speed is Weak) and (Delay is Low) and (Reliability is Medium) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS10)

224 if (Power is High) and (Speed is Weak) and (Delay is Low) and (Reliability is High) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS11)

225 if (Power is High) and (Speed is Medium) and (Delay is High) and (Reliability is Low) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS6)

226 if (Power is High) and (Speed is Medium) and (Delay is High) and (Reliability is Weak) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS7)

227 if (Power is High) and (Speed is Medium) and (Delay is High) and (Reliability is Medium) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS8)

228 if (Power is High) and (Speed is Medium) and (Delay is High) and (Reliability is High) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS9)

229 if (Power is High) and (Speed is Medium) and (Delay is Medium) and (Reliability is Low) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS7)

230 if (Power is High) and (Speed is Medium) and (Delay is Medium) and (Reliability is Weak) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS8)

231 if (Power is High) and (Speed is Medium) and (Delay is Medium) and (Reliability is Medium) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS9)

232 if (Power is High) and (Speed is Medium) and (Delay is Medium) and (Reliability is High) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS10)

233 if (Power is High) and (Speed is Medium) and (Delay is Weak) and (Reliability is Low) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS8)

234 if (Power is High) and (Speed is Medium) and (Delay is Weak) and (Reliability is Weak) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS9)

235 if (Power is High) and (Speed is Medium) and (Delay is Weak) and (Reliability is Medium) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS10)

236 if (Power is High) and (Speed is Medium) and (Delay is Weak) and (Reliability is High) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS11)

237 if (Power is High) and (Speed is Medium) and (Delay is Low) and (Reliability is Low) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS9)

238 if (Power is High) and (Speed is Medium) and (Delay is Low) and (Reliability is Weak) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS10)

239 if (Power is High) and (Speed is Medium) and (Delay is Low) and (Reliability is Medium) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS11)

240 if (Power is High) and (Speed is Medium) and (Delay is Low) and (Reliability is High) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS12)

241 if (Power is High) and (Speed is High) and (Delay is High) and (Reliability is Low) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS7)

242 if (Power is High) and (Speed is High) and (Delay is High) and (Reliability is Weak) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS8)

243 if (Power is High) and (Speed is High) and (Delay is High) and (Reliability is Medium) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS9)

244 if (Power is High) and (Speed is High) and (Delay is High) and (Reliability is High) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS10)

245 if (Power is High) and (Speed is High) and (Delay is Medium) and (Reliability is Low) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS8)

246 if (Power is High) and (Speed is High) and (Delay is Medium) and (Reliability is Weak) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS9)

247 if (Power is High) and (Speed is High) and (Delay is Medium) and (Reliability is Medium) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS10)

248 if (Power is High) and (Speed is High) and (Delay is Medium) and (Reliability is High) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS11)

249 if (Power is High) and (Speed is High) and (Delay is Weak) and (Reliability is Low) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS9)

250 if (Power is High) and (Speed is High) and (Delay is Weak) and (Reliability is Weak) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS10)

251 if (Power is High) and (Speed is High) and (Delay is Weak) and (Reliability is Medium) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS11)

252 if (Power is High) and (Speed is High) and (Delay is Weak) and (Reliability is High) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS12)

253 if (Power is High) and (Speed is High) and (Delay is Low) and (Reliability is Low) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS10)

254 if (Power is High) and (Speed is High) and (Delay is Low) and (Reliability is Weak) then (Level of attractiveness of food sources is LAFS11)

Додаток Е.

Патент України на корисну модель

УКРАЇНА (19) UA (11) 158500 (13) U
(51) МПК
H04B 1/54 (2006.01)
H04B 1/56 (2006.01)
H04B 1/58 (2006.01)
H04B 3/60 (2006.01)

НАЦІОНАЛЬНИЙ ОРГАН ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ВЛАСНОСТІ ДЕРЖАВНА ОРГАНІЗАЦІЯ "УКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ОФІС ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ВЛАСНОСТІ ТА ІННОВАЦІЙ"

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

(21) Номер заявки: u 2024 04273
(22) Дата подання заявки: 30.08.2024
(24) Дата, з якої є чинними права інтелектуальної власності: 13.02.2025
(46) Публікація відомостей про державну реєстрацію: 12.02.2025, Бюл.№ 7

(72) Винахідник(и):
Кашкевич Світлана Олександрівна (UA),
Шишацький Андрій Володимирович (UA),
Неронов Сергій Миколайович (UA),
Плєхова Ганна Анатоліївна (UA),
Єфименко Олександр Володимирович (UA),
Левтеров Андрій Іванович (UA)

(73) Володілець (володільці):
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АВТОМОБІЛЬНО-ДОРОЖНІЙ УНІВЕРСИТЕТ,
вул. Ярослава Мудрого, буд. 25, м. Харків, 61002 (UA),
Плєхова Ганна Анатоліївна,
вул. Мотронінська, 9, м. Харків, 61033 (UA)

(74) Представник:
Азарова Алла Володимирівна

UA 158500 U

(54) ПРИСТРІЙ ПОБУДОВИ МАРШРУТІВ ПЕРЕДАЧІ ІНФОРМАЦІЇ В ІНФОРМАЦІЙНИХ МЕРЕЖАХ СПЕЦІАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ З МОЖЛИВІСТЮ САМООРГАНІЗАЦІЇ

(57) Реферат:

Пристрій побудови маршрутів передачі інформації в інформаційних мережах спеціального призначення із можливістю самоорганізації містить передавальну та приймальну частини пристрою. Передавальна частина містить блок вибору цільової функції управління маршрутами, блок вибору типу маршрутизації, блок вибору кількості маршрутів, блок вибору способу розсилання службової інформації в мережі та блок отримувача інформації приймальної частини пристрою. У передавальній частині пристрою джерело інформації з'єднано із входом вибору цільової функції управління маршрутами, а вихід блока вибору типу маршрутизації, послідовно з'єднано з входом блока вибору кількості маршрутів, вихід якого послідовно з'єднано з входом блока вибору способу розсилання службової інформації в мережі. До складу передавальної частини пристрою додатково введено блок багатокритеріальної оптимізації, блок побудови і підтримання маршруту та блок локального зондування. Перший вихід блока вибору цільової функції управління маршрутами, з'єднаний з блоком багатокритеріальної оптимізації, а другий вихід - з першим входом блока побудови і підтримання маршруту, другий вхід якого з'єднаний з виходом блока багатокритеріальної оптимізації, вихід блока побудови і підтримання маршруту з'єднаний з входом блока вибору типу маршрутизації, а блок вибору способу розсилання службової інформації в мережі з'єднаний з блоком локального зондування. Передавальна і приймальна частини з'єднані між собою каналом локального зондування, який через канал передачі інформації з'єднаний з входом отримувача інформації приймальної частини пристрою.

Додаток Ж.

Патент України на корисну модель

УКРАЇНА (19) UA (11) 158501 (13) U

(51) МПК
H04B 1/54 (2006.01)
H04B 1/56 (2006.01)
H04B 1/58 (2006.01)
H04B 3/60 (2006.01)

НАЦІОНАЛЬНИЙ ОРГАН ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ВЛАСНОСТІ ДЕРЖАВНА ОРГАНІЗАЦІЯ "УКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ОФІС ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ВЛАСНОСТІ ТА ІННОВАЦІЙ"

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

(21) Номер заявки: u 2024 04274
(22) Дата подання заявки: 30.08.2024
(24) Дата, з якої є чинними права інтелектуальної власності: 13.02.2025
(46) Публікація відомостей про державну реєстрацію: 12.02.2025, Бюл.№ 7

(72) Винахідник(и):
Кашкевич Світлана Олександрівна (UA),
Шишацький Андрій Володимирович (UA),
Неронов Сергій Миколайович (UA),
Плєхова Ганна Анатоліївна (UA),
Єфименко Олександр Володимирович (UA),
Щукін Олександр Вікторович (UA),
Орел Олександр Володимирович (UA),
Кириченко Ігор Георгійович (UA),
Холодов Антон Павлович (UA),
Мусаєв Заур Разилович (UA),
Ковалевський Сергій Германович (UA)

(73) Володілець (володільці):
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АВТОМОБІЛЬНО-ДОРОЖНІЙ УНІВЕРСИТЕТ,
вул. Ярослава Мудрого, 25, м. Харків, 61002 (UA),
Плєхова Ганна Анатоліївна,
вул. Мотронінська, 9, м. Харків, 61033 (UA)

(74) Представник:
Азарова Алла Володимирівна

UA 158501 U

(54) ПРИСТРІЙ ПОБУДОВИ МАРШРУТІВ ПЕРЕДАЧІ ІНФОРМАЦІЇ В ІНФОРМАЦІЙНИХ МЕРЕЖАХ СПЕЦІАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

(57) Реферат:

Пристрій побудови маршрутів передачі інформації в інформаційних мережах спеціального призначення із можливістю самоорганізації містить передавальну та приймальну частини пристрою, при цьому передавальна і приймальна частини з'єднані між собою каналом передачі інформації. До складу передавальної частини пристрою побудови маршрутів передачі інформації в інформаційних мережах спеціального призначення із можливістю самоорганізації додатково введено блок вибору цільової функції управління маршрутами, блок вибору типу маршрутизації, блок вибору кількості маршрутів та блок вибору способу розсилання службової інформації в мережі. У передавальній частині пристрою джерело інформації з'єднано послідовно блоком вибору цільової функції управління маршрутами, вихід якого послідовно з'єднано з входом блока вибору типу маршрутизації, вихід якого послідовно з'єднано з входом блока вибору кількості маршрутів, вихід якого послідовно з'єднано з входом блока вибору способу розсилання службової інформації в мережі, вихід якого через канал передачі інформації з'єднаний з входом отримувача інформації приймальної частини пристрою.